

Guía de modelado de transformadores

Tabla de contenido

1	Conceptos básicos de los transformadores de potencia	6
1.1	Introducción	6
1.2	Teoría básica del transformador	6
1.2.1	Transformador ideal	7
1.2.2	Transformador práctico	8
1.3	Circuito equivalente de conmutación transitoria y de baja frecuencia	13
1.4	Representación de Transformadores en Sistemas de Potencia	14
1.5	Determinación de Parámetros en el Modelo de Transformador	dieciséis
1.6	Modelo T y modelo π del transformador	17
1.7	Supuestos, términos y designaciones.....	18
1.8	Transformadores Monofásicos	20
1.9	Transformadores Trifásicos.....	21
1.9.1	Configuraciones de devanados trifásicos	23
1.9.2	Desplazamiento de fase angular en transformadores trifásicos.....	23
1.9.3	Configuración de devanado en estrella	24
1.9.4	Configuración del devanado delta	26
1.9.5	Configuraciones de bobinado en zigzag (estrella interconectada)	28
1.9.6	Configuraciones del devanado del autotransformador	28
1.10	Circuito equivalente de autotransformadores	29
1.11	Transformadores de devanados múltiples	31
1.11.1	Doble Transformador Secundario [3]	31
1.11.2	Transformador de tres devanados	31
1.12	Cambiadores de tomas	33
1.12.1	Interruptor fuera de circuito o cambiador de tomas desenergizado (DETC)	33
1.12.2	Cambiador de tomas en carga	33
1.13	Relación de vueltas fuera de lo nominal	37
1.14	Datos del transformador: placa de identificación y resultados de la prueba	38
1.15	Pruebas estándar de transformadores	41
1.15.1	Prueba de pérdidas sin carga	44
1.15.2	Prueba de pérdidas de carga	46
1.15.3	Prueba de secuencia de fase cero	49
1.16	Estimación de los parámetros del transformador cuando no se dispone de información	61
1.17	Interpretación de los informes de prueba de transformadores	63
1.18	Relación X/R en Transformadores de Potencia	63
1.19	Otros tipos de aplicaciones de transformadores	64
1.19.1	Transformadores de Generador	64
1.19.2	Unidad de Transformadores Auxiliares	sesenta y cinco
1.19.3	Transformadores de distribución	sesenta y cinco
1.19.4	Transformadores de Subestación de Fuente de Distribución	66
1.19.5	Transformadores desfasadores	66
1.19.6	Transformadores de interconexión	67
1.19.7	Transformadores de puesta a tierra (puesta a tierra)	67
1.19.8	Transformadores convertidores	68
1.19.9	Otros tipos de transformadores	69
2	Determinación de parámetros de baja frecuencia de transformadores de dos devanados	70

2.1	Introducción	70
2.2	Transformadores Monofásicos	70
2.2.1	Transformador Monofásico de Dos Devanados Modelo Genérico	70
2.2.2	Procedimiento de modelado de transformadores monofásicos de dos devanados	71
2.3	Transformadores trifásicos.....	71
2.4	Transformadores de dos devanados con primario en estrella y secundario en estrella	71
2.4.1	Transformador YY de Dos Devanados: Modelo Genérico de Secuencia Positiva y Negativa	73
2.4.2	Transformador YY de dos devanados: procedimiento para determinar los parámetros del modelo genérico	75
2.4.3	Transformador YY de dos devanados: circuito equivalente de secuencia cero	75
2.4.4	Ejemplo 1: Un transformador Yy0 práctico de dos devanados.....	76
2.5	Transformadores de dos devanados con primario en estrella y secundario en triángulo	82
2.5.1	Transformador Y-triángulo de dos devanados: modelo genérico de secuencia positiva y negativa.....	82
2.5.2	Transformador Y-Delta de dos devanados: procedimiento para determinar los parámetros genéricos del modelo	83
2.5.3	Transformador Y-Delta de dos devanados: Circuito equivalente de secuencia cero	83
2.5.4	Ejemplo 2: Un transformador YNdelta1 práctico de dos devanados	84
2.6	Transformadores de dos devanados con Delta Primario Delta Secundario	99
2.6.1	Transformador delta-triángulo de dos devanados: modelo genérico de secuencia positiva y negativa	100
2.6.2	Transformador delta-triángulo de dos devanados: procedimiento para determinar los parámetros del modelo genérico	100
2.6.3	Transformador delta-triángulo de dos devanados: circuito equivalente de secuencia cero	101
2.6.4	Ejemplo 3: Un transformador Dd0 práctico de dos devanados	101
2.7	Transformadores de dos devanados con primario en triángulo y secundario en estrella	105
2.7.1	Transformador Delta-Y de dos devanados: modelo genérico de secuencia positiva y negativa	106
2.7.2	Transformador Delta-Y de dos devanados: procedimiento para determinar los parámetros genéricos del modelo	106
2.7.3	Transformador Delta-Y de dos devanados: circuito equivalente de secuencia cero	107
2.7.4	Ejemplo 4: Un transformador Delta-yn1 práctico de dos devanados	108
2.8	Autotransformadores de Dos Devanados (Estrella-Estrella)	118
2.8.1	Autotransformador de Dos Devanados: Modelo Genérico de Secuencia Positiva y Negativa	118
2.8.2	Autotransformador de Dos Devanados: Procedimiento para Determinar los Parámetros del Modelo Genérico	119
2.8.3	Autotransformador de dos devanados: circuito equivalente de secuencia cero	119
2.8.4	Ejemplo 5: Un Autotransformador Práctico de Dos Devanados (YY conectado)	120
2.9	Transformadores reguladores de tensión de dos devanados	125
2.9.1	Transformador regulador de voltaje de dos devanados: modelo genérico de secuencia positiva y negativa	128
2.9.2	Transformador regulador de voltaje de dos devanados: circuito equivalente de secuencia cero	129
2.9.3	Ejemplo 6: Un transformador regulador de voltaje de dos devanados práctico	129
2.10	Transformadores en zigzag (bujes de dos devanados)	136
3	Determinación de parámetros de baja frecuencia de transformadores de tres devanados	137
3.1	Introducción	137
3.2	Transformadores monofásicos de tres devanados.....	138
3.2.1	Modelo Genérico de Transformador Monofásico de Tres Devanados.....	138
3.2.2	Impedancias de fuga en transformadores de tres devanados	140
3.2.3	Impedancia de rama magnetizante en transformadores de tres devanados	142
3.2.4	Procedimiento de modelado de transformadores monofásicos de tres devanados	142
3.3	Transformadores trifásicos de tres devanados	144
3.4	Transformadores de tres devanados con primario en estrella, secundario en estrella y terciario en estrella	145
3.4.1	Transformador Yyy de Tres Devanados: Modelo Genérico de Secuencia Positiva y Negativa	145
3.4.2	Transformador Yyy de Tres Devanados: Procedimiento para Determinar los Parámetros del Modelo Genérico	145
3.4.3	Transformador Yyy de tres devanados: circuito equivalente de secuencia cero	145
3.4.4	Ejemplo 6: Un Transformador Yyy Práctico de Tres Devanados.....	146
3.5	Transformadores de tres devanados con primario en estrella, secundario en estrella y terciario en triángulo....	153

3.5.1	Transformador Yy-triángulo de tres devanados: modelo genérico de secuencia positiva y negativa	153
3.5.2	Transformador Yy-triángulo de tres devanados: procedimiento para determinar los parámetros del modelo genérico	153
3.5.3	Transformador Yy-triángulo de tres devanados: circuito equivalente de secuencia cero	153
3.5.4	Ejemplo 7: Un transformador práctico conectado YY-Delta de tres devanados	155
3.6	Transformadores de tres devanados con primario en triángulo, secundario en estrella y terciario en estrella....	167
3.6.1	Transformador Dyy de Tres Devanados: Modelo Genérico de Secuencia Positiva y Negativa.....	167
3.6.2	Transformador Dyy de Tres Devanados: Procedimiento para Determinar los Parámetros del Modelo Genérico	167
3.6.3	Transformador Dyy de tres devanados: circuito equivalente de secuencia cero	167
3.6.4	Ejemplo 8: Un transformador Dyy de tres devanados práctico.....	168
3.7	Transformadores de tres devanados con primario en triángulo, secundario en estrella y terciario en triángulo ..	172
3.8	Autotransformadores de tres devanados: Autotransformadores con devanado terciario (estrella-estrella con terciario en triángulo)	173
3.8.1	Autotransformador con Devanado Terciario Conectado en Delta: Modelo Genérico de Secuencia Positiva y Negativa	174
3.8.2	Autotransformador con Devanado Terciario Conectado en Delta: Procedimiento para Determinar los Parámetros del Modelo Genérico	175
3.8.3	Autotransformador con devanado terciario conectado en triángulo: circuito equivalente de secuencia cero	175
3.8.4	Ejemplo 9: Un Autotransformador Práctico de Tres Devanados, (Autotransformador Conectado Yy con Devanado Terciario en Delta)	176
4	Determinación de los parámetros de baja frecuencia de transformadores de cuatro devanados	181
4.1	El circuito equivalente de un transformador de cuatro devanados	182
4.1.1	El circuito equivalente de secuencia positiva para un transformador de cuatro devanados	182
4.1.2	El circuito equivalente de secuencia cero para un transformador de cuatro devanados	186
4.2	Ejemplo 10, Transformadores prácticos de cuatro devanados con primario en triángulo, secundario en triángulo, terciario en estrella y cuaternario en estrella	186
5	Transformadores de cambio de fase	192
5.1	Introducción	192
5.2	Configuraciones típicas de transformadores de desplazamiento de fase	193
5.3	Circuito equivalente del transformador de cambio de fase	196
5.3.1	Transformador de desplazamiento de fase delta estándar	197
5.3.2	Circuito equivalente de secuencia positiva de un transformador de desplazamiento de fase delta estándar	197
5.3.3	Circuito equivalente de secuencia negativa de un transformador de desplazamiento de fase delta estándar	199
5.3.4	Circuito equivalente de secuencia cero de un transformador de cambio de fase delta estándar	199
5.3.5	Transformador de cambio de fase de dos núcleos	200
5.3.6	Circuito equivalente de secuencia positiva de un transformador de desplazamiento de fase de dos núcleos	201
5.3.7	Circuito equivalente de secuencia negativa de un transformador de desplazamiento de fase de dos núcleos	203
5.3.8	Circuito equivalente de secuencia cero del transformador de cambio de fase delta estándar	203
5.4	Ejemplo 11: Transformador de desplazamiento de fase práctico	203
6	Modelo TASMo de Transformadores	218
6.1	Introducción	218
6.2	Transformadores de dos devanados	225
6.2.1	Transformador de dos devanados con Wye Primario y Wye Secundario.....	225
6.2.2	Transformador de dos devanados con primario en estrella y secundario en triángulo	228
6.2.3	Transformador de dos devanados con triángulo primario Delta secundario	231
6.2.4	Transformador de dos devanados con triángulo primario en estrella secundario	234
6.2.5	Autotransformador de Dos Devanados (Estrella-Estrella).....	237
6.2.6	Transformador regulador de voltaje de dos devanados	238
6.3	Transformadores de tres devanados	242
6.3.1	Transformador de tres devanados con primario en estrella, secundario en estrella y terciario en estrella	242

6.3.2	Transformador de tres devanados con primario en estrella, secundario en estrella y terciario en triángulo.....	247
6.3.3	Transformador de tres devanados con primario en triángulo, secundario en estrella y terciario en estrella.....	252
6.3.4	Autotransformador de Tres Devanados: Autotransformador con Devanado Terciario (Estrella-Estrella con Terciario Delta).....	257

7	Referencias.....	260
Apéndice A.	PSS/E V33 Modelo de Transformadores	261
Apéndice B.	Cambiador de grifo	277
Apéndice C.	Teoría de las redes de dos puertos	279
Apéndice D.	Procedimiento para Modelar un Transformador en Secuencia Cero	290
Apéndice E.	El sistema por unidad	291
Apéndice F.	Tabla de impedancia del transformador	294
Apéndice G.	Definiciones.....	303

1 Conceptos Básicos de los Transformadores de Potencia

1.1 Introducción

Los transformadores son dispositivos estáticos que inducen el acoplamiento mutuo entre circuitos para transferir energía de un circuito a otro. Hay muchos tipos de transformadores, y se utilizan en muchos tipos de aplicaciones. Esta guía trata exclusivamente de los transformadores de potencia utilizados en los sistemas de transmisión y distribución de energía.

Un transformador generalmente consta de dos o más devanados acoplados en un núcleo de hierro magnético. Cada fase de un transformador de potencia normalmente tiene un par de devanados (el primario y el secundario) unidos por un circuito o núcleo magnético. Los devanados de los transformadores ordinarios pueden tener resistencias efectivas de una fracción de ohmio a varios ohmios. El núcleo del transformador está hecho de un hierro de alta permeabilidad magnética que hace posible una alta densidad de flujo magnético con una fuerza magnetomotriz mínima. Debido a que la densidad de flujo en el núcleo debe limitarse a aproximadamente 1,7 Tesla, existe un límite para el tamaño mínimo del núcleo. Las limitaciones de envío pueden determinar el tamaño máximo del transformador. Los transformadores suelen ser los componentes más grandes, más pesados y, a menudo, más costosos de los sistemas de transmisión de energía.

Esta guía analiza ciertos aspectos técnicos y prácticos de todos los tipos de transformadores en los sistemas de potencia, incluido el propósito de su aplicación, el circuito eléctrico equivalente y las técnicas de modelado que se utilizan actualmente para los estudios de los sistemas de potencia y la determinación de los parámetros del transformador. Su propósito es facilitar el modelado y análisis de transformadores utilizando diferentes software de sistemas de potencia. Para mayor coherencia y facilidad de comprensión, esta guía utiliza unidades SI.

Para que esta guía sea accesible a una amplia gama de usuarios, comienza con una revisión de conceptos básicos y puntos técnicos clave.

1.2 Teoría básica del transformador

Los transformadores se utilizan para diferentes propósitos; sin embargo, las teorías y conceptos fundamentales de todos los transformadores son los mismos. Un transformador funciona según el principio de la inducción electromagnética. La figura 1-1 muestra un transformador de potencia monofásico con un núcleo magnético y dos devanados (el primario y el secundario) enrollados alrededor del núcleo en patas de núcleo opuesto. El transformador está en condición sin carga con el devanado primario conectado a una fuente de ca. Los devanados están unidos por un flujo mutuo.

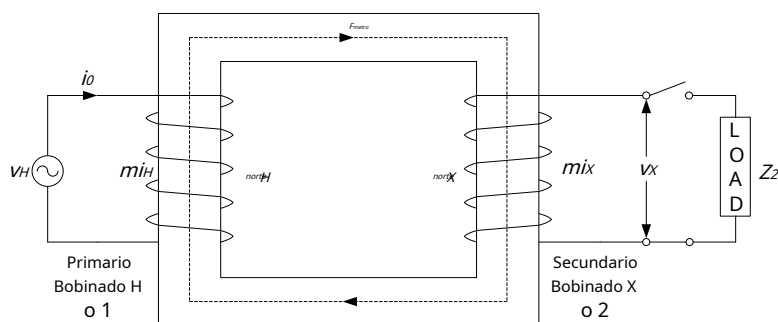


Figura 1-1- Transformador ideal con devanado primario y secundario

1.2.1 Transformador ideal

Una forma de facilitar la comprensión del funcionamiento del transformador es considerar un transformador como un dispositivo ideal.

Un transformador ideal tiene las siguientes características:

- Los devanados tienen conductividad perfecta. Por lo tanto, las pérdidas de cobre en la bobina primaria o en la bobina secundaria son cero.
- La disipación de energía por histéresis y corrientes de Foucault en el núcleo del imán es cero.
- La permeabilidad magnética en el núcleo es perfecta y constante (la reluctancia o la resistencia magnética son cero; por lo tanto, la inductancia de fuga es cero).
- No se necesita corriente de magnetización para configurar el flujo magnético.
- El núcleo exhibe características magnéticas lineales debido a la permeabilidad constante.

De acuerdo con estas suposiciones, un transformador ideal es un dispositivo sin pérdidas capaz de transformar incluso voltaje de CC.

La relación entre el voltaje inducido y el flujo viene dada por la ley de Faraday de la siguiente manera:

$$v = N \frac{d\phi}{dt}$$

dónde v es el voltaje inducido instantáneo en una sola vuelta o voltios por vuelta, y ϕ es el flujo de enlace. Suponiendo que el transformador está excitado por un voltaje ca con frecuencia sinusoidal. Por lo tanto, el valor efectivo de voltios por vuelta (el valor rms) será:

$$V_{rms} = 4.44 f N \phi_m$$

donde f es la frecuencia de operación y ϕ_m es la amplitud del flujo sinusoidal de enlace. Para diseño, esta expresión se muestra como:

—

donde E es el voltaje inducido y N es el número de vueltas. A es la sección transversal efectiva del núcleo y es el valor máximo de densidad de flujo en el núcleo. Esta ecuación es la ecuación EMF de un transformador. Para una frecuencia y número de vueltas determinados, el flujo (y la densidad de flujo) en un núcleo está determinado por el voltaje aplicado. En la práctica, está determinada por el material del núcleo seleccionado por el diseñador y por las condiciones de operación del transformador. Debido a que el mismo flujo de enlace induce voltaje en los devanados primario y secundario, los voltios por vuelta son los mismos para ambos devanados:

— —

La tensión total inducida en cada uno de los devanados debe ser, por tanto, proporcional al número de vueltas:

— —

donde E es el voltaje inducido y N es el número de vueltas en el devanado identificado por el subíndice apropiado. Si se conecta una carga al devanado secundario de un transformador ideal, la corriente fluirá en el secundario y, por lo tanto, en el primario. Desde el punto de vista del circuito magnético, los amperios-vueltas en ambos devanados se equilibran así:

Por lo tanto:

— — —

Esta es la ecuación básica para todos los tipos de transformadores.

1.2.2 Transformador práctico

Las suposiciones y el análisis presentados para un transformador ideal son útiles para explicar los fundamentos de la operación del transformador. Sin embargo, algunas suposiciones ideales hechas para un transformador ideal no son aplicables en un transformador práctico del mundo real.

a) Corriente Magnetizante

En la práctica, la resistencia magnética de un transformador práctico no es cero (como en un transformador ideal). Esto significa que no todo el flujo producido por el primario está contenido en el núcleo. El flujo no contenido en el núcleo es el flujo de fuga, que ocurre fuera del "aire" del núcleo. los

el devanado primario atrae una pequeña corriente de excitación, , desde la fuente y establece una alternancia MMF y, por tanto, un flujo alterno en el núcleo. Esta corriente es la corriente de magnetización (la corriente de excitación). Dependiendo de la reluctancia magnética del núcleo, una gran parte del flujo fluirá en el núcleo y conectará ambos devanados e inducirá una FEM en cada devanado. La FEM inducida en el primario es la FEM posterior y se opone al voltaje aplicado primario según la ley de Lenz. En el devanado secundario, el voltaje inducido es un voltaje de circuito abierto. Si el circuito secundario está en circuito abierto, el transformador se comportará como un inductor con un núcleo de hierro cerrado de alta permeabilidad. Por lo tanto, tendrá una alta inductancia. Sin embargo, aún fluirá una pequeña cantidad de corriente en el devanado primario y excitará el circuito magnético y generará el voltaje primario o FEM de retorno. Si una carga está conectada al secundario, el voltaje inducido dará como resultado el flujo de una corriente en la carga y el devanado secundario. Esta corriente crea MMF desmagnetizante y destruye el equilibrio entre el voltaje aplicado y el EMF posterior. Para restablecer el equilibrio, la corriente extraída en el devanado primario del suministro se incrementa para proporcionar un MMF exactamente equivalente. El equilibrio se establece cuando esta corriente primaria adicional crea las mismas vueltas de amperios que las que crean las vueltas de amperios secundarias.

b) Fugas e inductancias mutuas

Como se señaló, la permeabilidad magnética de un núcleo de hierro en un transformador real no es infinita. Por lo tanto, no todo el flujo producido por el devanado primario enlaza con el devanado secundario. Una pequeña parte del flujo que une cada devanado, el flujo de fuga de ese devanado, no se une a otro devanado o devanados y se cierra a través del aire, por lo que se puede decir que el transformador posee una reactancia de fuga en cada devanado. Cuando se utilizaron por primera vez los transformadores, la reactancia de fuga se consideró una deficiencia que debía minimizarse tanto como fuera posible, sujeta a restricciones de costos. Con el crecimiento de los sistemas de distribución y transmisión de energía, se reconoció que la reactancia de fuga del transformador (impedancia total del transformador) tiene un papel importante en la limitación de la corriente de falla en los sistemas de energía. En el presente, El uso de transformadores de alta impedancia es uno de los enfoques utilizados para limitar la corriente de falla más allá del valor máximo en los sistemas de potencia. El modelo de transformador de dos devanados que se muestra en la Figura 1-1 ahora puede convertirse en el modelo lineal y sin pérdidas del transformador no saturado que se muestra en la Figura 1-2.

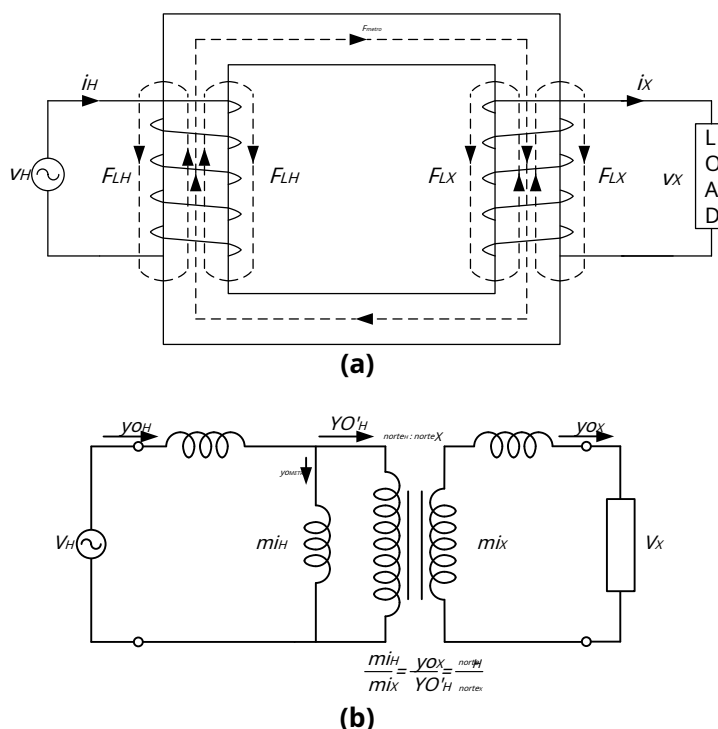


Figura 1-2- Modelo lineal sin pérdidas de un transformador de dos devanados con un equivalente circuito de un transformador que incluye inductancias magnetizantes y de fuga

El flujo de fuga que se muestra en la Figura 1-2 es producido por la corriente en el devanado H y solo enlaces devanado H. El flujo de fuga es producido por la corriente en el devanado X, que solo une devanado X. Las inductancias de fuga primaria y secundaria son, respectivamente:

—
—

Si la reluctancia magnética ofrecida a la trayectoria del flujo de enlace o el flujo mutuo se denota por , la inductancia mutua se puede definir por:

—

Sustituyendo estas ecuaciones da:

—

donde k es el coeficiente de acoplamiento y está entre 0 y 1. Para un transformador ideal, se dice que los devanados tienen un acoplamiento perfecto sin flujo de fuga, k es 1.

c) Pérdidas en el núcleo (pérdidas sin carga)

En un transformador de potencia, las pérdidas por corriente de Foucault y por histéresis no pueden ignorarse. En la práctica, cada vez que un material magnético sufre una magnetización alternativa, se producen dos tipos de pérdidas: pérdida por corrientes de Foucault y pérdida por histéresis. Las pérdidas por remolino y por histéresis juntas no constituyen pérdidas de carga en el transformador. A los efectos de esta guía, es suficiente afirmar que la pérdida por Foucault, , ocurre debido a las corrientes de Foucault que circulan dentro del núcleo de acero producidas debido al voltaje inducido en el núcleo de hierro en respuesta al flujo de flujo magnético alternativo geométricamente normal al ancho del núcleo La pérdida por histéresis, , es causada por la inversión sucesiva del flujo en el circuito magnético y es proporcional al área del bucle de histéresis en la curva BH.

Es proporcional al cuadrado del espesor de las láminas, al cuadrado de la frecuencia y al cuadrado del valor efectivo de la densidad de flujo dado por:

dónde k_1 y k_2 son constantes dependiendo de los materiales, B_m es el valor pico real de la densidad de flujo, B es la densidad de flujo efectivo nominal correspondiente a la tensión rms real, es el espesor de las láminas individuales, y k es la constante de Steinmetz que tiene un valor de 1.6 a 2,0 para laminaciones laminadas en caliente y un valor de más de 2,0 para laminaciones laminadas en frío debido al uso de densidades de flujo de operación más altas en ellas. El acero laminado en frío se ha utilizado en casi todos los transformadores de potencia desde la década de 1960.

Tanto las pérdidas por corrientes de Foucault como las pérdidas por histéresis se pueden reducir mediante el uso de láminas de acero más delgadas, pero esto aumenta el costo. Un compromiso es utilizar espesores de laminación de entre 0,23 y 0,27 mm.

Las pérdidas por corrientes de Foucault y las pérdidas por histéresis aumentan exponencialmente con el flujo y, en consecuencia, con el voltaje. No se puede permitir que el voltaje, y por lo tanto las pérdidas del núcleo, excedan el límite en el cual la temperatura del punto caliente en el transformador se eleva por encima del punto que resultará en una disminución en la vida útil del aislamiento. Este límite se expresa prácticamente en valores nominales de voltaje del transformador por la relación de $V_{rms} = k \sqrt{f}$. Por lo tanto, un transformador se describe típicamente por sus tensiones nominales y k , que da tanto los límites como la relación de espiras.

Las pérdidas en el núcleo se pueden modelar como una conductancia en paralelo con la rama de magnetización; sin embargo, es no lineal y dependiente de la frecuencia. El modelo de transformador presentado en la Figura 1-2 ahora se puede desarrollar para el transformador en la Figura 1-3, que incluye un modelo de pérdidas en el núcleo.

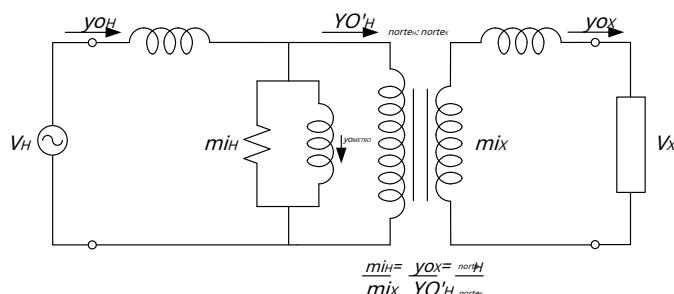


Figura 1-3- Circuito equivalente del transformador de pérdidas de carga

d) Pérdidas de carga (pérdidas de conductor)

El término pérdidas de carga (pérdidas de conductor) representa las pérdidas en el transformador que resultan del flujo de corriente de carga en los devanados. Comprende las pérdidas por resistencia de CC, las pérdidas por corrientes de Foucault causadas por el flujo de fuga y las pérdidas por dispersión en los devanados y en otras partes del tanque del transformador.

Las pérdidas de resistencia (pérdidas de resistencia de CC) son causadas por la corriente que fluye a través de la resistencia de los conductores y conductores. Es proporcional a la longitud del conductor dividida por el área de la sección transversal del conductor. Esto es cierto para las corrientes de CC. Sin embargo, tomar solo las pérdidas de resistencia como pérdidas de carga es en realidad una simplificación excesiva para las corrientes de CA. En la práctica, las pérdidas de conductores adicionales que afectan el diseño del transformador deben tenerse en cuenta hasta cierto punto.

La primera pérdida adicional del conductor es la pérdida por corrientes parásitas causada por el flujo de fuga. Como se discutió anteriormente, las corrientes de Foucault inducidas debido al campo magnético alterno generan pérdidas locales incluso si el conductor en sí no transporta ninguna corriente eléctrica neta. Cuando un transformador está muy cargado, pueden producirse grandes cantidades de flujo de fuga. Los campos magnéticos asociados con este flujo de fuga no solo penetran en los conductores del devanado, sino que también pueden involucrar otras partes metálicas de un transformador, como la troncal y la estructura del transformador. Las corrientes de Foucault inducidas por estos campos son proporcionales al flujo de fuga, que a su vez es proporcional a las corrientes de carga. Por lo tanto, la corriente de Foucault se puede modelar como una resistencia adicional ya que está relacionada con la corriente de carga.

Las pérdidas por dispersión adicionales son aquellas pérdidas asociadas con la estructura de sujeción del devanado y el núcleo y con el tanque del transformador [2], [6].

Además de las pérdidas por dispersión, el efecto piel aumenta la resistencia efectiva del conductor. Concentra la corriente hacia el borde del conductor debido a la naturaleza de la corriente de carga alternativa en los devanados y, en consecuencia, reduce el área efectiva del conductor que realmente transporta la corriente [2].

Las pérdidas totales del conductor en un transformador, incluyendo el componente de pérdidas de Foucault y el componente de efecto pelicular, se pueden representar como una resistencia de CA dada por:

dónde R_H es la resistencia ac del conductor y R_X es su resistencia dc, I_F es la corriente de Foucault, R_{pH} es la resistencia equivalente de pérdida, R_{pX} es la resistencia equivalente de pérdida parásita, y δ es el efecto de la piel. Las pérdidas de carga se modelan como equivalentes a colocar una resistencia concentrada en serie con el terminal del devanado.

Las pérdidas en los conductores aumentan la temperatura del transformador, y esta temperatura está limitada de acuerdo con las normas. Por lo tanto, es importante reducir las pérdidas del conductor, lo que a su vez reduce la resistencia de ca de los devanados.

Para reducir las pérdidas del conductor no es suficiente reducir la resistencia de cd del conductor acortando la longitud del conductor y aumentando la sección transversal del conductor porque las pérdidas por Foucault en el conductor aumentarán más rápido de lo que disminuirán las pérdidas por calentamiento. En cambio, el conductor se subdivide en una serie de pequeños hilos paralelos aislados entre sí para romper los caminos de las corrientes de Foucault; esto puede reducir las pérdidas por efecto pelicular y corrientes de Foucault. Los hilos se unen al final del núcleo y forman componentes paralelos para transportar la corriente. Los componentes paralelos pueden estar involucrados en la corriente circulante debido a diferentes campos electromagnéticos inducidos en los hilos causados por diferentes bucles de hilos que se unen con el flujo de fuga. Para evitar esta corriente circulante y más pérdidas,

1.3 Circuito equivalente de baja frecuencia y conmutación transitoria

El modelo de transformador desarrollado en las secciones anteriores es el modelo lineal de un transformador en la frecuencia de operación. En este modelo se han tenido en cuenta las pérdidas en el núcleo y las pérdidas en la carga. En la práctica, el comportamiento magnético de un transformador no es lineal; sin embargo, en el análisis del sistema de potencia se supone que es un componente lineal. La figura 1-4 muestra el circuito equivalente de un transformador monofásico de dos devanados a la frecuencia de operación. Este modelo se conoce como circuito equivalente T del transformador y se ha utilizado con éxito durante muchos años en estudios de estado estable y algunos estudios transitorios de baja frecuencia. La mayoría de los libros de texto y la literatura utilizan este modelo para describir el comportamiento del transformador en el que R_H y R_X son las resistencias en serie incluyendo el R_{pH} y R_{pX} son las inductancias de fuga de los devanados. Los L_H y L_X en la rama de derivación representan el comportamiento del núcleo, incluida la no linealidad, la saturación y la histéresis, y los fenómenos de corrientes parásitas.

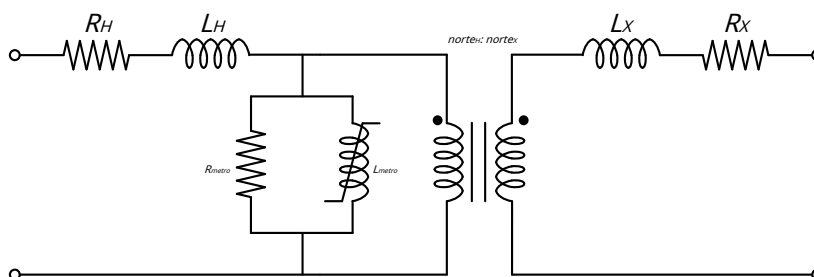


Figura 1-4- Circuito equivalente de un transformador real (Modelo T)

El modelo T es relativamente fácil de implementar, pero a excepción de la resistencia del devanado, en un sentido topológico otros parámetros no tienen relación con los componentes físicos del

transformador. La principal desventaja de este modelo es dividir arbitrariamente la reactancia de dispersión en serie en dos reactancias en serie para cada lado. En la figura 1-5 se muestra otro circuito equivalente conocido como modelo π de transformador. En este modelo los elementos internos representan físicamente el circuito magnético. Tiene solo una inductancia de fuga en el medio y dos ramas magnetizantes.

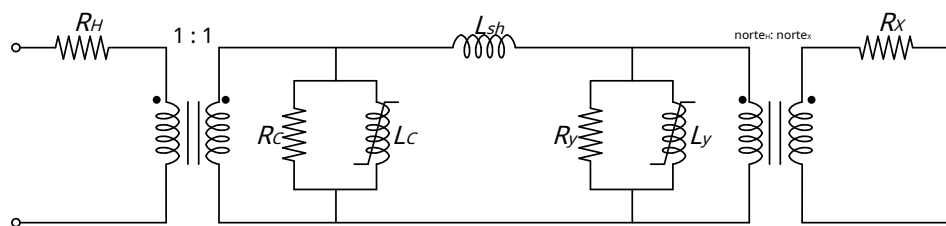


Figura 1-5- Circuito equivalente de un transformador real (Modelo π)

1.4 Representación de Transformadores en Sistemas de Potencia

El modelo de transformador de la figura 1-4 es un modelo preciso de un transformador, pero no es un modelo muy útil. Para analizar circuitos prácticos que contienen transformadores, generalmente es necesario tener el circuito equivalente en un solo nivel de voltaje; por lo tanto, el circuito equivalente se puede referir al lado primario del transformador o al lado secundario. La Figura 1-6 muestra los circuitos equivalentes del transformador referidos a (a) el lado primario y (b) el lado secundario. Además de convertir los parámetros del circuito equivalente a un lado del transformador, el modelo es aún más complejo de lo necesario para aplicaciones prácticas de ingeniería. Debido a que la rama de magnetización agrega otro nodo al circuito que se analiza, aumenta la complejidad de la solución del circuito más de lo necesario.

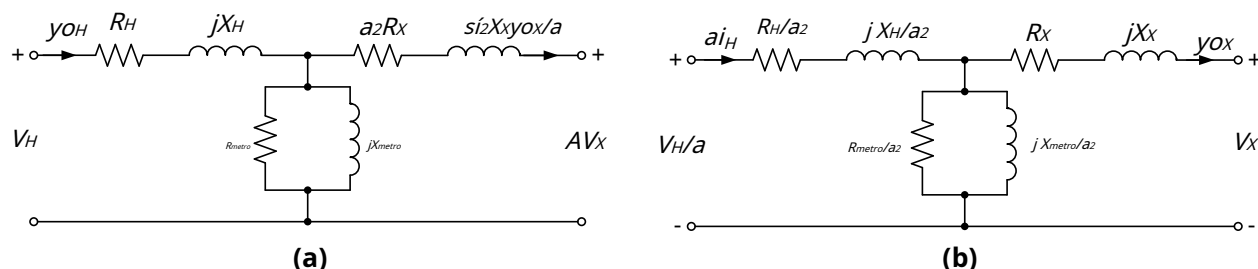


Figura 1-6- Circuito equivalente del transformador referido a: a) El lado primario b) El lado secundario

En condiciones nominales (es decir, corriente y tensión máximas) en transformadores grandes, la corriente de excitación es inferior al 1% de la corriente a plena carga. Por lo tanto, el efecto de la corriente de excitación sobre la caída de voltaje en la inductancia de fuga y la resistencia del devanado es insignificante. Bajo la corriente nominal máxima, la caída de tensión total en las resistencias de los devanados y en las inductancias de fuga no supera el 6 % de la tensión nominal en un transformador típico [7]. Por lo tanto, los efectos de la corriente y el voltaje del devanado a través de la resistencia del devanado y la inductancia de fuga sobre el voltaje de la rama de magnetización en la Figura 1-6 son pequeños y sus efectos sobre la corriente de magnetización pueden ignorarse. Estas consideraciones permiten mover la derivación del núcleo a la única terminal en el circuito equivalente del transformador.

1-7 se denomina circuito equivalente de transformador simplificado. Es lo suficientemente preciso para propósitos de modelado y útil en estudios de sistemas de potencia. Esta aproximación se puede mejorar agregando la resistencia del devanado y la reactancia de fuga a la resistencia y la reactancia del núcleo, pero eso no se hace con frecuencia.

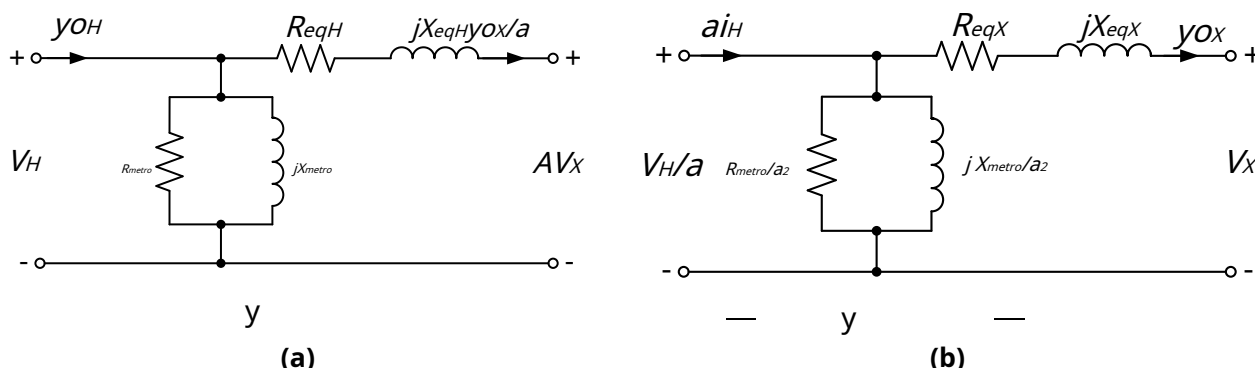


Figura 1-7- Modelo de transformador simplificado utilizado en el análisis del sistema de potencia referido a:
a) El lado primario b) El lado secundario

Normalmente, en el estudio del sistema de potencia, los parámetros del sistema se expresan por unidad de un valor base calculado utilizando una base de voltaje y potencia seleccionada. Por ejemplo, en un transformador en el lado de alto voltaje, el alto voltaje nominal es el voltaje base, y en el lado de bajo voltaje, el voltaje base es el voltaje nominal en el lado bajo. Por lo tanto, en términos unitarios, el voltaje en ambos lados del transformador es 1.0 pu. El uso de los valores por unidad elimina la necesidad del transformador ideal en el análisis y el modelo del transformador se convierte en el que se muestra en la figura 1-8.

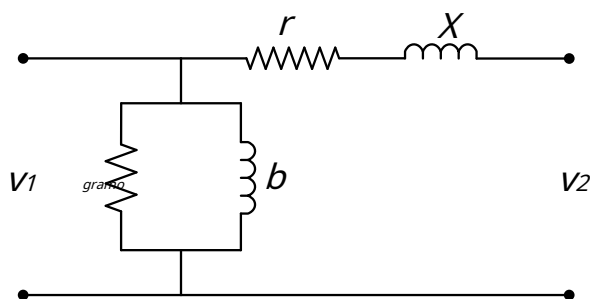


Figura 1-8- Circuito equivalente simplificado de un transformador de dos devanados en por unidad

En algunas aplicaciones, la rama de magnetización puede despreciarse por completo sin causar un error grave. En este caso, el circuito equivalente del transformador se reduce a una impedancia en serie simple de , como se muestra en la figura 1-9. No hay necesidad de obtener la prueba de pérdidas sin carga resultados. Es una buena aproximación en la mayoría de los casos, a menos que el núcleo esté saturado [7], [13].

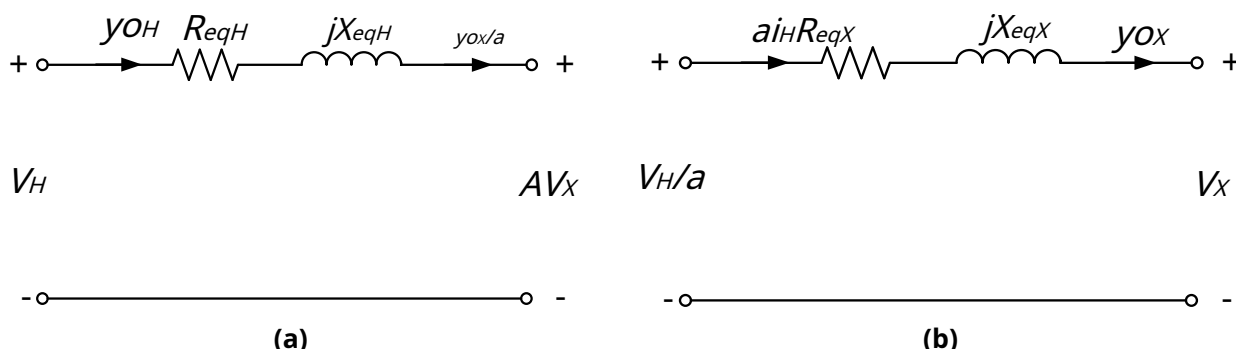


Figura 1-9- Modelo de transformador simplificado referido a: a) El lado primario b) El secundario lado

Esta simplificación se usa a veces para expresar la impedancia en serie del transformador. En este método, la impedancia se expresa como un porcentaje de caída de tensión en el transformador a plena carga de corriente [3], [4]. Por ejemplo, una impedancia del 7 % significa que la caída de tensión a plena carga es del 7 % de la tensión de circuito abierto o, alternativamente, con los terminales secundarios en cortocircuito, una tensión del 7 % hará que fluya la corriente a plena carga. los devanados

1.5 Determinación de parámetros en el modelo de transformador

Es posible determinar técnicamente todos los valores de los parámetros en el modelo de transformador presentado en la Figura 1-4 mediante la realización de experimentos. Como se mencionó en la sección anterior, el modelo simplificado que se muestra en la Figura 1-7 es una aproximación adecuada de un modelo de transformador. Los parámetros de este modelo se pueden determinar mediante pruebas de circuito abierto (sin carga) y de cortocircuito (con carga).

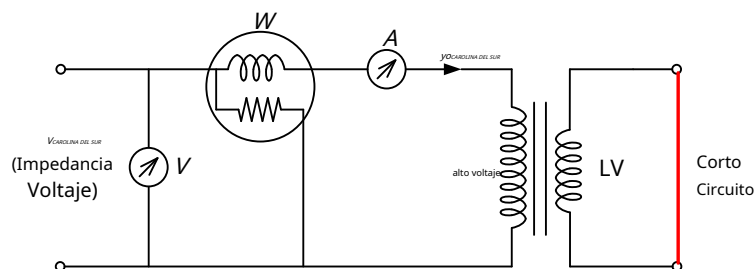


Figura 1-10- Diagrama de prueba de cortocircuito

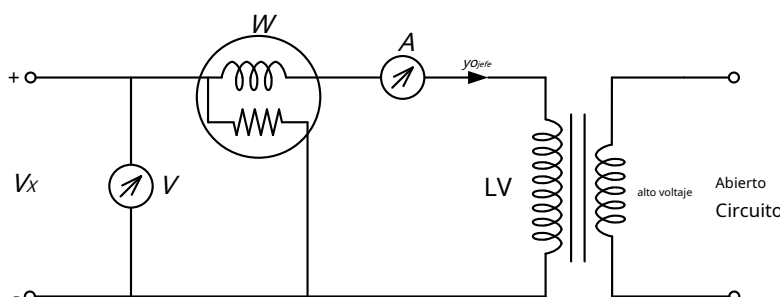


Figura 1-11- Diagrama de prueba de circuito abierto

es la resistencia ac equivalente referida al devanado de alto voltaje. Como se explicó anteriormente, incluye la resistencia de cd de los devanados, la resistencia equivalente a las pérdidas por Foucault en los devanados, el efecto pelicular y las pérdidas por dispersión en las partes estructurales. No es práctico repartir partes de las pérdidas perdidas entre los dos devanados. Por lo tanto, si se requiere el parámetro de resistencia para cada devanado, generalmente se asume que:

Del mismo modo, se supone que:

aunque existen algunas preocupaciones con respecto a su aplicabilidad. [7].

En la práctica, el porcentaje de reactancia (% X) podría tomarse como el mismo porcentaje de impedancia (% Z) porque R es mucho menor que X. Esta aproximación puede no ser cierta para transformadores de distribución muy pequeños.

1.6 Modelo T y modelo π del transformador

El modelo T del transformador de la figura 1-4 es un modelo bien conocido que se ha utilizado para estudios de sistemas de potencia durante muchos años. Sin embargo, todavía tiene la desventaja de la separación de impedancia en serie. Otra desventaja es que agrega un bus adicional al modelo de estudio del sistema de potencia para la rama de magnetización del modelo. El modelo π presentado en la Figura 1-5 no agrega un bus extra; sin embargo, un problema con este modelo es dividir la rama de magnetización.

Teóricamente, un transformador de dos devanados puede considerarse como una red de dos puertos. En el Apéndice C se describen el análisis de red de dos puertos y la derivación de un modelo π a partir de un modelo T. A efectos de simplificación, un circuito equivalente de transformador transferido al lado de alta tensión, como se muestra en la figura 1-12, se considera una red de dos puertos. Suponiendo que la impedancia en serie no supere el 7 % y la corriente de magnetización no supere el 3 %, los parámetros de magnetización medidos se pueden duplicar para construir las ramas de magnetización del modelo π . Sin embargo, la impedancia en serie del modelo π se puede obtener a partir de pérdidas de carga, como se describió anteriormente. La Figura 1-13 muestra el modelo π del transformador y la red equivalente de dos puertos.

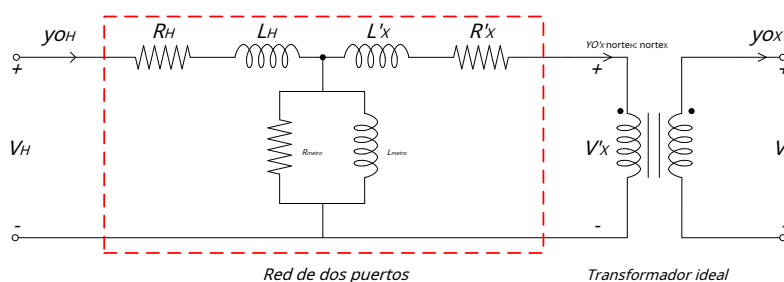


Figura 1-12- Transformador modelo T como red de dos puertos

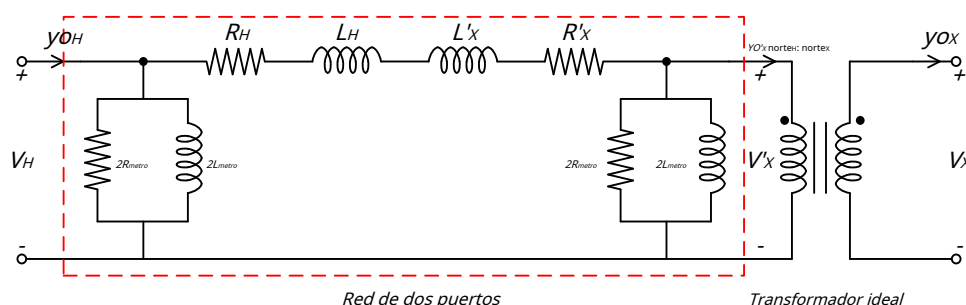


Figura 1-13- Transformador modelo π como red de dos puertos

1.7 Supuestos, Términos y Designaciones

Los siguientes supuestos se han aplicado al preparar esta guía, a menos que se indique lo contrario:

- Hay rotación de fase de secuencia positiva y todos los diagramas de configuración se construyeron sobre la rotación de fase de secuencia positiva.
- Se ha hecho un intento de analizar las conexiones internas al transformador, y se describe lo que ocurre detrás del aislador que no es modificable por el usuario final. Sin embargo, los diagramas pueden representar conexiones de fase externa y su cambio. Los diagramas de conexión generalmente muestran el devanado de alto voltaje arriba y el devanado de bajo voltaje debajo. Por lo tanto, la dirección de los voltajes inducidos en cada conjunto de devanados está en la parte superior de los devanados, como se indica con un punto en negrita en cada devanado en la figura 1-14.
- No hay diferencia entre los devanados en un juego de devanados. Sin embargo, en la práctica, el acoplamiento magnético entre los devanados en un conjunto de devanados depende de los parámetros físicos, como la posición en el núcleo magnético, pero en esta consideración es muy difícil tener eso en cuenta. También está fuera del alcance de esta guía de modelado.

- La prueba de pérdidas de carga o cortocircuito se realiza desde el lado de alta tensión, lo que significa que el lado de baja tensión y alta corriente está cortocircuitado.
- La prueba de circuito abierto se realiza desde el lado de bajo voltaje, lo que significa que el transformador está excitado por bajo voltaje y el lado de alto voltaje se deja abierto.

Las conexiones de bobinado en esta guía se designan de la siguiente manera:

- | | |
|----------------------------|-------------------------|
| - Alto voltaje: | siempre mayúsculas |
| - Neutro sacado a relucir: | norte |
| - Delta: | D |
| - Estrella: | Y |
| - Zigzag: | Z |
| - Baja tensión: | siempre letras pequeñas |
| - Neutro sacado a relucir: | norte |
| - Delta: | d |
| - Estrella: | y |
| - Zigzag: | z |

Esta guía describe los transformadores que se usan en la red de América del Norte y, en particular, los transformadores que se usan en la red de Alberta, por lo que generalmente se usarán las fases A, B y C y los nombres de bushing H y X.

Devanado: en esta guía, un "devanado" denota una sola bobina continua de alambre en una pierna de un solo núcleo; un "conjunto de devanados" denota el conjunto de tres devanados que constituyen las tres fases en un transformador trifásico, cada uno en diferentes patas de núcleo con una terminal a un nivel de voltaje (por ejemplo, H1, H2 y H3); y un "conjunto de fase" se refiere a los dos o más devanados que se encuentran en la misma rama del núcleo, como se muestra en la Figura 1-14. Los devanados en las figuras del transformador reciben los términos W1-W9. Se supone que los conjuntos de devanados asociados con los diversos niveles de tensión, cada uno en un ramal de núcleo diferente, son los siguientes:

- Juego de bobinado 1: W1, W2 y W3
- Juego de devanados 2: W4, W5 y W6
- Juego de devanados 3: W7, W8 y W9 (visto en transformadores de tres devanados y en zigzag).

En los transformadores de cuatro devanados, los devanados reciben los términos adecuados en consecuencia.

Eventualmente, los devanados que comparten un núcleo común son los siguientes:

- Etapa principal 1: W1, W4, W7 y W10
- Etapa principal 2: W2, W5, W8 y W11
- Etapa principal 3: W3, W6, W9 y W12

Es difícil clasificar los términos de los devanados en zigzag entre tres patas de núcleo porque se conectan entre sí. Por lo general, no importa a qué devanado se le asigna qué número, pero es importante cuando el segundo conjunto de devanados está conectado a los diversos casquillos porque esta operación cambia los ángulos de fase en secuencias positivas y negativas a lo largo del transformador.

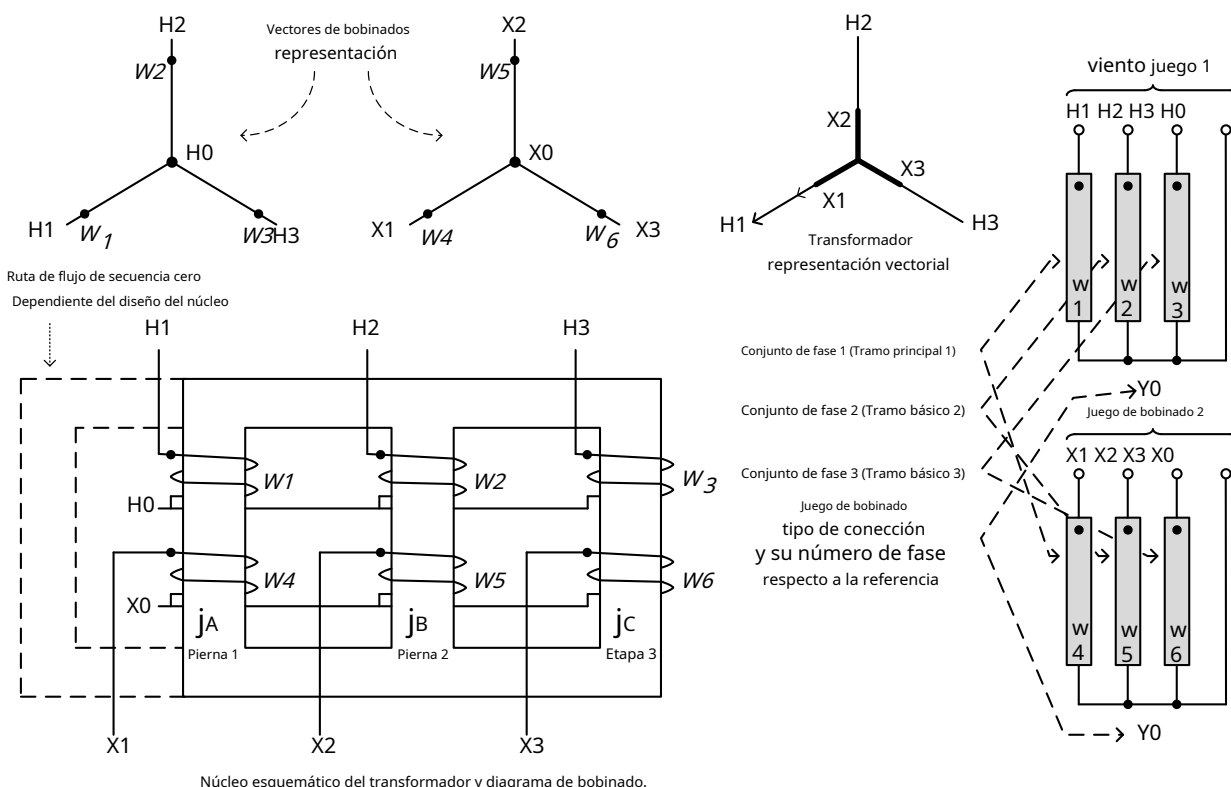
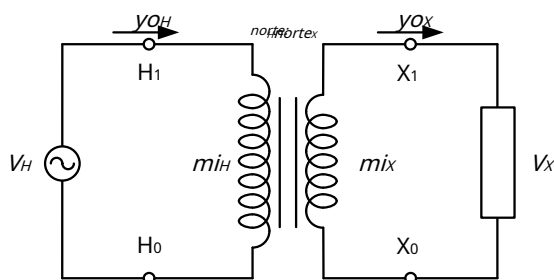


Figura 1-14- Representación básica del transformador

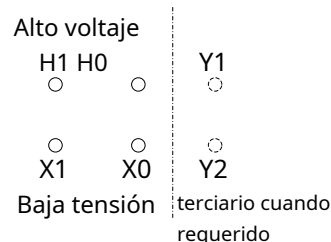
1.8 Transformadores Monofásicos

La estructura física de un transformador monofásico es más simple que la de un transformador trifásico. Un transformador monofásico es un devanado primario y un devanado secundario enrollados alrededor del mismo núcleo magnético (tipo carcasa) o alrededor de dos patas de un núcleo magnético tipo núcleo (tipo núcleo). Se pueden utilizar en circuitos monofásicos o en sistemas trifásicos como un conjunto de tres transformadores en los que el conjunto de devanados primario y secundario de cada fase se enrolla alrededor de patas de núcleo separadas. El devanado primario de un transformador monofásico se puede conectar entre un conductor de fase y tierra o entre dos conductores de fase de un sistema de ca. Un transformador monofásico puede tener dos devanados, tres devanados o más de tres devanados, como lo hacen los transformadores trifásicos. La figura 1-15 muestra un aislador de terminación de un transformador monofásico.

De acuerdo con la operación simétrica de los sistemas de potencia, los transformadores monofásicos deben usarse en los puntos finales de una red de distribución como transformadores de distribución. En los sistemas de transmisión de alta potencia, se utilizan tres transformadores monofásicos como un conjunto para hacer transformadores de estación trifásicos.



a) Diagrama eléctrico



b) Terminación de buje

Figura 1-15- Terminación del bushing del transformador monofásico

1.9 Transformadores Trifásicos

Los transformadores utilizados en los sistemas trifásicos suelen ser transformadores trifásicos con los devanados en un núcleo magnético de tres patas. Se puede utilizar un banco de tres transformadores monofásicos en lugar de un solo transformador trifásico; sin embargo, un transformador trifásico tiene una serie de ventajas importantes en comparación con tres unidades monofásicas: es más eficiente, más liviano, más pequeño y menos costoso. Un transformador trifásico requiere menos espacio en el piso y tiene significativamente menos cableado externo. Sin embargo, un banco de tres transformadores monofásicos ofrece la ventaja de la flexibilidad: si hay una carga desequilibrada durante un largo período de tiempo, uno o más transformadores en el banco pueden ser reemplazados por un transformador con una clasificación de kVA mayor o menor. Un transformador monofásico que funciona mal en un banco de tres transformadores se puede reemplazar fácilmente; pero todo el transformador trifásico de núcleo común tendría que ser reemplazado en caso de mal funcionamiento. Sin embargo, excepto en casos especiales como el extremo superior del rango de tamaño, el uso de tres transformadores monofásicos no es común, y la mayoría de los transformadores de potencia trifásicos son trifásicos con devanados en un solo núcleo de múltiples patas.

Los transformadores trifásicos se clasifican en dos tipos según su configuración de devanado/núcleo: tipo de carcasa y tipo de núcleo. La mayoría de los grandes fabricantes de transformadores fabrican transformadores tipo núcleo. En un transformador tipo carcasa, la ruta de retorno de flujo del núcleo está cerrada fuera de los devanados y su circuito magnético es muy similar a tres transformadores monofásicos. En un transformador tipo núcleo, las tres primeras patas están rodeadas concéntricamente por los devanados de las tres fases. La Figura 1-16 muestra la estructura de bobinado de diferentes tipos de transformadores trifásicos. Como se muestra en la figura, un transformador tipo núcleo puede tener tres, cuatro o cinco patas. En esta guía, el término transformador trifásico se aplica solo a un transformador tipo núcleo de tres patas porque ese es el tipo más utilizado en los sistemas de potencia por razones económicas.

En un transformador trifásico del tipo de núcleo de tres patas, el circuito magnético de cada fase está conectado entre sí porque el flujo de una fase debe regresar a través de las otras dos fases. Por lo tanto, en la condición de operación normal, se espera que el flujo magnético instantáneo total en cada sección del núcleo debido a la corriente de excitación fundamental sea cero.

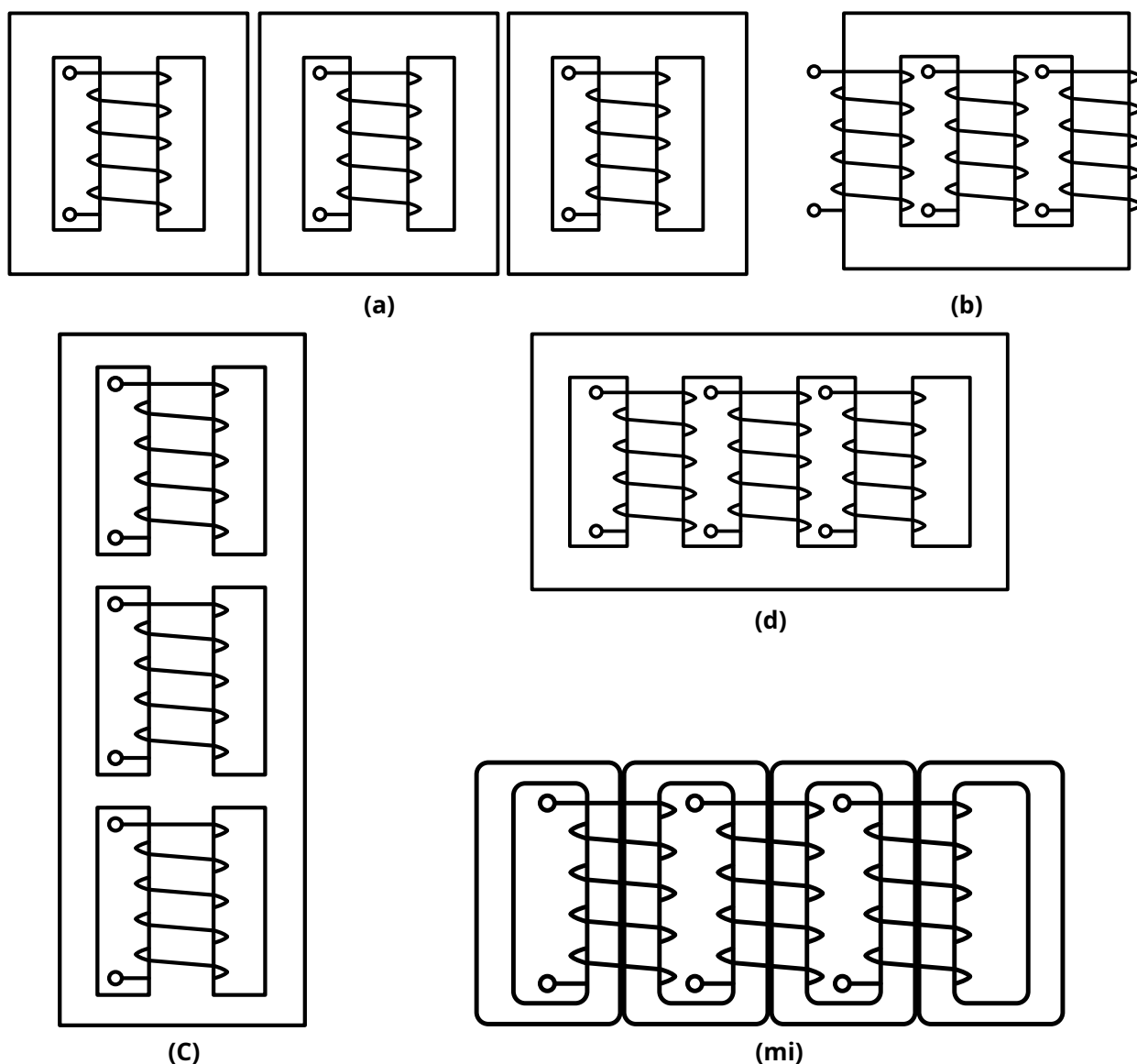


Figura 1-16- Estructuras esquemáticas de devanados de transformadores trifásicos: a) Banco de tres núcleos monofásicos o triples, b) Núcleo apilado de tres patas, c) Núcleo coraza, d) Núcleo de cinco patas núcleo apilado, y e) núcleo enrollado de cinco patas

La Figura 1-17 muestra diferentes terminaciones y la nomenclatura de transformadores trifásicos simples utilizados en normas, estudios, documentos de venta, libros y papeles.

	Fases y Bushing nombres	Transformador de fasores	Terminología de bobinado
CEI 60076-1	Alto voltaje H0 tu V W ○ ○ ○ ○ X0 tu v w ○ ○ ○ ○ Baja tensión	tu/tu Referencia Ángulo w/w v/v	yo Yo tercero (yo) (yo) (i) (ii) (ii) (ii)
IEEE C57.12.10	Alto voltaje H0 H1 H2 H3 ○ ○ ○ ○ X0 X1 X2 X3 ○ ○ ○ ○ Baja tensión	H2/X2 Referencia Ángulo H1/X1 H3/X3	H1 H2 H3

Figura 1-17- Terminaciones y nomenclatura de transformadores monofásicos trifásicos

Que el devanado trifásico esté o no conectado a tierra depende de la aplicación; no importa qué tipo de estructura magnética tenga un transformador. Los transformadores diseñados para conectarse a tierra en el extremo neutro del primario generalmente tienen solo un buje neutral para conectarse a la tierra del sistema. Esta conexión debe estar siempre cerrada. Si el extremo neutro del devanado primario siempre está conectado a tierra, es posible graduar el aislamiento de alto voltaje y tener menos aislamiento en el extremo neutro del devanado. La designación de voltaje primario en la placa de identificación de un transformador de aislamiento graduado incluirá las letras "GRDY" como en "12470 GRDY/7200", lo que indica que debe estar conectado de fase a tierra en un sistema en estrella con conexión a tierra.

1.9.1 Configuraciones de devanados trifásicos

La mayoría de los transformadores de potencia trifásicos tienen una conexión de devanado en estrella y/o triángulo; sin embargo, ocasionalmente se usa una conexión en zigzag en situaciones en las que se requiere una alta impedancia de secuencia cero. Dentro de estas tres configuraciones, la configuración de devanado trifásico se puede crear de varias maneras, pero normalmente en la práctica solo se dan unas pocas versiones de cada método.

Un autotransformador tiene una configuración de bobinado que es diferente de las tres configuraciones ya discutidas. Se describe por separado.

1.9.2 Desplazamiento de fase angular en transformadores trifásicos

El desplazamiento angular en transformadores trifásicos se define como el ángulo de fase en grados entre el voltaje de línea a neutro del terminal de alto voltaje identificado como referencia y el voltaje de línea a neutro del terminal de bajo voltaje identificado correspondiente. El ángulo es positivo cuando el terminal de bajo voltaje está retrasado con respecto al terminal de alto voltaje. La convención para el sentido de giro de los fasores de tensión en los transformadores es siempre en sentido contrario a las agujas del reloj. El indicador de "reloj" de 12 horas se utiliza para indicar el ángulo de desplazamiento de fase, y cada hora representa 30°. El minuterero

está ajustado a las 8 en punto (en lugar de las 12 en punto según las normas IEC). Reemplaza el voltaje de línea a neutro del devanado de alto voltaje como referencia. Esta posición es siempre el punto de referencia que se muestra, como se puede ver en la Figura 1-17. Debido a que la rotación es en sentido contrario a las agujas del reloj, 9 = 30° de atraso (la baja tensión se atrasa de la alta tensión en 30°) y 7=330° de atraso o 30° de adelanto (la baja tensión se adelanta a la alta tensión en 30°). Según la norma IEC 1 = 30°, 2= 60°, 3 = 90°, 5 = 150°, 6 = 180°, 11 = 330° y 12 = 0° o 360° [IEC 600-71].

1.9.3 Configuración de bobinado en estrella

En la conexión Y, los extremos de bajo voltaje de los tres devanados están conectados a un punto común, que puede o no estar conectado a tierra. La corriente de línea fluye directamente al devanado. Independientemente del tipo de configuración de los otros devanados, si hay una carga equilibrada del transformador, no fluirá corriente a tierra desde el punto común, incluso si este punto está conectado a tierra. En la práctica, existen seis formas de interconectar un juego de devanados y los bushings de un transformador, como se muestra en la Figura 1-18, que también muestra el diagrama vectorial de cada interconexión. Como se mencionó, no importa qué término se dé al devanado específico; sin embargo, para conocer la secuencia de fase positiva de un juego de devanados a otro a través del transformador, es necesario saber qué núcleo de devanado está conectado a qué casquillo.

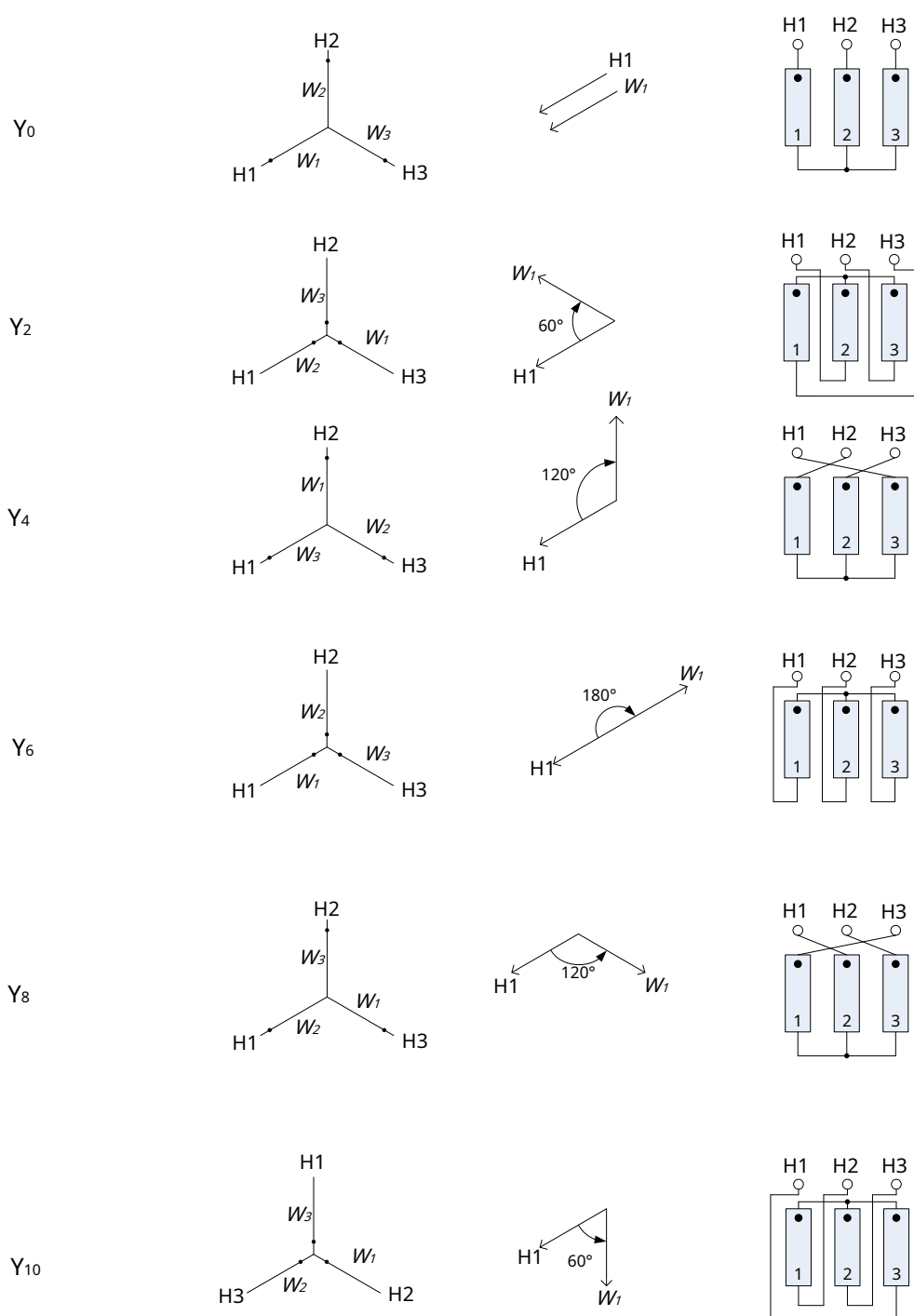


Figura 1-18- Seis formas de conectar un devanado en estrella

Hay una desventaja en poner a tierra el punto neutro de una conexión en Y en los transformadores. El punto neutro conectado a tierra en el transformador sirve como ruta de retorno para la corriente cuando una de las líneas o las tres líneas en el lado de la conexión en Y se cortocircuitan a tierra. Estas corrientes de falla son altas y, si no se eliminan en una fracción de segundo, pueden crear una falla significativa.

perturbación del sistema. Las corrientes de falla a tierra tienen un alto componente de tercer armónico que puede interrumpir las redes de telecomunicaciones locales y puede causar la transmisión de pilotos en el sistema de energía.

1.9.4 Configuración del devanado delta

En la práctica, existen dos formas diferentes de interconectar un devanado delta a los bushings del transformador: con un vector de D1 o con un vector de D11, como se muestra en la Figura 1-19. Son posibles otros cuatro arreglos, pero implican la rotación de las fases y, por lo tanto, rara vez se usan.

La conexión delta ofrece baja impedancia a los terceros armónicos y atrapa la corriente de falla a tierra en el delta. Si ocurre una falla a tierra en el lado del transformador conectado en delta, la corriente de falla será más baja (y matemáticamente será cero) porque no hay una ruta de retorno para que la corriente complete el circuito en ese transformador. En tal caso, los dispositivos de protección pueden no funcionar debido a la corriente más baja de lo previsto. Otro problema en el lado del transformador conectado en delta durante una falla a tierra desequilibrada es el problema del cambio de voltaje. Según el tipo de falla y la ubicación, el voltaje en las fases sin falla puede cambiar y exceder el voltaje nominal máximo durante la falla. Estas son dos razones por las que se requiere conectar a tierra al menos un lado del transformador en el sistema.

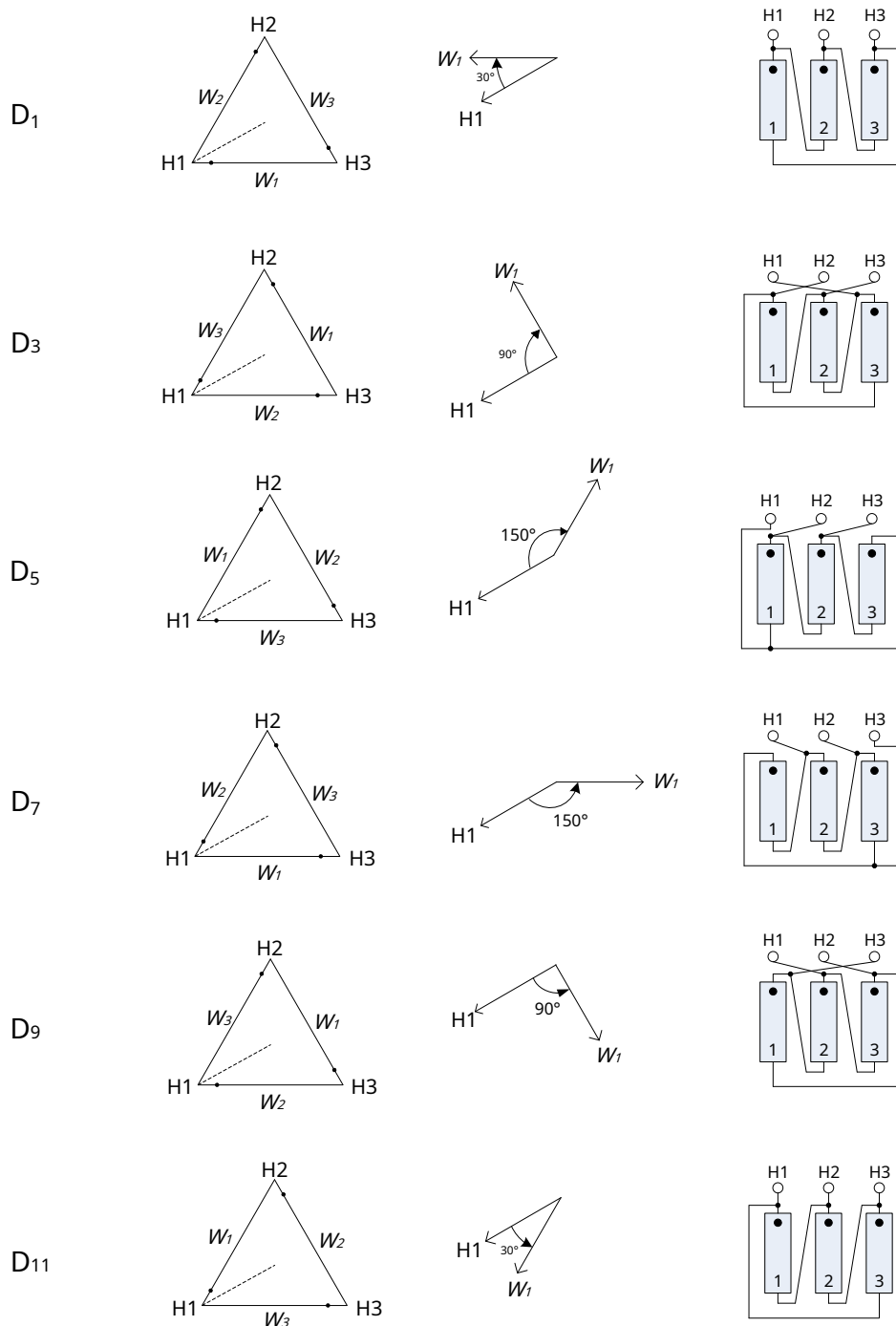


Figura 1-19- Seis formas de conectar un devanado delta

1.9.5 Configuraciones de bobinado en zigzag (estrella interconectada)

Una conexión en zigzag (conexión en estrella interconectada) tiene algunas de las características de las conexiones en estrella y delta y combina las ventajas de ambas. No se usa comúnmente donde estas características y ventajas no son necesarias. En una conexión en zigzag en un lado de un transformador, cada devanado de fase tiene dos secciones iguales de devanado conectadas en serie en dos patas de núcleo. De manera similar a como se usa en un autotransformador, los devanados de menor nivel de voltaje se conectan en estrella, $+30^\circ$ o -30° . Estos arreglos se muestran en la Figura 1-20.

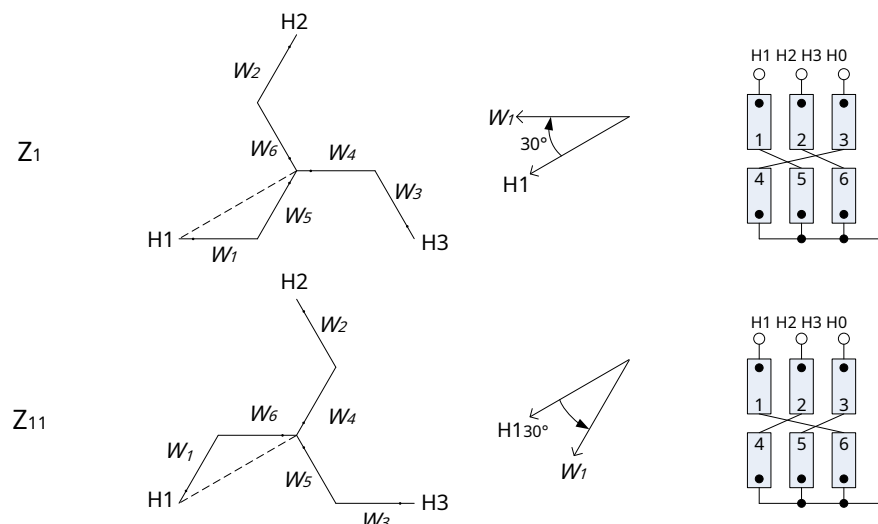


Figura 1-20- Dos conexiones prácticas en zigzag de cuatro configuraciones posibles

1.9.6 Configuraciones del devanado del autotransformador

Los autotransformadores se utilizan exclusivamente para interconectar sistemas de alta tensión. Es económicamente ventajoso compartir la sección común del devanado de alto voltaje con el devanado de bajo voltaje. Un autotransformador tiene devanados comunes entre las terminales de baja tensión y el neutro, y devanados en serie entre las terminales de baja tensión y las correspondientes terminales de alta tensión. Como se muestra en la Figura 1-21, cada devanado tiene dos extremos y una terminal en el medio del devanado que sirve como terminal de derivación. Los autotransformadores trifásicos están conectados en Y, aunque a veces se proporciona un devanado terciario conectado en triángulo. El terciario puede tener sus terminales sacados para alimentar carga local, o puede estar "enterrado" y no tener conexiones externas. Por lo tanto, el sistema al que se conectan los autotransformadores debe estar (generalmente sólidamente) conectado a tierra. gira en el

devanado primario y vuelta en el devanado secundario como se muestra en la Figura 1-21.

El devanado de un autotransformador se conecta de una sola manera. No hay cambio de fase en el autotransformador entre las conexiones de bobinado de alto y bajo voltaje. Cualquier cambio de fase en el devanado terciario es el mismo que el de un transformador estrella/triángulo.

1.10 Circuito equivalente de autotransformadores

Un autotransformador es más pequeño que un transformador de las mismas características. Su tamaño de núcleo se determina utilizando la posición de derivación de relación más grande, de la siguiente manera:

Un autotransformador tiene pérdidas de hierro más pequeñas que un transformador convencional y tiene menos pérdidas de cobre porque el devanado común solo transporta la diferencia entre los devanados de bajo y alto voltaje. Cuanto más cerca estén los voltajes de los devanados de bajo y alto voltaje, mayor será la ventaja de usar un autotransformador. En la práctica, esta relación es de aproximadamente 2.

El modelo de circuito del autotransformador de dos devanados de la figura 1-22 se puede presentar usando devanados separados. Si no se tiene en cuenta la corriente de magnetización, la ecuación de transformación se puede dar como:

En los autotransformadores se suele utilizar una relación denominada co-relación. Se define como:

Las ecuaciones de voltaje del lado primario y secundario se pueden escribir como, respectivamente:

Multiplicando la ecuación anterior por $\frac{1}{a}$ y sustituyendo en otras dos ecuaciones da:

$$\frac{V_H}{a} = \frac{I_H}{a} Z_1 + \frac{I_H}{a} Z_2$$

Estas ecuaciones muestran que la impedancia de fuga de un autotransformador es similar a la impedancia de fuga de un transformador regular de dos devanados con los mismos devanados no autoconectados. Por lo tanto, en un autotransformador, la resistencia y la reactancia en serie equivalentes son:

$$R_{eq} = R_1 + R_2$$

$$X_{eq} = X_1 + X_2$$

Para modelar los parámetros en el lado secundario se puede encontrar que:

$$\frac{V_H}{a} = \frac{I_H}{a} Z_1 + \frac{I_H}{a} Z_2$$

y consecuentemente:

$$\frac{V_H}{a} = \frac{I_H}{a} Z_1 + \frac{I_H}{a} Z_2$$

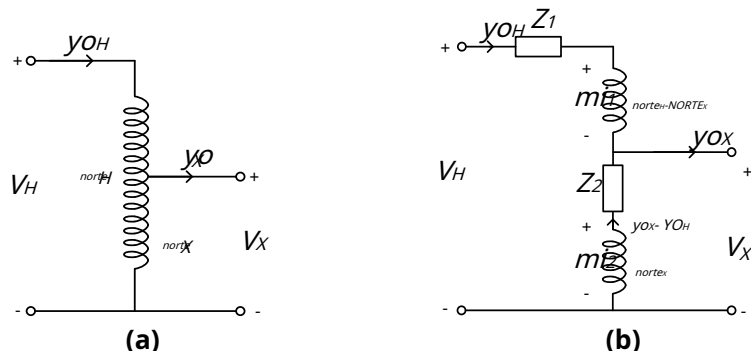


Figura 1-22- Autotransformador de dos devanados: a) El diagrama esquemático, b) El modelo del circuito basado en un modelo de circuito de devanados separados

Para completar, ahora se puede tener en cuenta la rama de magnetización. Por lo tanto, el circuito equivalente del autotransformador se puede mostrar como en la Figura 1-7, en la que los parámetros

son los propuestos en las ecuaciones anteriores. Este modelo es válido tanto para autotransformadores elevadores como reductores. De manera similar a la utilizada con los otros tipos de transformadores, la impedancia de fuga del autotransformador se puede obtener mediante mediciones de prueba con el terminal de baja tensión en cortocircuito [10]. Los parámetros de la rama de magnetización también se pueden determinar a través de una prueba sin carga. El procedimiento para determinar los parámetros del circuito equivalente para un autotransformador es el mismo que para un transformador regular. En una conexión de autotransformador, la impedancia de cortocircuito es menor que la de un transformador regular con especificaciones similares, lo que a veces se considera una desventaja de la conexión de autotransformador.

1.11 Transformadores de devanados múltiples

1.11.1 Doble Transformador Secundario [3]

Un transformador secundario doble es un tipo especial de transformador que a veces se usa para transformadores de generadores en aplicaciones en las que cada devanado de bajo voltaje recibe suministro de un generador. Cuando se diseña un transformador secundario doble, es necesario que ambos devanados de baja tensión estén dispuestos simétricamente con respecto al devanado de alta tensión, de modo que ambos tengan impedancias idénticas a las del devanado de alta tensión. Esto se puede hacer con cualquiera de los arreglos que se muestran en la Figura 1-23. En la Figura 1-23-a hay un cruce entre los dos devanados de bajo voltaje a la mitad de la rama. En la práctica, se usaría el arreglo que se muestra en la Figura 1-23-b (una conexión "Jones").

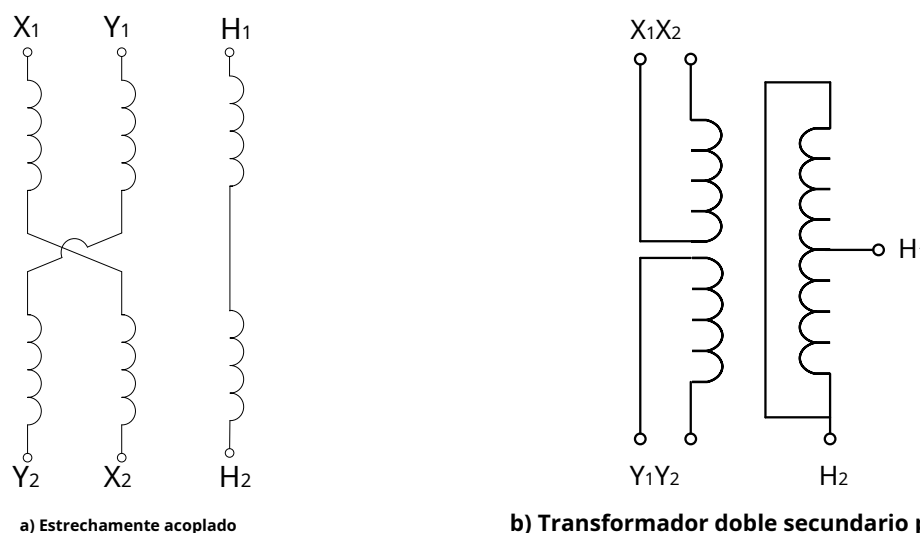


Figura 1-23- Arreglos de devanados de transformador doble-secundario

1.11.2 Transformador de tres devanados

Otro tipo de transformador es el transformador de tres devanados, que es un subconjunto de los transformadores de devanados múltiples. Además de los devanados primario y secundario habituales, se agrega un tercer devanado (devanado terciario) a cada fase. Tener tres devanados puede servir para varios propósitos:

- Tres devanados permiten la conexión de tres sistemas con diferentes voltajes de operación.
- Tres devanados proporcionan aislamiento eléctrico entre circuitos de entrada doble o circuitos de salida doble que tienen el mismo voltaje de funcionamiento.
- Si el tercer devanado está conectado en delta, esto puede estabilizar los voltajes, suministrar corrientes de tercer armónico para magnetizar el núcleo del transformador, filtrar los terceros armónicos del sistema y proporcionar una acción de banco de puesta a tierra cuando los devanados primario y secundario están conectados en estrella. En la práctica, este tercer devanado se denomina devanado terciario. Hará circular corrientes de tercer armónico. Esta disposición se utiliza en muchos transformadores, incluidos los autotransformadores en los que el devanado de alto voltaje y el devanado de bajo voltaje están conectados en estrella y el terciario está conectado en delta.

Las etiquetas estándar para los bushings del tercer devanado en un transformador monofásico son Y1 e Y2, y en un transformador trifásico son (Y0), Y1, Y2 e Y3, como se muestra en la Figura 1-24.

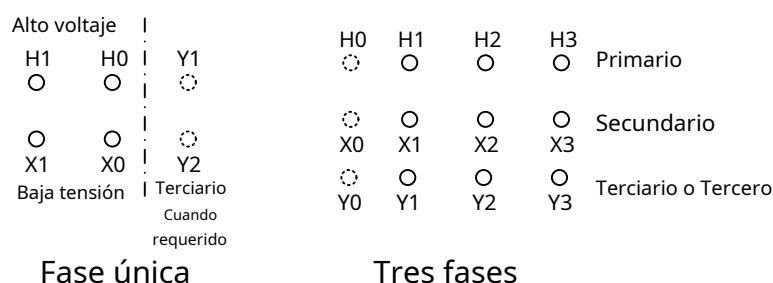


Figura 1-24- Tercer devanado (terciario) con terminales sacados a bushings

El tercer devanado puede cumplir varias funciones al mismo tiempo. Ayuda a estabilizar los voltajes primario y secundario, proporciona una acción de banco de puesta a tierra para proteger parcialmente el circuito primario de las corrientes de tierra secundarias y suministra voltaje a los otros componentes o transformadores. Por ejemplo, un devanado terciario conectado en delta de 13,8 kV cumple estas funciones y puede suministrar voltaje al transformador auxiliar de servicio de la estación.

A veces, el devanado terciario conectado en delta no se requiere para una carga externa y solo está destinado a interactuar magnéticamente con los devanados primario y secundario; por lo tanto, no tendrá conexiones de terminales externas. En tales casos, el devanado terciario se denomina terciario "empotrado" o "enterrado". A veces, una esquina se saca y se conecta a tierra internamente para garantizar que el voltaje de referencia del devanado no se desvíe.

El circuito equivalente de secuencia positiva de un transformador con un devanado conectado en delta enterrado generalmente se deriva sin considerar el devanado conectado en delta. Incluso si se ha modelado ese devanado, no se tiene en cuenta porque no hay carga sobre él. En secuencia cero, la impedancia en serie del devanado conectado en delta aparece en paralelo con la rama de magnetización del transformador. Por lo tanto, un devanado delta enterrado en el transformador no cambia la configuración del circuito equivalente de secuencia cero del transformador que no tiene un devanado enterrado. Normalmente, el informe de prueba de un transformador con un devanado conectado en delta enterrado

no incluye ningún resultado de prueba de pérdida de carga para este devanado. Sin embargo, un fabricante podría probar este devanado antes de cerrar el tanque pero no informarlo en el informe de prueba resumido emitido en el transformador. Por ejemplo, el informe de prueba de un transformador conectado en YY con un devanado terciario enterrado incluiría los resultados de la prueba de pérdidas de carga de los devanados primario y secundario y los parámetros del circuito equivalente de secuencia cero del transformador conectado en YY.

1.12 Cambiadores de tomas

La función principal de un transformador es convertir la energía eléctrica de un nivel de voltaje a otro nivel de voltaje. En la práctica, los transformadores de potencia, en los sistemas de potencia, con capacidades de cambiador de tomas se utilizan para controlar el voltaje, el ángulo de fase o ambos en un circuito regulado. Para cada transformador instalado en una red, existe una relación de tensión ideal (óptima) para un funcionamiento óptimo del sistema. En la práctica, esta relación óptima de voltaje varía según las condiciones de operación de la red total. Para que los sistemas de potencia funcionen satisfactoriamente, las relaciones de voltaje del transformador deben ser ajustables (esto se puede lograr interrumpiendo o no el flujo de energía durante el ajuste). Un cambiador de tomas realiza esta función en un transformador. El cambiador de tomas puede estar en carga o fuera de circuito.

1.12.1 Interruptor fuera de circuito o cambiador de tomas desenergizado (DETC)

Como su nombre lo indica, este tipo de cambiador de tomas solo se puede operar con el transformador desconectado de la red. Tiene un rango de operación limitado, comúnmente proporciona un rango de $\pm 2,5$ a $\pm 5,0$ %.

Los interruptores sin circuito se utilizan a menudo en transformadores que tienen un cambiador de tomas en carga. El uso de ambos aumenta significativamente el tamaño y el costo del transformador.

La posición de toma en este cambiador de tomas tipo DETC se cambia con poca frecuencia. Es esencial que el interruptor solo se opere cuando el transformador esté completamente desconectado del sistema. Si hay algún voltaje de alimentación entre las derivaciones, intentar operar el interruptor probablemente resultará en un cortocircuito trifásico en el interruptor y la destrucción del transformador.

1.12.2 Cambiador de tomas en carga

Un cambiador de tomas bajo carga capaz de cambiar la relación de vueltas de un transformador mientras está en línea se denomina cambiador de tomas bajo carga (LTC) o cambiador de tomas bajo carga (OLTC). Hay dos tipos básicos de LTC, "Reactor" y "Resistencia".

- Cambiador de tomas LTC tipo reactor: en un cambiador de tomas tipo reactor hay un pequeño autotransformador de punto medio (MPA) en cada fase. Antes de cambiar la toma, los dos extremos del MPA se conectan a las posiciones de bobinado de la toma y el punto medio se conecta a la posición "S" como en la Figura 1-25. Durante el cambio de grifo, uno de los extremos del MPA se abre y luego se conecta al siguiente grifo en secuencia. En esta etapa, la posición "S" tendrá un voltaje a mitad de camino entre las dos posiciones de derivación, y fluirá una corriente controlada entre las dos derivaciones. El otro extremo del MPA se abre y luego también se conecta al siguiente grifo. Esto completa la secuencia de pulsaciones, que tarda una fracción de segundo.

- Cambiador de tomas LTC tipo resistencia: La secuencia del cambiador de tomas tipo resistencia es similar a la del tipo reactor, excepto que se utilizan dos resistencias para controlar la corriente circulante que fluirá entre las dos tomas. La secuencia de toque es más rápida que la del tipo de reactor.

Debido a la inductancia inherente al MPA, los contactos del cambiador de tomas tipo reactor tienden a desgastarse más rápidamente.

La Figura 1-25 muestra el circuito esquemático de un cambiador de tomas tipo LTC. El cambiador de tomas tipo LTC debe seguir una secuencia de conmutación especial de "hacer antes de romper". No debe crear un cortocircuito entre dos derivaciones cualesquiera del devanado en ningún momento. El uso y la ubicación de los devanados de derivación varían según la aplicación y entre los fabricantes. Dado que los parámetros del modelo del transformador dependen de la posición de la toma, es necesario que el modelador del transformador sepa cómo afecta la posición de la toma a los parámetros. Por lo tanto, un cambiador de tomas de transformador se explica brevemente en el Apéndice B. Para obtener más información, consulte [13]. El examen de las técnicas del cambiador de tomas está más allá del alcance de esta guía debido a la cantidad de detalles requeridos.

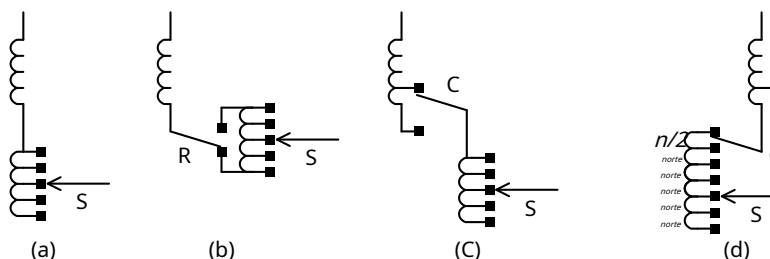


Figura 1-25- Diagramas esquemáticos de cambiadores de tomas tipo LTC: a) Lineal, b) Inversor, c) Corse/Fine, d) Lineal, extremo neutro

La placa de identificación del transformador contendrá el esquema del devanado del transformador y los diagramas de conexión del cambiador de tomas. La Figura 1-26 muestra un ejemplo del esquema de devanado y diagrama de conexión de un transformador que tiene un cambiador de tomas tipo DETC en el lado de 138 kV.

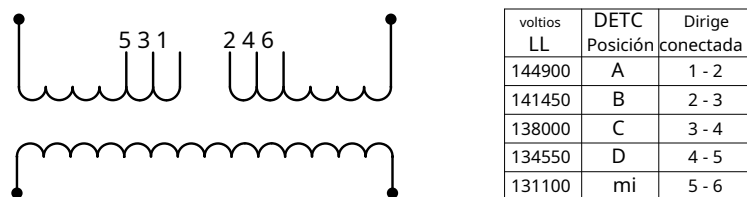


Figura 1-26- Esquema típico de devanado y diagrama de conexión

La Figura 1-27 muestra el mismo transformador con la adición de un cambiador de tomas tipo LTC en el lado de baja tensión. También muestra un esquema de muestra en el que se usa un transformador auxiliar entre el devanado principal y el LTC para limitar la corriente a través del LTC.

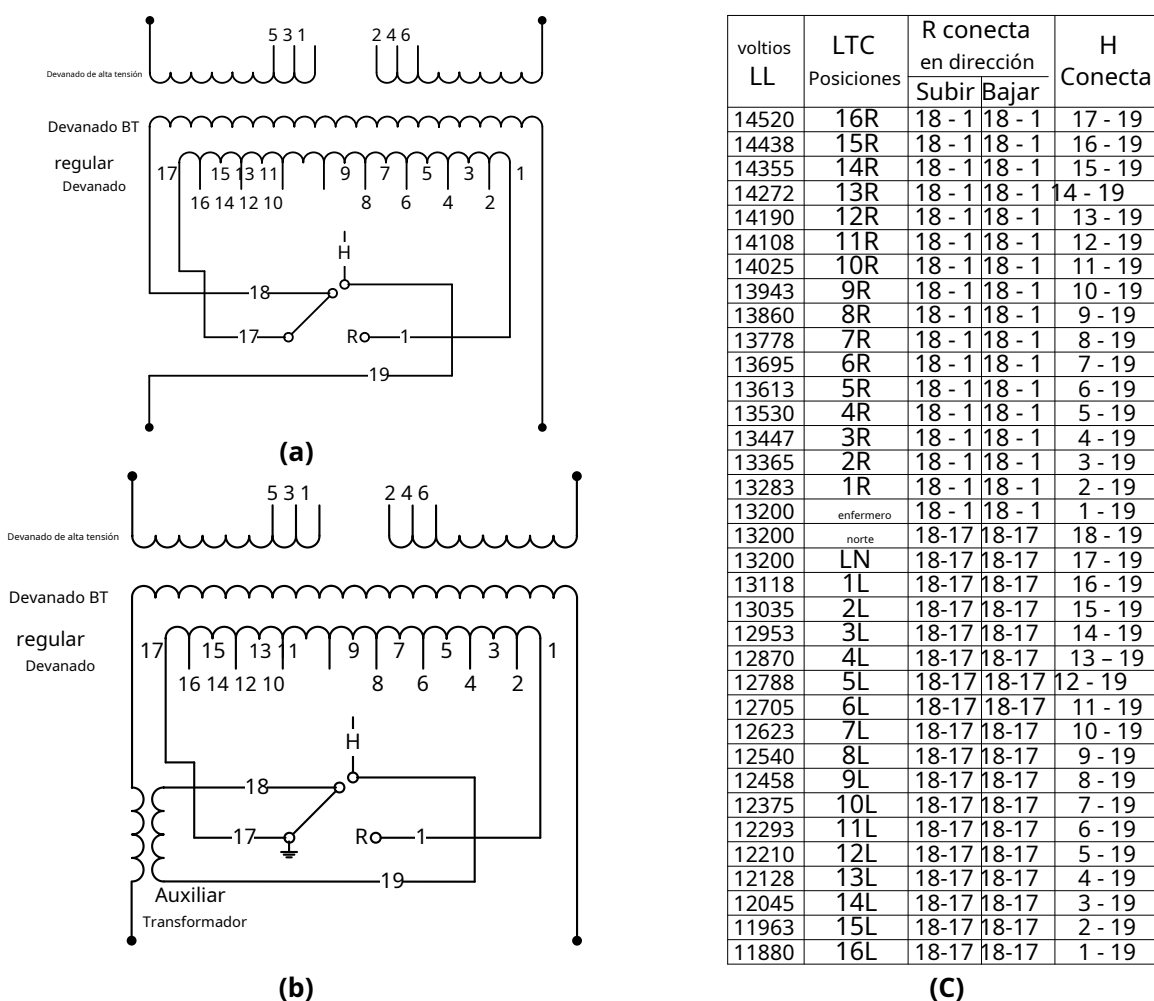


Figura 1-27- Diagrama esquemático de un cambiador de tomas obtenido de la placa de identificación de un transformador: a) Cambiador de tomas tipo LTC en el lado de baja tensión sin transformador auxiliar, b) Con transformador auxiliar transformador, c) Tensiones de derivación

Los autotransformadores con cambiadores de tomas presentan desafíos especiales para los diseñadores de transformadores. Hay tres formas de conectar un cambiador de tomas en un autotransformador sin usar un transformador auxiliar; estos se muestran en la Figura 1-28 [10].

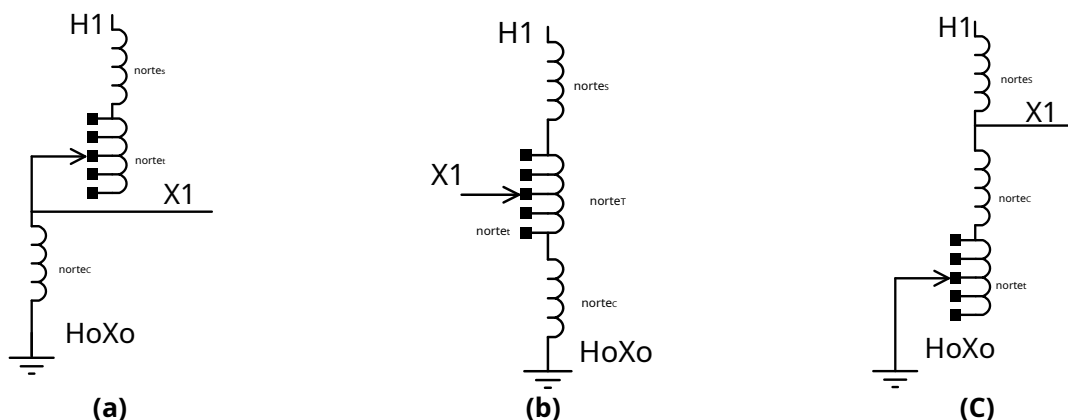


Figura 1-28- Conexión del cambiador de tomas en un autotransformador sin transformador auxiliar: a) Extremo de línea, con variación AT, b) Extremo de línea, con variación BT, c) Extremo neutro

La conexión de la Figura 1-28-a se usa cuando el alto voltaje del transformador variará mientras el bajo voltaje es constante. El flujo en el núcleo es constante. El voltaje en la terminal de alto voltaje varía linealmente con el número de vueltas totales como se expresa en la siguiente ecuación. En este caso, el cambiador de tomas y el devanado de tomas deben estar clasificados para el nivel de voltaje de la terminal de bajo voltaje más el voltaje en la sección con derivación a la corriente del devanado de alto voltaje.

— —

La conexión que se muestra en la Figura 1-28-b se usa cuando el bajo voltaje del transformador variará mientras que el alto voltaje se mantendrá constante. En este caso, el flujo en el núcleo es constante, como en el caso anterior. El voltaje en la terminal de bajo voltaje varía linealmente con el número de vueltas totales como se expresa en la siguiente ecuación. En este caso, el cambiador de tomas y el devanado de tomas deben estar clasificados para el nivel de voltaje de la terminal de bajo voltaje más el voltaje en la sección con derivación a la corriente del devanado de bajo voltaje.

— —

Con ambas conexiones, se debe tener especial cuidado en la etapa de diseño porque el devanado de derivación está directamente expuesto a cualquier sobrevoltaje que llegue a través de la terminal de bajo voltaje. Además, en un autotransformador trifásico, el cambiador de tomas debe tener un nivel de aislamiento completo entre fases. Sin embargo, los voltios por vuelta son constantes en ambos casos, pero el cambiador de tomas y el devanado no transportan la corriente mínima que fluye en el devanado común del transformador. En la práctica, el cambiador de tomas tipo Jansen se utiliza para transformadores en los que la baja tensión es superior a 138 kV [10] (Ver Apéndice B).

Los transformadores trifásicos con un cambiador de tomas conectado en estrella en el punto neutro se benefician del uso de un cambiador de tomas de bajo nivel de aislamiento. Para un transformador monofásico se puede utilizar la conexión que se muestra en la Figura 1-28-c. Sin embargo, si el lado de alta tensión del transformador es de tensión fija

a medida que se varía la posición de toma, el voltio por vuelta, y por lo tanto el flujo en el núcleo, será variable. Como se mencionó, este tipo de conexión tiene la desventaja de que el voltaje de cualquier devanado terciario variará. Sin embargo, hay un costo para obtener los beneficios. En este tipo de conexión la baja tensión puede variar y la alta tensión puede mantenerse constante y viceversa. Se pueden ajustar mediante la siguiente ecuación:

— —————

1.13 Relación de vueltas fuera de lo nominal

Como se mencionó en la Sección 1.12, para mantener los niveles de voltaje en las barras vecinas dentro de los límites aceptables, se utilizan transformadores de potencia con capacidad de cambiador de tomas. Cuando la relación de vueltas ajustada N es igual a la relación de los voltajes nominales del sistema, la relación se denomina nominal y el transformador se omite del diagrama unifilar en un sistema por unidad. Cuando la relación de espiras ajustada N no es igual a la relación de las tensiones nominales del sistema, se dice que el transformador tiene una relación de espiras fuera de la nominal. Cabe señalar que la relación de espiras fuera de la nominal es una definición que se utiliza para el modelado y no debe confundirse con la relación nominal del transformador físico que puede aparecer en la placa de identificación del transformador. La relación de vueltas no nominales puede ser un número real o un número complejo. Si es un número complejo, el transformador se llama transformador de cambio de fase. En tal caso, los voltajes en los dos lados del transformador difieren tanto en fase como en magnitud.

En los casos en los que la relación de espiras no nominales es un número real, para fines de modelado, se coloca un transformador ideal en serie con la terminal del transformador donde se encuentra el cambiador de tomas. El transformador ideal permite la diferencia en los voltajes. La relación de vueltas fuera de la nominal está representada por las relaciones de vueltas del transformador ideal, que estarían alrededor de la unidad. Con la relación de transformación normalizada como t , el lado que no es unidad se denomina lado de derivación. El circuito equivalente del transformador está conectado al lado de la unidad. La figura 1-29 muestra el circuito equivalente para esta situación.

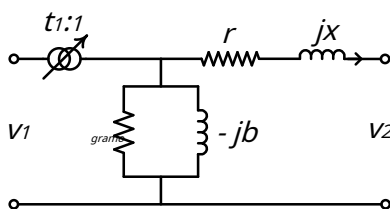


Figura 1-29- El circuito equivalente del transformador en un sistema por unidad con un fuera de nominal
relación de giro

En realidad, la impedancia en serie del transformador cambia cuando se cambia la posición de toma; sin embargo, debido a la complejidad del modelo, generalmente se asume que no se modifica en la mayoría de los programas de estudio de sistemas de potencia. Estos cambios se pueden modelar utilizando una tabla de corrección de impedancia.

El mecanismo del cambiador de tomas generalmente está diseñado para colocarse en el lado de alto voltaje de los transformadores, como se describe en la Sección 1.12. Por lo tanto, el transformador ideal que representa la relación de vueltas fuera de la nominal se considera solo en el lado de alta tensión. Para un autotransformador, el transformador ideal que representa la relación de espiras fuera de la nominal está ubicado en el lado de bajo voltaje porque el cambiador de tomas está ubicado en el terminal del punto medio del autotransformador y, en la práctica, los autotransformadores reductores normalmente se usan en la red. La figura 1-30 muestra el circuito equivalente en un sistema por unidad de un autotransformador con un transformador ideal de relación de derivación fuera de la nominal en el lado secundario.

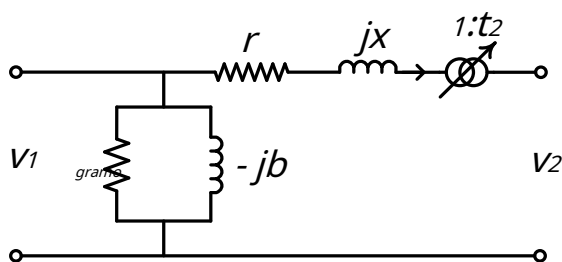


Figura 1-30 - El circuito equivalente del autotransformador reductor en un sistema por unidad con
relación de derivación fuera de lo nominal

1.14 Datos del transformador: placa de identificación y resultados de la prueba

Los transformadores de potencia generalmente tienen una placa de identificación de metal impresa o estampada adherida al tanque que proporciona la información básica sobre el transformador. IEEE C57.12.00 detalla la información que debe mostrarse en la placa de identificación de un transformador según el tipo y la clasificación de kVA del transformador. Los transformadores pueden clasificarse según la potencia de salida o la potencia de entrada, generalmente especificada en MVA. Los transformadores se clasifican en función de la potencia de salida suministrada continuamente a una tensión y frecuencia nominales especificadas en las condiciones de funcionamiento habituales sin superar la temperatura interna del transformador definida en IEEE C57.12.00 [6]:

- Para refrigeración por aire, el aire no debe exceder los 40 °C, la temperatura promedio en cualquier período de 24 horas no debe exceder los 30 °C.
- La temperatura superior del aceite durante el funcionamiento no debe ser inferior a -20 °C.
- Para refrigeración por agua, el agua no debe exceder los 30 °C, la temperatura promedio en cualquier período de 24 horas no debe exceder los 25 °C. La temperatura mínima del agua no debe ser inferior a 1 °C, salvo que se incluya anticongelante para permitir el funcionamiento hasta -20 °C.
- Altitud máxima 1000 m.
- Tensión de alimentación aproximadamente sinusoidal.
- Corriente de carga aproximadamente sinusoidal, factor armónico que no exceda el 0,05 por ciento.
- El voltaje secundario no debe exceder el 105% del valor nominal.
- Factor de potencia de carga del 80% o superior.
- Frecuencia al menos 95% del valor nominal.
- Apto para funcionamiento en exteriores.
- Adecuado para operación reductora.
- Los transformadores del generador deben estar diseñados para operación elevadora.

- Los autotransformadores deben diseñarse para operación de aumento o reducción, si así se requiere.

Bajo ciertas condiciones, un transformador puede funcionar más allá de su capacidad nominal, pero dicha operación reduce la vida útil normal del transformador.

De acuerdo con el estándar IEEE, la placa de identificación de un transformador debe tener la siguiente información:

- **Número de serie, mes/año, nombre y lugar de fabricación**
- Número de fases, frecuencia, valor nominal de MVA, valores nominales de voltaje, voltajes de derivación, polaridad para transformadores monofásicos o diagrama vectorial para transformadores multifásicos, porcentaje de impedancia, material del conductor, diagrama de conexión de devanados
- Clase de enfriamiento, aumento de temperatura, tipo de líquido aislante, volumen de líquido o volumen del tanque, presión y datos del líquido
- Instrucciones de instalación y funcionamiento, peso total y nivel de aislamiento de impulso básico (BIL)
- Cabe señalar si el equipo es un transformador o un autotransformador

La Figura 1-31 muestra una placa de identificación típica de un transformador de dos devanados.

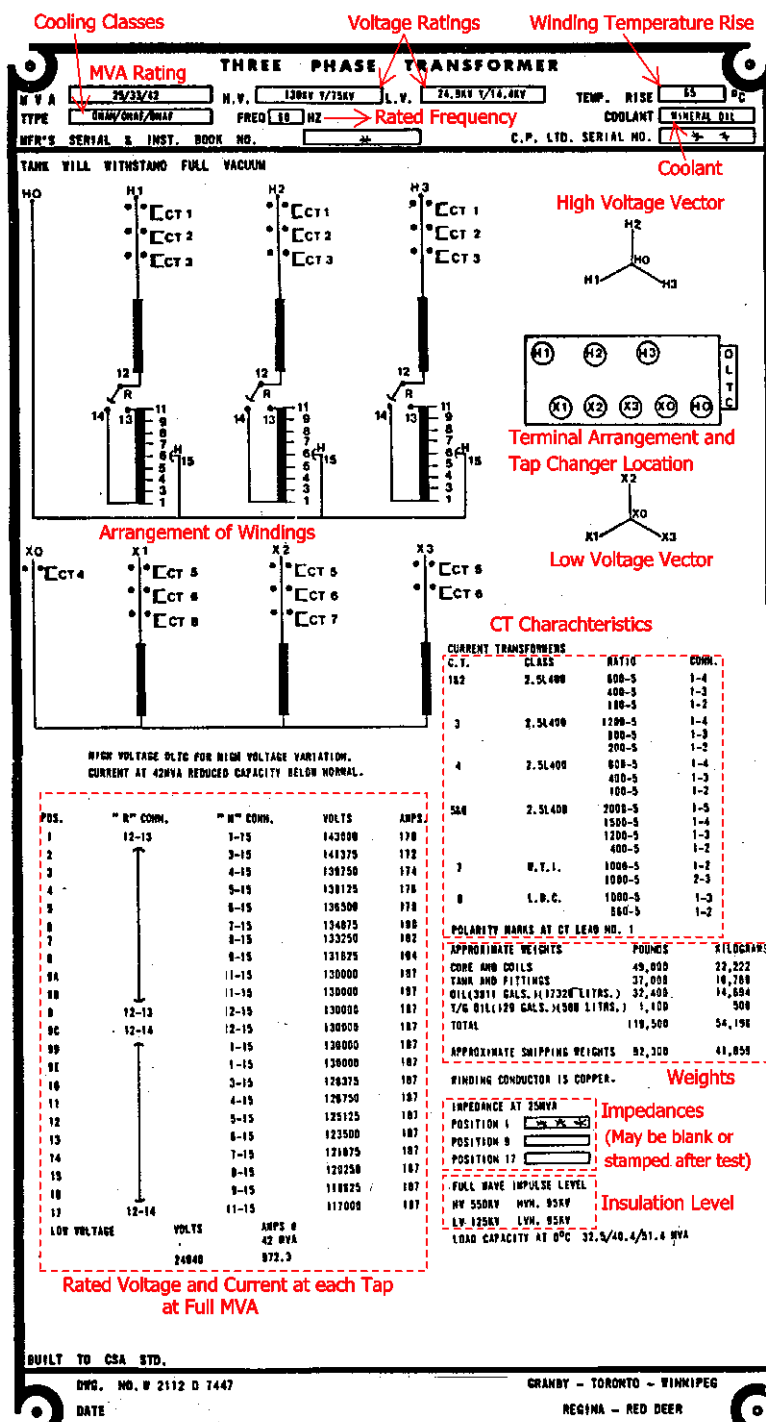


Figura 1-31- Placa de identificación típica de un transformador de dos devanados

El fabricante debe proporcionar el informe de prueba del transformador. La Figura 1-32 muestra la página de resumen de un informe de prueba de transformador típico. El formato variará entre los fabricantes y dependerá del cliente y del año en que se construyó el transformador. Los resultados de las pruebas sin carga y

Las pruebas de pérdida de carga se darán en el informe de prueba y en la placa de identificación. Los siguientes parámetros del transformador se presentan en el informe de prueba:

- Resultados de la prueba de pérdida sin carga (circuito abierto).

Como se describe en la Sección 1.5, las pérdidas sin carga del transformador y la corriente de excitación se miden a través de la prueba de pérdidas sin carga. Las pérdidas se informan en vatios o kilovatios y la corriente de excitación se informa por unidad en valores nominales de MVA especificados o en porcentaje de la corriente de línea nominal del devanado en el que se mide. De acuerdo con IEEE C57.12.90, cuando la clase de enfriamiento del transformador implica más de una clasificación de MVA, se utiliza la clasificación de MVA más baja para determinar la corriente base. Si se realiza una prueba de circuito abierto en dos voltajes diferentes, se informan ambos. Para la tensión nominal, el fabricante suele garantizar un límite máximo de pérdida, que se dará en el informe.

- Resultados de la prueba de pérdida de carga (cortocircuito).

La pérdida se dará en vatios o kilovatios y la impedancia y la reactancia se informarán por unidad en una clasificación de MVA especificada. El fabricante normalmente garantiza un límite máximo para la pérdida, que se establece en el informe.

- Resultados de la prueba de secuencia cero.

El formato y los parámetros informados en los informes de prueba de secuencia cero varían significativamente de un transformador a otro.

Rating: 3-60-120/160/200 MVA -244 KV WYE - 144 KV WYE				
Taps: On load taps $\pm 10\%$ in ± 8 steps in HV dor HV				
<u>Serial No.</u>	<u>Test Values</u>		<u>Guaranteed Values</u>	
Open Circuit Test:				
% Voltage % Io	@9.52 MVA	3.0	← Excitation current at 100% V	
100 Watts	Test MVA	63,800	← No load loss at rated V	75,000
% Voltage % Io		8.16	← Excitation current at 110% V	
110 Watts		91,000	← No load loss at 110% V	
				↑ Guaranteed Max no load loss (W)
Load Loss Test:	pos.#9 @ 120 MVA			Guaranteed Max load loss (W)
Watts @ 85 °C	↑ Nominal tap position	144,824	← Load loss (W)	156,000
% IX		6.72	← Reactance %	
% IZ @ 85 °C		6.72	← Impedance %	
				Guaranteed impedance % → 7.0
Total Watts @ 100%				
Voltage & 85 °C		208,624		231,000

Figura 1-32- Informe de prueba típico de un transformador de dos devanados

1.15 Pruebas estándar de transformadores

Los transformadores de potencia suelen ser unidades personalizadas, por lo que no se pueden realizar numerosas pruebas de prototipos de preproducción para garantizar que un transformador cumpla con los requisitos y límites especificados y sea apto para el servicio. Sin embargo, es necesario determinar si el transformador será adecuado para 30 o más años de servicio. Los procedimientos de control de calidad se utilizan en todo el proceso de diseño y fabricación de cada unidad individual. Es lógico que se realicen algunas pruebas durante la fabricación como parte del proceso de garantía de calidad. Las pruebas de control de calidad incluyen

lo siguiente: medición de pérdidas en el núcleo, verificación de la placa del núcleo, resistencia del aislamiento del marco del núcleo, verificación del cobre del devanado y prueba de presión del tanque.

Después de la fabricación, el transformador debe someterse a pruebas como se describe en IEEE C57.12.90. Estas pruebas se clasifican en rutina, diseño, conformidad y otras pruebas definidas en C57.12.80. Las siguientes pruebas son requeridas por IEEE C57.12.90.

- Resistencia al viento
- Polaridad
- Relación
- Sin pérdida de carga
- Corriente de excitación
- Impedancia de pérdida de carga
- Impedancia de secuencia cero *
- Pruebas dieléctricas:
- Voltaje de impulso
- Impulso de conmutación*
- Voltaje inducido
- Descarga parcial*
- Resistencia de aislamiento y factor de potencia
- Aumento de temperatura, (normalmente solo se realiza en el primer transformador)*
- Nivel de sonido *

* Estas pruebas no son obligatorias en todas las unidades.

Se requieren pruebas para demostrar que el transformador cumple con las especificaciones, incluidas las garantías, con la expectativa de que sea apto para 30 años de servicio. En los transformadores se realizan dos tipos de ensayos:

- Pruebas de rutina realizadas en todas las unidades.
- Pruebas de tipo realizadas en la primera unidad de un diseño (además de las pruebas de rutina)

En esta guía solo se consideran algunas pruebas de rutina, como la prueba de pérdidas en el núcleo, la prueba de pérdidas en la carga y la prueba de secuencia de fase cero. Estas pruebas son necesarias para determinar los parámetros del transformador. Se pueden estimar a partir de la geometría del transformador y los datos típicos disponibles en la literatura, pero es prácticamente imposible calcular la corriente sin carga estimando los amperios-vuelta necesarios en diferentes partes del núcleo para establecer una densidad de flujo dada. Esta guía describe solo los enfoques de medición de prueba.

Los procedimientos de esta guía asumen que los resultados de las pruebas de medición discutidos anteriormente y los datos habituales de la placa de identificación están disponibles. La Tabla 1-1 muestra la lista de datos del transformador necesarios para calcular los parámetros del circuito equivalente. Sin embargo, para muchos transformadores, la información, como los resultados de la prueba de secuencia cero, no está disponible; por lo tanto, se introducen varios supuestos en esta guía para permitir la estimación de los parámetros.

Tabla 1-1- Información Requerida para Modelar un Transformador

Artículo	Parámetro del transformador	Símbolo	Ejemplo
General			
1	Clasificaciones ONAN del transformador ¹	AMEU _{EN UNA}	25 MVA
2	Voltajes de bobinado (primario secundario, ...)	V _H , V _X , ... V _{PAGS} , V _S , ... V ₁ , V ₂ , ...	130 kV / 25 kV
3	Tipo de conexión ¹	-	estrella-estrella
4	Rango de toque ¹	t ₁ , t ₂ , ...	± 10%
5	Número de pasos de toque ¹	-	17
6	Cuerda con grifo regulable ¹	-	Lado primario (alto)
7	Ángulo de fase de los devanados	-1, -2, ...	0°
Resultados de la prueba sin pérdida de carga			
8	Prueba de pérdida sin carga MVA	AMEU _{Prueba de NL}	42 MVA
9	Pérdida sin carga	PAGS _{Palcos Bajos}	28500W
10	corriente de excitación	y _{OLX} ¹	0,4 %
11	Toque la configuración para la prueba de pérdida sin carga	t _{Palcos Bajos}	Nominal
Resultados de la prueba de pérdida de carga			
12	Prueba de pérdida de carga MVA ¹	AMEU _{Prueba SC, ...}	25 MVA
13	Pérdida de carga ¹	PAGS _{CAROLINA DEL SUR, PAGSL, JOE, ...}	86000W
14	Voltaje de impedancia (%) o voltaje de prueba ¹	y _{OX_HX} , o Z _{HX} , V _{Prueba...}	7,88 %
15	Resistencia reactiva ¹	y _{OX} , o X _{HX} , ...	7,87 %
dieciséis	Toque la configuración para la prueba de pérdida de carga ¹	t _{CAROLINA DEL SUR}	Nominal
Resultados de la prueba de secuencia cero			
17	Resultados de la prueba de circuito abierto de secuencia cero	Z ₁ , Z ₂	8%, 7,02%
18	Resultados de la prueba de cortocircuito de secuencia cero	Z ₃	
19	Parámetros del modelo T de secuencia cero	Z _{H0} , Z' _{X0} Z _{M0} para el modelo T	
20	Configuración de puesta a tierra	Estado de puesta a tierra de los puntos neutros de los devanados: Sólidamente conectado a tierra o conectado a tierra a través de una impedancia	
21	Impedancia de puesta a tierra	Z _{GH} , Z _{GX} , ...	

¹En el caso de un transformador con más de dos devanados, estos parámetros se deben dar para cada devanado o cada par de devanados, según el parámetro.

El procedimiento para determinar los parámetros de secuencia positiva y negativa en transformadores trifásicos es similar al utilizado para transformadores monofásicos; no importa cuál sea el tipo de conexiones primarias y secundarias o cuál sea el tipo de núcleo del transformador. Sin embargo, el parámetro homopolar debe determinarse en transformadores trifásicos. Como se describe en la Sección 1.5, los parámetros de secuencia positiva y negativa se determinan mediante mediciones de prueba sin carga (núcleo) y pérdidas con carga. Algunos de los parámetros, como el transformador

El MVA, el tipo de conexión y la impedancia de puesta a tierra, enumerados en la Tabla 1-1, deben proporcionarse en el informe de prueba y/o en los datos de la placa de identificación para el cálculo del circuito equivalente. De esta manera, no se pueden hacer suposiciones para estos parámetros. Sin embargo, faltan algunos datos, y cuando este es el caso, se deben hacer suposiciones aceptables con respecto a algunas de las variables. Tabla 1-3 y Tabla 1-4 en la sección que sigue lista de suposiciones para los datos que faltan.

1.15.1 Prueba de pérdidas sin carga

El propósito de la prueba de pérdidas sin carga es medir las pérdidas sin carga a un voltaje y frecuencia de excitación especificados. La Figura 1-33 muestra el diagrama esquemático de la configuración de prueba y el circuito equivalente de un transformador trifásico para una prueba de pérdidas sin carga. Se pueden encontrar más detalles en IEEE C57.12.90, Sección 8. En esta prueba, el voltaje y la frecuencia nominales se aplican a un devanado, generalmente el devanado de bajo voltaje (o, a veces, un devanado de derivación) mientras que los otros devanados son dejado abierto. El transformador se energiza para dar el 100 % de los voltios pico por vuelta, lo que da como resultado un flujo del 100 % en el núcleo. Se anota el voltaje rms para confirmar que el factor de forma del voltaje es aceptable. Se miden la potencia real (pérdidas sin carga) y la corriente de excitación. La corriente de excitación esperada a la tensión nominal es inferior al 1 % de la corriente nominal en la clasificación base del transformador. En los diseños de transformadores modernos, la corriente de excitación puede ser tan baja como 0,6%.

La norma CSA C88, cláusula 16.3-k, establece que una hora de excitación se ejecuta al 110 % del voltaje nominal después de completar todas las pruebas dieléctricas en todos los transformadores con una clasificación de voltaje igual o superior a 123 kV. Al finalizar esta prueba de una hora, la corriente de excitación y la pérdida sin carga se medirán a la tensión nominal y al 110 % de la tensión nominal. Estas medidas serán los valores oficiales para la corriente de excitación y la pérdida de excitación. Por lo tanto, si las mediciones de pérdida sin carga y de corriente de excitación después de una prueba dieléctrica de una hora se han proporcionado en el informe de prueba, estos son los resultados de la prueba de pérdidas sin carga que deben usarse en el modelado.

Las mediciones de pérdidas sin carga normalmente se refieren a la posición de toma nominal en transformadores regulares y autotransformadores. De acuerdo con IEEE C57.15, las pérdidas sin carga en los transformadores con regulador de voltaje escalonado es el promedio de las pérdidas sin carga en el neutro y en la siguiente posición de refuerzo adyacente con el voltaje nominal aplicado al devanado en derivación o en serie para los reguladores de voltaje que no incluyen un transformador en serie.

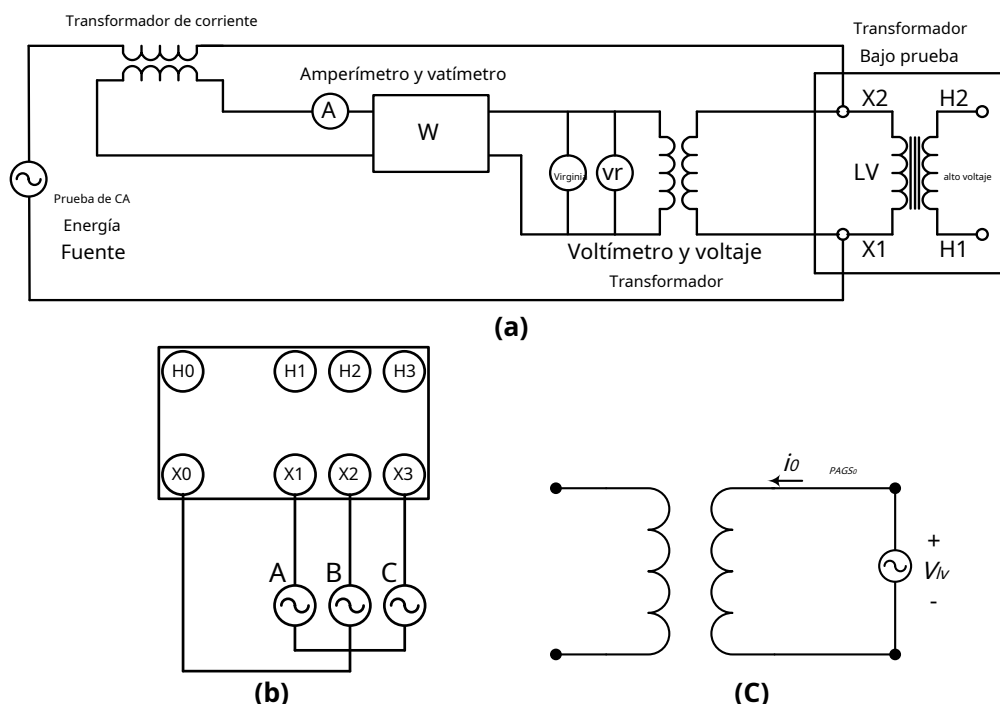


Figura 1-33- Diagrama esquemático de la prueba de pérdidas sin carga: a) Montaje de prueba, b) Bushings conexión, c) Circuito equivalente

Esta prueba se repite al nivel de tensión del 110 %, un requisito de las normas; sin embargo, la mayoría de las empresas de servicios públicos solicitan que se midan las pérdidas sin carga y la corriente de excitación para el 90 % del voltaje nominal, y luego con el aumento del voltaje al 110 % en incrementos del 5 %. Algunos fabricantes hacen esto aunque no esté incluido en las especificaciones del cliente. Las medidas adicionales tienen fines informativos y se pueden utilizar para determinar las características del acero del núcleo.

La temperatura del núcleo provoca variaciones en las pérdidas sin carga, al igual que la tensión de excitación. Por lo tanto, se requiere una temperatura de referencia cuando se establecen pérdidas sin carga. Según IEEE C57.12.00, la temperatura de referencia estándar para las pérdidas sin carga del transformador se especifica en 20 °C.

La prueba de pérdidas sin carga generalmente se realiza energizando el lado de bajo voltaje del transformador. Es posible alimentar el devanado de alta tensión y dejar abierto el devanado de baja tensión. La razón por la que esto no suele hacerse se debe a las limitaciones de voltaje del equipo de prueba. En algunos casos, incluso el voltaje nominal del devanado de bajo voltaje es mayor que las capacidades del generador de voltaje. Para estos casos, si existe un devanado de derivación y está ubicado en el neutro de un devanado conectado en estrella en el transformador bajo prueba, puede usarse para excitar el transformador. Si esta no es una opción, se debe agregar un devanado de prueba. El problema del voltaje bajo que excede las capacidades del generador de voltaje no se encuentra en los transformadores elevadores de generador (GSU) debido a las limitaciones de voltaje de los generadores.

Los fabricantes normalmente proporcionan un valor máximo garantizado para las pérdidas sin carga. El diseñador normalmente diseñará el transformador de modo que las pérdidas reales sin carga estén cerca de las

valor garantizado. Si no es así, hay un problema con la unidad o con el cálculo, y se puede aplicar una sanción monetaria si las pérdidas en vacío probadas superan el valor garantizado.

1.15.2 Prueba de pérdidas de carga

La prueba de pérdidas de carga se lleva a cabo para determinar no solo las pérdidas en el transformador bajo carga, sino también la impedancia de la unidad. Las pérdidas y la impedancia suelen estar sujetas a garantía. Porque las pérdidas suponen un coste para el usuario por la potencia que consumen, y puede haber una sanción económica. La impedancia en serie de un transformador determina la cantidad de corriente de falla que fluye en los devanados cuando ocurre un cortocircuito durante la operación del transformador.

La prueba de pérdidas de carga normalmente se realiza alimentando el devanado de alto voltaje mientras se cortocircuita el devanado de bajo voltaje y se aumenta el voltaje hasta que la corriente nominal circule en ambos devanados. Si el transformador tiene más de dos devanados de bajo voltaje, la prueba se repetirá con cada uno de los devanados de bajo voltaje cortocircuitados uno por uno. Además, se realiza una prueba similar suministrando uno de bajo voltaje y cortocircuitando los terminales del otro de bajo voltaje.

Por definición, la tensión de alimentación de la prueba de pérdidas de carga es igual a la tensión de impedancia de los devanados considerados. La corriente de excitación es normalmente inferior al uno por ciento a la tensión nominal; por lo tanto, la rama de derivación puede despreciarse. A continuación, se miden la tensión de alimentación, la corriente de entrada y la potencia. La Figura 1-34 muestra el diagrama de prueba de pérdidas de carga de un transformador monofásico. La prueba de pérdidas de carga para transformadores trifásicos se realiza de la misma manera excepto que todas las conexiones, la configuración de la prueba y las mediciones son trifásicas y se usa una fuente de alimentación trifásica balanceada.

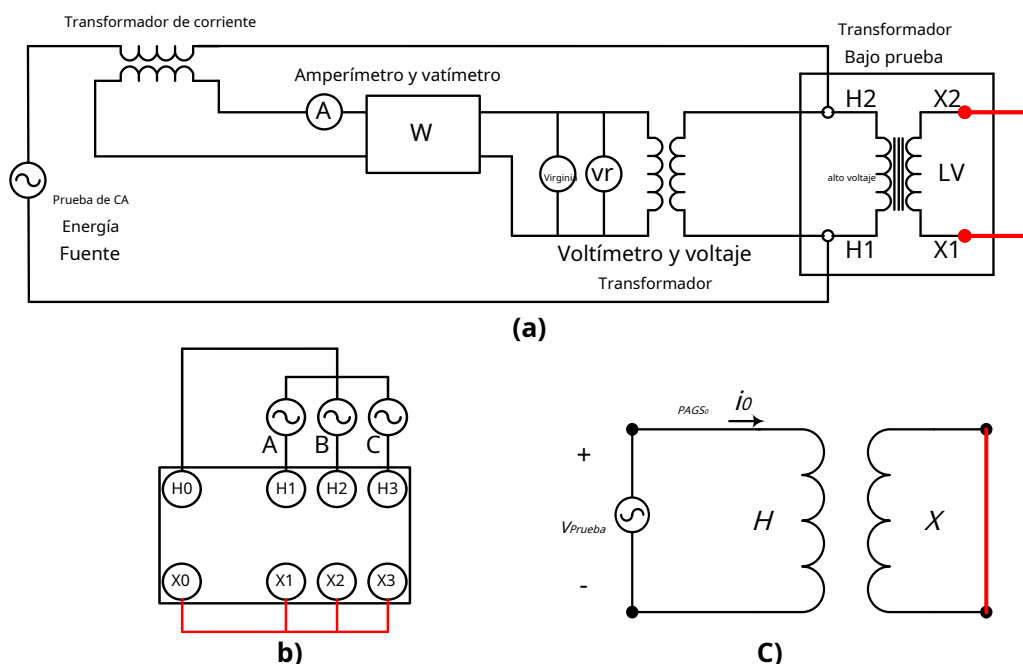


Figura 1-34- Diagrama esquemático de la prueba de pérdidas de carga: a) Montaje de prueba, b) Bushings conexión, c) Circuito equivalente

Las pérdidas de carga de los transformadores son muy bajas, lo que significa que el factor de potencia en la prueba de pérdidas de carga es muy bajo, oscilando entre el 5 % y el 1 %. En consecuencia, el ángulo de fase entre la tensión y la corriente es cercano a los 90°, y la medida de la potencia activa en los circuitos de bajo factor de potencia es muy sensible al ángulo de fase entre la corriente y la tensión.

Como es el caso con otras medidas experimentales, las medidas de prueba de pérdidas de carga están sujetas a errores de medida; estos incluyen error de ángulo de fase en el vatímetro y cualquier CT y PT asociado. Por lo tanto, las mediciones de pérdidas de carga deben corregirse según IEEE PC57.123. Cuando utilice la información de pérdida de carga de los informes de prueba, verifique la base (MVA) en la que se realizó la prueba y, si es necesario, realice una corrección (las pérdidas de carga aumentan por el cuadrado de la corriente). Al mismo tiempo, verifique que la corriente refleje la condición de corriente a plena carga del devanado en cuestión.

Las pérdidas medidas en la prueba de pérdidas de carga es la suma de las pérdidas en el primario y el secundario. La potencia reactiva consumida es también la absorbida por la reactancia de fuga de los dos devanados. Si se necesita el circuito equivalente exacto como se ilustra en la Figura 1-4, entonces y y también y deben separarse de la resistencia y la reactancia totales calculadas, respectivamente. Como se describe en la Sección 1.3, la impedancia en serie de separación entre dos devanados es la principal desventaja de un circuito equivalente modelo T. Sin embargo, las resistencias de cd de los devanados medidas por la prueba de cd son más pequeñas que las resistencias determinadas por la prueba de pérdidas con carga. Como se mencionó en la Sección 1.5, si se requieren los parámetros de impedancia para cada devanado, la impedancia total se divide en partes iguales entre los dos devanados.

ser iguales. Esta es una suposición bastante válida para muchos tipos de devanados de transformadores porque las rutas de flujo de fuga son a través del aire y son similares. Si se requiere el circuito equivalente aproximado, como se ilustra en la Figura 1-7, no es necesario separar la resistencia y la reactancia totales calculadas de la prueba entre los dos devanados.

Debido a que la corriente nominal fluye en los devanados del transformador, la corriente aumenta la temperatura de los devanados y, por lo tanto, aumenta las pérdidas en los devanados durante la medición de la prueba de pérdida de carga. Para minimizar la magnitud de este efecto, los fabricantes mantienen el tiempo de prueba lo más corto posible. En la práctica, la prueba dura poco tiempo y la temperatura del aceite se toma antes y después de la prueba; se utiliza la temperatura media; y luego se hizo la corrección de temperatura necesaria. La medición de pérdidas de carga en transformadores trifásicos se puede realizar por diferentes métodos. El método de los tres vatímetros se usa ampliamente en las pruebas de rutina de los transformadores.

La prueba de pérdidas de carga generalmente se lleva a cabo a temperatura ambiente. Los estándares ANSI requieren que los resultados se informen en las temperaturas de referencia especificadas en el informe de prueba. Por lo tanto, las pérdidas deben corregirse a 75 °C para unidades de elevación de 55° o 85 °C para unidades de elevación de 65°, las temperaturas de referencia especificadas. Según IEEE C57.12.00, la temperatura de referencia estándar para las pérdidas de carga del transformador se especifica en 85 °C. Esta temperatura es la temperatura del devanado y se define como:

De acuerdo con IEEE C57.12.90, las pérdidas de carga deben medirse a una corriente de carga igual a la corriente nominal para la posición de toma correspondiente. La impedancia calculada generalmente se expresa como la relación porcentual entre el voltaje aplicado y el voltaje nominal. Bajo la prueba de pérdidas de carga de corriente nominal, el voltaje de impedancia es la impedancia por unidad del transformador. En este caso, la clasificación de MVA de prueba también debe expresarse en el informe de prueba. Si la corriente de prueba no es exactamente igual a la corriente nominal, el valor de pérdida de carga medido deberá corregirse por el cuadrado de la relación entre la corriente nominal y la corriente de prueba (promedio de la corriente de fase medida en transformadores trifásicos) de la siguiente manera . En las circunstancias, las mediciones de prueba pueden informarse en lugar del voltaje de impedancia en el informe de prueba.

Porque:

Las mediciones de prueba de pérdidas de carga se realizan en las posiciones de derivación máxima, normal, media y mínima. En los autotransformadores, generalmente se fabrican en la posición de toma normal. En los reguladores de voltaje escalonado, de acuerdo con IEEE C57.15, las mediciones de prueba de pérdidas de carga se realizan en cuatro posiciones, incluidas las posiciones de reducción máxima y adyacente al máximo y las posiciones de refuerzo máxima y adyacente al máximo con corriente nominal en el devanados En el informe de prueba, el

se puede reportar el valor promedio de estas cuatro mediciones. Sin embargo, las mediciones pueden realizarse en la posición de toma mínima y máxima y el valor promedio se ha informado en el informe de prueba.

1.15.3 Prueba de secuencia de fase cero

La impedancia homopolar en transformadores trifásicos se mide a la frecuencia nominal entre los terminales de línea de un devanado conectado en Y o en zigzag conectados entre sí y su neutro, y se expresa en ohmios por fase. El circuito equivalente homopolar de los transformadores trifásicos varía según el tipo de conexión de los devanados y la construcción del núcleo. Su topología depende del camino disponible para el flujo de corriente de secuencia cero y el equilibrio MMF dentro del circuito magnético del transformador. En la Figura 1-35-a y la Figura 1-35-b, respectivamente, se muestran un transformador tipo núcleo trifásico de tres patas y dos devanados y un transformador tipo núcleo trifásico de cuatro patas y dos devanados. El devanado primario es excitado por voltajes de secuencia de fase cero y su conexión es una conexión a tierra en estrella en ambos transformadores. El devanado secundario en ambos transformadores, independientemente de su tipo de conexión, se deja en circuito abierto. El flujo magnético debido a la excitación de secuencia cero está encerrado a través del camino mostrado por la línea punteada en cada transformador.

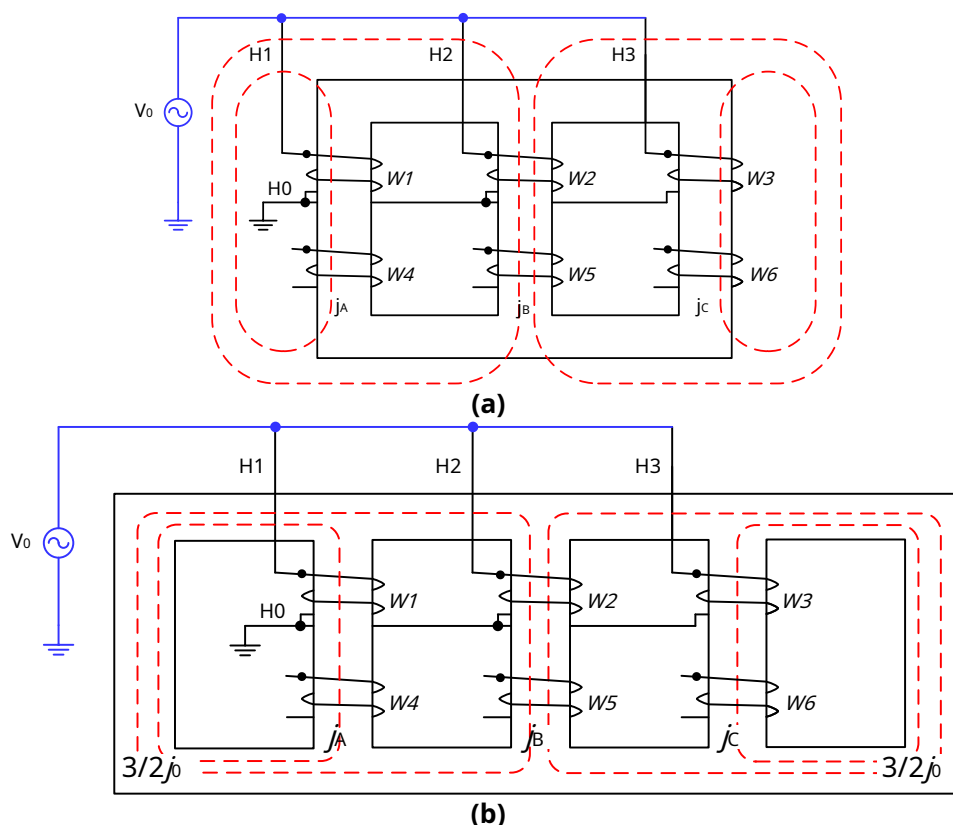


Figura 1-35- Diagramas esquemáticos de transformadores tipo núcleo con conexión estrella puesta a tierra en primario excitado por un voltaje de secuencia cero: a) Núcleo magnético de tres patas, b) Cinco-núcleo magnético con patas

En un transformador de núcleo magnético de tres patas, como el de la Figura 1-35-a, no hay un camino de retorno físico de baja reluctancia magnética desde el yugo del núcleo superior al inferior para el flujo de secuencia cero. Por lo tanto, tiene que pasar por la alta reluctancia magnética, el entrehierro, el acero estructural y el tanque. En consecuencia, la reluctancia magnética para el flujo de secuencia cero es relativamente alta y depende de la estructura física del transformador y del tipo de acero del tanque más que del tipo y la estructura del núcleo magnético. Por tanto, la impedancia magnética, que es inversamente proporcional a la reluctancia magnética, es muy baja.

Para superar las deficiencias de un transformador de tres ramales en la excitación de secuencia cero, se agrega un cuarto o incluso un quinto ramal a la estructura del núcleo del transformador, y el cuarto y/o quinto ramal proporciona una ruta de retorno de baja reactancia magnética para el cero. -flujo de secuencia en la estructura física del núcleo magnético del transformador. La figura 1-35-b muestra los contadores de flujo de secuencia cero en un transformador de núcleo de cinco patas. Sin embargo, esta ruta magnética no está diseñada para devolver el flujo total producido bajo un voltaje nominal de secuencia cero que es tres veces el flujo nominal que fluye a través de cada ramal, como se muestra en la Figura 1-35-b. El flujo de retorno de secuencia cero en un transformador tipo núcleo y carcasa de cinco patas es 1,5 veces el flujo que fluye en cada pierna alrededor del cual se enrolla el devanado. Como resultado, suponiendo que la ruta de retorno del flujo de secuencia cero en el núcleo magnético del transformador permanece en el área lineal y no se satura, se espera que la impedancia magnética sea aproximadamente igual a la impedancia magnética de secuencia positiva o negativa. Pero, las patas adicionales en la estructura del núcleo magnético del transformador nunca permanecen en el área lineal mientras transportan un flujo superior al flujo nominal. Están diseñados para transportar el flujo nominal de una fase y tienen un tamaño similar al de las otras patas. Por lo tanto, en un transformador tipo núcleo de cuatro patas, cuando el voltaje de secuencia cero se acerca al 33% del voltaje nominal, el núcleo del cuarto brazo comienza a saturarse. Este valor en un transformador de cinco patas y en un transformador tipo coraza es 66.67%. En caso de que el voltaje exceda estos valores, la impedancia magnética comienza a caer dramáticamente.

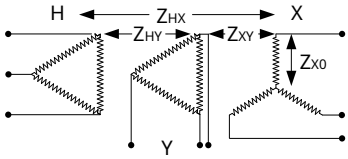
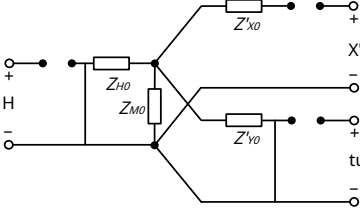
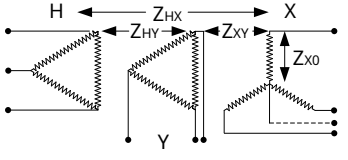
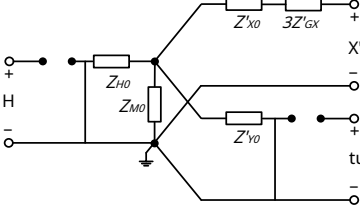
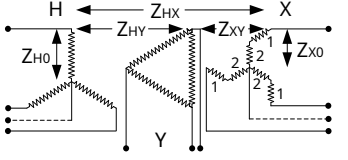
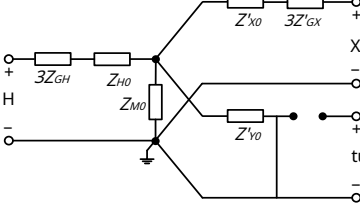
Los circuitos equivalentes de secuencia cero de transformadores trifásicos para varios tipos de conexiones de devanados se enumeran en la Tabla 1-2. Como muestra esta tabla, la corriente de secuencia cero necesita una conexión en estrella con conexión a tierra para fluir; de lo contrario, enfrenta un circuito abierto y no fluye. En consecuencia, la impedancia total de secuencia cero aumenta efectivamente por cualquier impedancia en la conexión entre el punto neutro de la conexión en estrella y el punto de tierra. Se puede considerar como una de las ventajas de la conexión en estrella a tierra que limita la magnitud de la corriente de falla a tierra en condiciones de falla.

Tabla 1-2- Circuitos equivalentes de secuencia cero e impedancias para todos los tipos de transformadores de dos y tres devanados, incluidos todos los de tipo núcleo y tipo coraza

Transformadores			
	Tipo de conexión	Modelo T	Modelo π
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			

	Tipo de conexión	Modelo T	Modelo π
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
dieciséis			

	Tipo de conexión	Modelo T	Modelo π
17			
18			
19			-
20			-
21			-
22			-
23			-

	Tipo de conexión	Modelo T	Modelo π
24			-
25			-
26			-

El circuito equivalente de secuencia cero de un transformador Yg-Yg de dos devanados con conexión a tierra sólida (que se muestra en la figura 1-36) consta de elementos de impedancia en serie entre el devanado primario y secundario y una impedancia en derivación, que es similar a la positiva. Circuitos equivalentes de secuencia y secuencia negativa de un transformador trifásico. Los elementos de impedancia en serie representan las pérdidas y la reactancia de fuga de los devanados primario y secundario. En la práctica, no hay diferencia entre los elementos de impedancia en serie de secuencia cero y los de secuencia positiva o secuencia negativa. La impedancia de derivación representa la corriente de magnetización y las pérdidas del núcleo debidas a la excitación de secuencia cero. Se espera que la impedancia de derivación de la secuencia cero sea menor que la impedancia de derivación del circuito equivalente de secuencia positiva o negativa en transformadores de tipo de núcleo de tres patas debido a la mayor probabilidad de saturación del núcleo bajo excitación de secuencia cero. La figura 1-36-a muestra un circuito equivalente de secuencia cero modelo T en el que los elementos del lado de bajo voltaje se han transferido al lado de alto voltaje; y, de manera similar a la que se usa para un circuito equivalente general de transformador, el modelo π se puede derivar de un modelo T a través de fórmulas de red de dos puertos, como se describe en las Secciones 1.3 y 1.4. La figura 1-36-a muestra un circuito equivalente de secuencia cero modelo T en el que los elementos del lado de bajo voltaje se han transferido al lado de alto voltaje; y, de manera similar a la que se usa para un circuito equivalente general de transformador, el modelo π se puede derivar de un modelo T a través de fórmulas de red de dos puertos, como se describe en las Secciones 1.3 y 1.4. La figura 1-36-a muestra un circuito equivalente de secuencia cero modelo T en el que los elementos del lado de bajo voltaje se han transferido al lado de alto voltaje; y, de manera similar a la que se usa para un circuito equivalente general de transformador, el modelo π se puede derivar de un modelo T a través de fórmulas de red de dos puertos, como se describe en las Secciones 1.3 y 1.4.

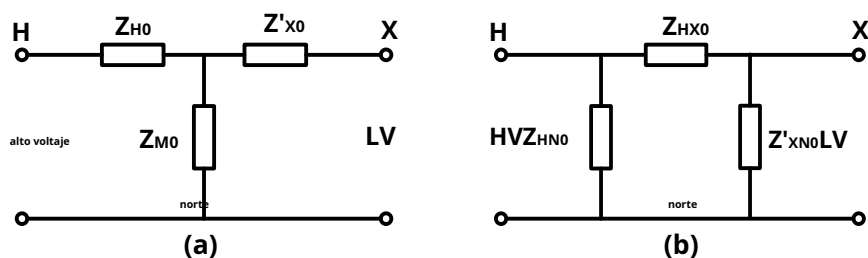


Figura 1-36- Circuito equivalente homopolar de un YY de dos devanados sólidamente puesto a tierra transformador referido al lado de alta tensión: a) modelo T, b) modelo π

Si el punto neutro está conectado a tierra a través de un Z_M , esta impedancia de puesta a tierra aparece triplicada en un cero- circuito equivalente de secuencia, como se muestra en la figura 1-37, en el que $3Z_M$ y son el punto neutral impedancia a tierra en el lado de alta tensión y en el lado de baja tensión, respectivamente. Z_M es el valor transferido de al lado de alta tensión.

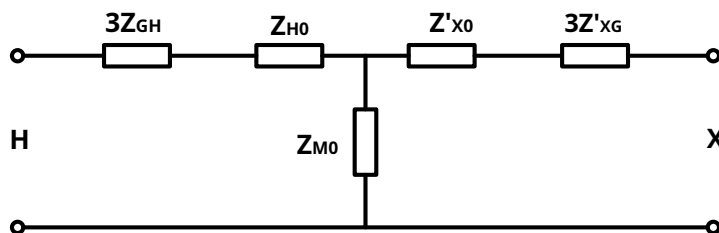


Figura 1-37- Circuito equivalente homopolar de un transformador YY de dos devanados puesto a tierra mediante impedancia individual, referida al lado de alta tensión

Para todos los tipos de transformadores, excepto el tipo de núcleo de tres patas con al menos una conexión en Y puesta a tierra, la impedancia de derivación es muy grande. Se supone que es similar a la impedancia de derivación de secuencia positiva o negativa de aproximadamente 100 pu. Pero, para el tipo de núcleo de tres patas, además de la ruta de flujo de secuencia cero de alta reluctancia, se esperan pérdidas de corrientes de Foucault relativamente altas en el tanque porque el flujo de secuencia cero está encerrado por la pared del tanque del transformador. Sin embargo, recientemente se lograron algunas mejoras en el acero del tanque, y estas mejoras disminuyen las pérdidas por corrientes de Foucault en la pared del tanque del transformador. Debido a esto, para mantener la ruta de retorno de flujo cero operando en el área lineal, el voltaje de excitación no debe exceder el 30 % del voltaje nominal de línea a neutro del devanado. que se energiza cuando la otra conexión del conjunto de devanados no es una conexión delta. Si la conexión del otro conjunto de devanados es una conexión en delta, el voltaje de excitación debe ser lo suficientemente bajo como para que no exceda la corriente circulante más allá de la corriente de fase nominal de cualquier devanado en delta. Estas condiciones de excitación se pueden encontrar en

IEEE C57.12.90, Sección 9.5.

Los parámetros de secuencia cero del circuito equivalente de un transformador trifásico se pueden encontrar realizando pruebas de circuito abierto y de cortocircuito con voltajes de secuencia cero aplicados. Estas pruebas se denominan pruebas de impedancia de secuencia de fase cero y se aplican solo a transformadores que tienen uno o más devanados con un neutro físico extraído del transformador para conexiones externas. Uno de esos devanados se excita con una sola fuente de tensión a una frecuencia nominal entre el punto neutro y los tres terminales conectados entre sí; pero otro

El juego de devanados puede tener una conexión en Y o en triángulo. Según IEC 76-1, las pruebas de impedancia de secuencia cero están sujetas a acuerdo entre el fabricante y el comprador. Los fabricantes deben proporcionar los parámetros de secuencia cero en la especificación del transformador o en la placa de identificación, particularmente para transformadores especiales. Como se enumera en la Tabla 1-2, todos los tipos de conexión para transformadores de dos devanados se pueden considerar en las siguientes cuatro categorías:

a) Parámetros del circuito equivalente de secuencia cero para transformadores conectados en triángulo-triángulo

Las pruebas de impedancia de secuencia cero se pueden realizar en transformadores en los que la conexión del devanado consiste en una conexión en estrella a tierra. Las pruebas de impedancia de secuencia de fase cero para transformadores conectados en triángulo-triángulo no tienen sentido.

b) Parámetros del circuito equivalente de secuencia cero para transformadores conectados en Y-Delta puestos a tierra

A los fines de la explicación, se supone que la conexión del conjunto de devanados primarios es una conexión en estrella a tierra excitada por una fuente de voltaje de secuencia cero, como se muestra en la figura 1-38. Si el devanado secundario está conectado en triángulo, no importa que los terminales de estos devanados estén abiertos o en cortocircuito; siempre contribuyen a la excitación de secuencia cero porque la conexión delta opera como un circuito de bucle cerrado para posibles voltajes inducidos a estos devanados debido al flujo de magnetización de fase cero. Sin embargo, no aparece voltaje en la terminal de los devanados secundarios.

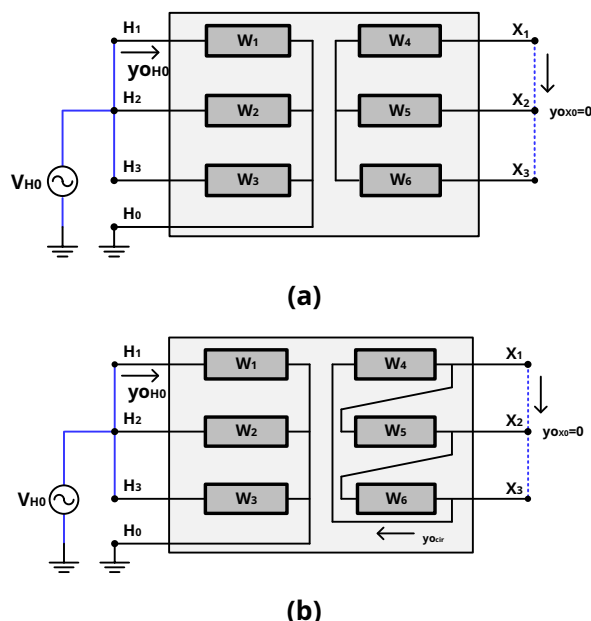


Figura 1-38- Prueba de impedancia homopolar de un transformador de dos devanados con: a) Yg-Y conexión, b) Conexión Yg-delta

El circuito equivalente de secuencia cero de un transformador Y-delta conectado a tierra a través de la impedancia de tierra se muestra en la Figura 1-39.

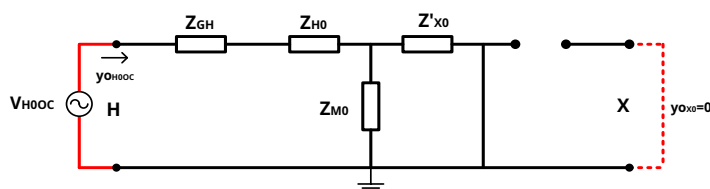


Figura 1-39- El circuito equivalente de secuencia cero de un transformador Y-delta conectado a tierra a través de la impedancia de tierra

Como se muestra en esta figura, la impedancia de secuencia cero del lado de alto voltaje es:

Dado que la conexión delta secundaria parece un circuito abierto en la condición de secuencia cero, tener un circuito abierto o un cortocircuito en los terminales de la conexión delta no cambia el circuito. Por lo tanto, se puede determinar a través de las mediciones de prueba de secuencia cero (circuito abierto o cortocircuito), de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} Z_{H0} &= \frac{V_{H00C}}{I_{H00C}} \\ Z_{X0} &= \frac{V_{X00C}}{I_{X00C}} \end{aligned}$$

Es importante observar que V_{H00C} no es la tensión nominal de fase por las razones antes mencionadas. El valor por unidad se puede calcular a partir de la impedancia base a la potencia base dada.

c) Parámetros del circuito equivalente de secuencia cero para transformadores conectados YY

En este caso, también se supone que la conexión del devanado primario es una conexión en estrella a tierra excitada por una fuente de voltaje de secuencia cero, como se muestra en la Figura 1-40. Si el devanado secundario está conectado en forma de Y y el punto neutro no está conectado a tierra, no importa que los terminales de estos devanados se hayan dejado abiertos o estén cortocircuitados. En cualquier caso, no contribuyen a la excitación de secuencia cero porque el punto neutro de la conexión en estrella está en circuito abierto.

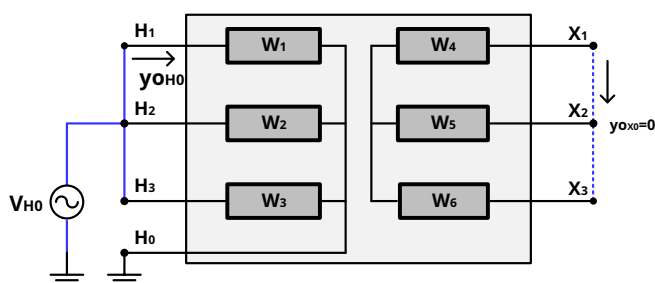


Figura 1-40- Prueba de impedancia homopolar para un transformador de dos devanados con Yg-Y conexión

En consecuencia, la impedancia de secuencia cero para un transformador Yg-Y a través de la impedancia de tierra en el devanado primario es:

que se puede encontrar a partir de mediciones de prueba de circuito abierto de secuencia cero, mientras que es cero

Para determinar los parámetros de secuencia cero, ambos puntos neutros en un transformador YY se han conectado a tierra (Yg-Yg). Se recomiendan tres pruebas, una prueba de circuito abierto de cada lado y una prueba de cortocircuito (preferiblemente del lado de alto voltaje) en IEEE C57.12.90, Sección 9.5.3, como se analiza a continuación:

- 1) Prueba de circuito abierto desde el lado de alto voltaje: Cortocircuite H1, H2 y H3, y deje abiertos X1, X2 y X3, como se muestra en la Figura 1-41-a. Aplique voltaje a los terminales del lado de alto voltaje y mida el voltaje, la corriente y la potencia activa en el terminal del transformador. Calcular como se indica en la Figura 1-41-b y las ecuaciones que siguen.

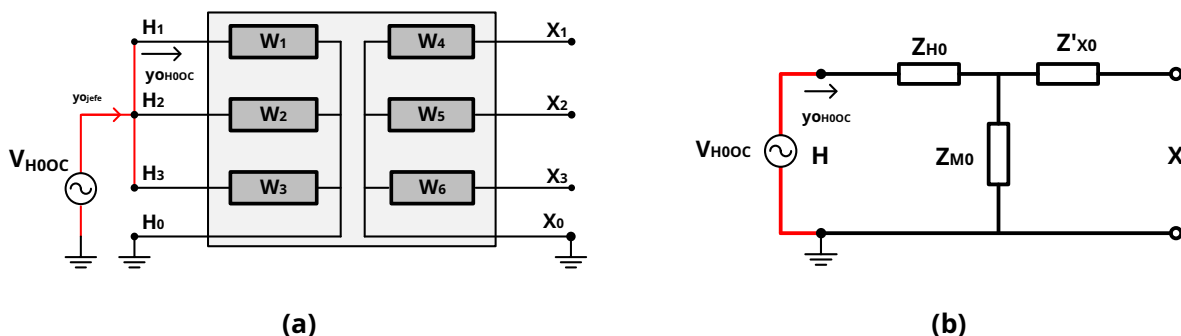


Figura 1-41- Prueba de impedancia de secuencia cero: Prueba de circuito abierto desde el lado de alta tensión, a) Conexión de terminales, b) Circuito equivalente

- 2) Prueba de circuito abierto desde el lado de bajo voltaje: Deje abiertos H1, H2 y H3 y cortocircuite X1, X2 y X3, como se muestra en la Figura 1-42-a. Aplique voltaje a los terminales de bajo voltaje y mida el voltaje, la corriente y la potencia activa en el terminal del transformador. Calcular como se indica en la Figura 1-42-b y las ecuaciones que siguen.

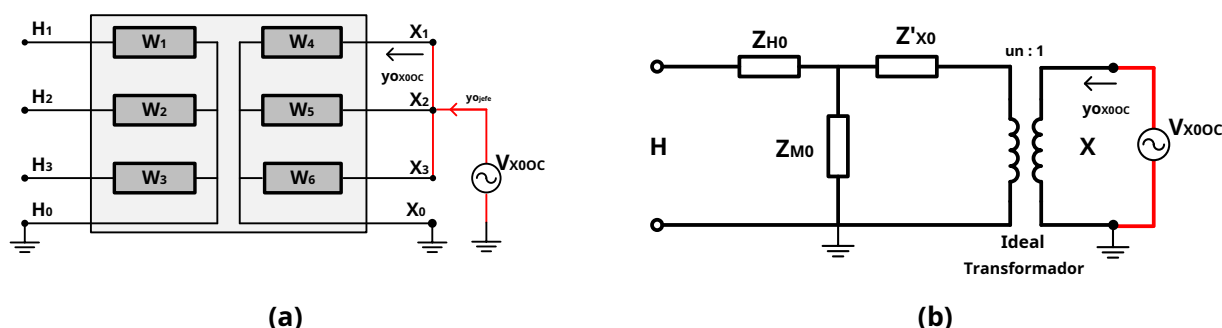


Figura 1-42- Prueba de impedancia de secuencia cero: Prueba de circuito abierto desde el lado de baja tensión, a) Conexión de terminales, b) Circuito equivalente

- 3) Prueba de cortocircuito del lado de alta tensión: Cortocircuito H1, H2 y H3, y cortocircuito X1, X2 y X3, y también X0, como se muestra en la Figura 1-43-a. Aplique voltaje a los terminales de alto voltaje y mida el voltaje, la corriente y la potencia activa en el terminal del transformador. Calcule, como se indica en la Figura 1-43-b y las ecuaciones que siguen.

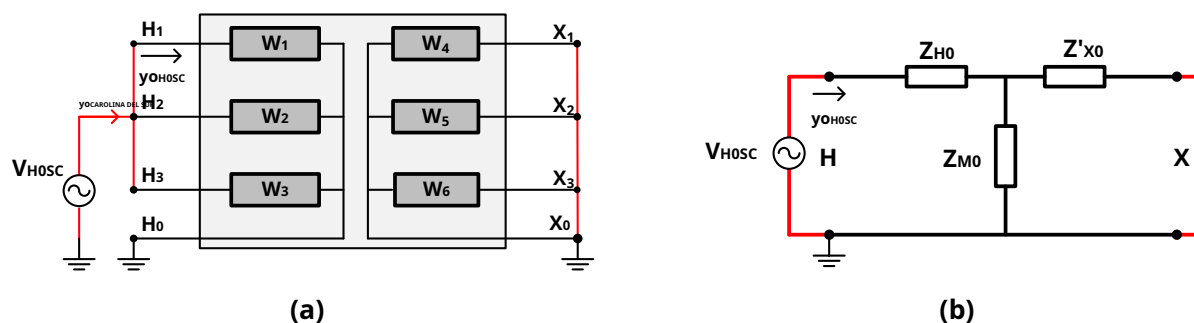


Figura 1-43- Prueba de impedancia de secuencia cero: Prueba de Cortocircuito desde el lado de alta tensión, a) Conexión de terminales, b) Circuito equivalente

Ahora, los parámetros del circuito equivalente de secuencia cero se pueden encontrar a partir de estos valores de la siguiente manera [12]:

En la práctica, los parámetros de secuencia cero tienen las siguientes características interesantes:

- 1) Las impedancias de circuito abierto medidas desde los lados de alto y bajo voltaje difieren más de lo esperado debido a la disposición física de los devanados de alto y bajo voltaje en un transformador de núcleo de tres patas apilado. En una secuencia positiva o una secuencia negativa para un transformador bien diseñado, se espera que sean iguales.
- 2) La suma de las impedancias en serie de secuencia cero es aproximadamente igual a la impedancia en serie de secuencia positiva o de secuencia negativa. Pero, una de estas impedancias puede tener un valor negativo.
- 3) La impedancia de derivación es considerablemente resistiva en comparación con las impedancias de derivación de secuencia positiva o negativa debido a las pérdidas por corrientes de Foucault en las paredes del tanque.

d) Circuito equivalente de modelo π de secuencia cero para un transformador Yy conectado a tierra

La figura 1-37 muestra el circuito equivalente del modelo T de secuencia cero de un transformador Yy puesto a tierra en el que los puntos neutros primario y secundario se han puesto a tierra a través de y , respectivamente. Si un punto neutro está sólidamente conectado a tierra, se supone que la impedancia de tierra asociada es cero en este modelo, al igual que las ecuaciones.

El circuito equivalente del modelo π de secuencia cero se puede derivar del modelo T usando un análisis de red de dos puertos, como se describe en el Apéndice C. En un circuito equivalente del modelo π de secuencia cero, los parámetros del modelo π deben calcularse a partir de la ecuación propuesta, que no es el método utilizado para un circuito equivalente de secuencia positiva o negativa. Esto se debe a que el enfoque propuesto para determinar los parámetros del modelo π a partir de un modelo T para un circuito equivalente de secuencia positiva o negativa es válido en condiciones específicas. Estas condiciones no son válidas para el circuito equivalente homopolar del modelo T.

1.16 Estimación de los parámetros del transformador cuando no se dispone de información

Tabla 1-3- Suposiciones hechas para datos faltantes para transformadores de dos devanados y Autotransformadores

Faltan datos	suposiciones
Tipo de núcleo/Tipo de carcasa	Todos los transformadores trifásicos son del tipo de núcleo de 3 ramas
Resultados de la prueba sin carga	$g+jb=0+j0$ (se ignora la rama magnetizante)
Los resultados de la prueba de pérdida de carga no están disponibles	$r+jx = 0+j7\%$ (se supone que la pérdida de carga es cero)
Los resultados de la prueba de secuencia cero no están disponibles	Consulte la Tabla 1-4 para conocer las suposiciones.
El informe de la prueba de secuencia cero no especifica qué base de MVA se usa	Se utilizará la base MVA para la prueba de pérdida de carga
MVA no se da para una prueba	Se utilizará la calificación ONAN
Se realizan pruebas sin carga y con pérdida de carga en diferentes MVA	Deberían convertirse a calificaciones de la ONAN.
Las impedancias se proporcionan en ohmios Las corrientes se proporcionan en amperios El voltaje se proporciona en voltios	Deben convertirse a por unidad.
Los valores de las pruebas en vacío o las pruebas de pérdida de carga para un banco de tres transformadores monofásicos instalados como un transformador trifásico no son iguales	Se debe usar el promedio de los valores por unidad
No se proporciona la posición de toque para la prueba.	Se supone toma nominal
Los datos de impedancia del regulador de voltaje no están disponibles	La reactancia en serie (X) se supone que es igual al rango del regulador de voltaje (10%) multiplicado por la impedancia típica del transformador de potencia (7%). Entonces, por ejemplo, se usará $x=0.007$ pu para un regulador de voltaje con un rango de control de voltaje de $\pm 10\%$. La resistencia en serie (r) se calcula a partir de la prueba de pérdida de carga.
No se proporciona el rango de salida del regulador de voltaje y/o el número de pasos de derivación	Se supone un rango de salida de $\pm 10\%$ y 17 pasos de derivación
Los datos de impedancia del regulador de voltaje se dan tanto para la toma más alta como para la toma más baja	La impedancia obtenida de la prueba de derivación más baja se utiliza en el modelo.

Tabla 1-4- Supuestos para un modelo de secuencia cero de transformadores de dos devanados y Autotransformadores

Circuito Diagrama	Modelo aproximado de secuencia cero	
	$Z_{H0} = 0.1 - Z_{HX}$ $Z_{X0} = 0.9 - Z_{HX} - 3 - Z_{GX}$ $Z_{METRO0} = 5 - Z_{HX}$ Z_{HX} : impedancia de secuencia positiva	
	$Z_0 = 0.85 - Z_{HX} - 3 - Z_{GH}$	
	$Z_0 = 0.85 - Z_{HX}$	
	$Z_0 = 0.85 - Z_{HX} - 3 - Z_{GX}$	
	$Z_{X0} = 0.1 - Z_{HX} - 3 - \frac{-norte_1 - Z_{GRAM0(-)}}{-norte_2 - Z_{base}}$ $Z_{H0} = 0.9 - Z_{HX} - 3 - \frac{-norte_1 - Z_{GRAM0(-)}}{-norte_2 - Z_{base}}$ $Z_{mes} = 5 - Z_{HX} - \frac{3Z_{GRAM0(-)}}{Nueva Zelanda...}$ $\frac{V_{H1}}{V_L}$ $Z_{base} = \frac{-V_{L(kV)}^2}{AMEU}$ reguladores de voltaje VL es el voltaje en la derivación mínima	Para
	$Z1 = (-norte_1) - Z_{0SE}$ $Z2 = (-norte) - Z_{0SE}$ $Z3 = Z_{0SE}$ $\frac{norte}{V_L}$ se supone basado en [8]	

IEC-60076-8-1997, Sección 4, página 41, propone valores típicos de impedancia de secuencia cero para transformadores con diferentes tipos de conexión.

1.17 Interpretación de los informes de prueba de transformadores

La información en la Tabla 1-5 debe proporcionarse en un informe de prueba del transformador para que los parámetros del transformador puedan determinarse a partir de él. Esta información no siempre se informa. En tales casos, los datos requeridos y/o los parámetros del transformador deben estimarse de acuerdo con la Norma como se describe en la Tabla 1-3. Sin embargo, no es necesario informar todos estos datos en un informe de prueba. Por ejemplo, la reactancia por unidad, , no se suele informar. Dado que las pérdidas de carga dependen de la temperatura del transformador, es necesario que el informe de la prueba establezca claramente la temperatura de prueba del transformador, que se denomina temperatura de referencia y se indica con . Como se describe en la Sección 1.15.1, según IEEE C57.12.00, la temperatura de referencia para transformadores de potencia es de 85 °C. Esta norma aclara que siempre que se cumplan las dos condiciones siguientes, la variación de temperatura encontrada al realizar la prueba no afectará las pérdidas de carga:

- 1) La temperatura promedio del aceite está dentro de ± 10 °C de .
- 2) La diferencia entre la temperatura del aceite superior e inferior no supera los 5 °C.

Si las pruebas se han realizado a una temperatura distinta de 85 °C y no se cumple una de estas dos condiciones, las pérdidas sin carga medidas deben corregirse utilizando el método propuesto en IEEE C57. 12.90, Sección 8.4.

Tabla 1-5- Lista de información requerida para determinar los parámetros del transformador

Cantidad	Nombre en el informe	Unidad	Proceso de medición	Símbolo
sin carga emocionante Actual	O % corriente excitante	% como unidad	Prueba de circuito abierto medida al 100 % de la tensión nominal	
Sin pérdidas de carga	Sin carga (kW)	kilovatios	Prueba de circuito abierto medida al 100 % de la tensión nominal	
DC resi postura	Resistencia o Resistencia por fase	-	Prueba DC en cada devanado (conjunto de devanados en transformadores trifásicos)	y
Potencia base de prueba	prueba de AMEU	AMEU	Prueba de circuito abierto y prueba de cortocircuito	y
Cortocircuito voltaje de prueba	O voltaje de impedancia	% como unidad	Prueba de cortocircuito medida al 100 % de la corriente nominal	
Pérdidas de carga	Pérdidas de carga	kilovatios	Prueba de cortocircuito medida al 100 % de la corriente nominal	
Reactancia en serie por unidad		% como unidad	Prueba de cortocircuito medida al 100 % de la corriente nominal	

1.18 Relación X/R en Transformadores de Potencia

En los sistemas de potencia, las relaciones X/R son más altas para las unidades generadoras y los transformadores y más bajas para las líneas de transmisión. Por lo general, cuanto menor sea el voltaje, menor será la relación X/R. La relación X/R de una subestación puede variar considerablemente, pero siempre será menor que la relación X/R del transformador porque gran parte de la contribución del cortocircuito proviene de las líneas de transmisión que tienen una relación X/R más baja que la de un transformador. Generalmente, en una estación de generación o una subestación con muchos transformadores la relación X/R es bastante alta.

La relación X/R para transformadores de potencia puede estar entre aproximadamente 15 y 125, más baja para transformadores más pequeños y transformadores de bajo voltaje y más alta para transformadores más grandes y transformadores de alta potencia. ANSI/IEEE C37.010-1979, página 42, recomienda el rango típico de la relación X/R

para un transformador de potencia, pero debido a las evaluaciones de pérdidas más altas que se usan actualmente, las relaciones X/R, particularmente para unidades más grandes, pueden ser considerablemente más altas que esta recomendación.

Con base en una revisión de las relaciones X/R de más de 900 transformadores en el sistema de energía de Alberta, la relación máxima puede tomarse como se sugiere en la Figura 1-44. La curva IEEE que se muestra en esta figura es el rango máximo recomendado en IEEE C37.010.

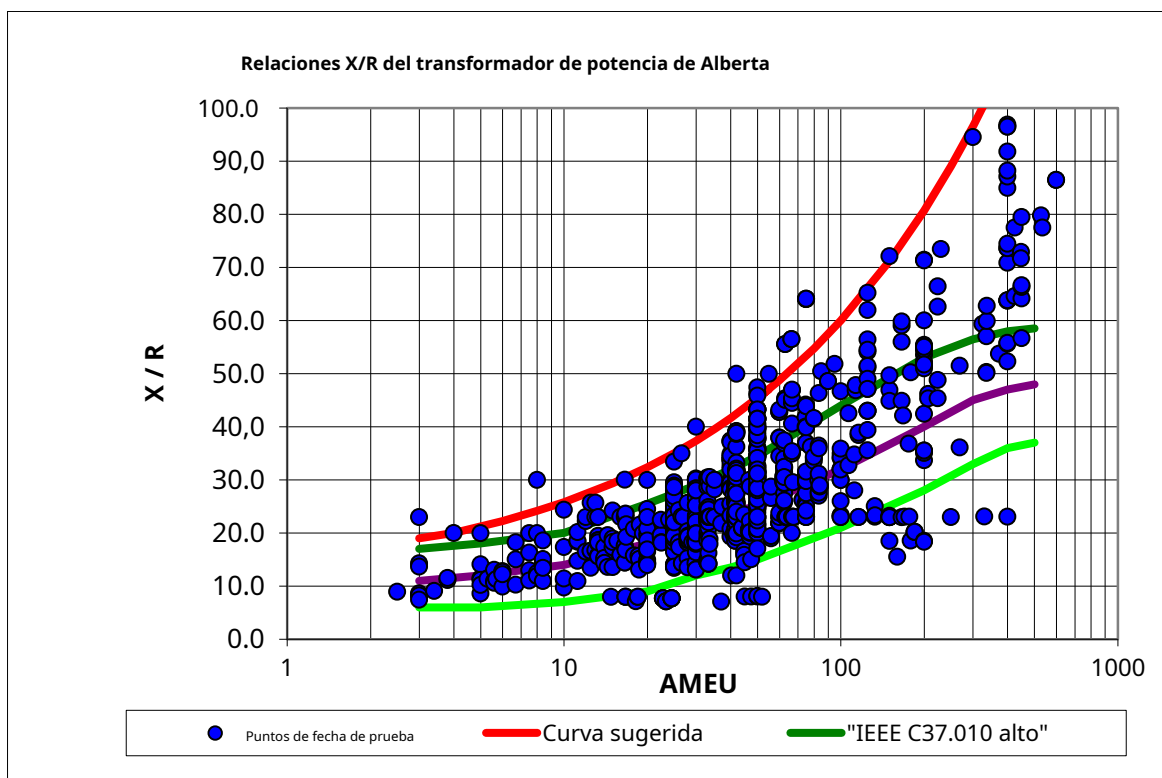


Figura 1-44- Las relaciones X/R recomendadas

1.19 Otros tipos de aplicaciones de transformadores

Los transformadores se pueden clasificar según su ubicación, su función general en los sistemas de potencia y/o su aplicación específica. A continuación se presentan diferentes tipos de transformadores según su función y aplicación. (La información técnica y el análisis de cada tipo de transformador se puede encontrar en [6].) En esta guía, los transformadores se clasifican según su número de fases y devanados, por ejemplo, monofásicos, trifásicos, de dos devanados, de tres devanados, etc.

1.19.1 Transformadores generadores

Los transformadores del generador se conectan directamente a la fuente de suministro de energía y pueden ser transformadores de alta pérdida. La energía generada en las centrales eléctricas o estaciones de generación está en el rango de 11 a 25 kV, y para la transmisión, el nivel de voltaje debe aumentarse a unos pocos cientos de kilovoltios mediante transformadores generadores. Los transformadores de generadores suelen estar provistos de cambiadores de tomas fuera de circuito para variaciones pequeñas e infrecuentes en el voltaje. Los cambiadores de tomas bajo carga no pueden ser

requerido porque el voltaje puede ser controlado por la excitación del generador. Si es necesario, se puede usar un cambiador de tomas en carga para proporcionar control de potencia reactiva para el sistema de potencia. El devanado de bajo voltaje generalmente está conectado en delta porque el circuito está conectado a tierra a través del neutro del generador. En el lado de alto voltaje, este tipo de transformador generalmente está conectado en estrella porque este circuito está conectado a tierra de alguna manera. El diseño de los transformadores de generadores debe tener en cuenta cualquier sobreexcitación que pueda ocurrir durante la operación.

1.19.2 Transformadores auxiliares de la unidad

Se requieren transformadores auxiliares de la unidad para alimentar varias cargas asociadas con cada generador. El transformador reductor está conectado directamente al circuito del generador y proporciona energía. El voltaje secundario depende del diseño utilizado, pero normalmente es de 6,9 kV o algo así. Los kVA nominales de los transformadores auxiliares de la unidad son aproximadamente el 15% de la capacidad de generación. Suelen estar llenos de aceite, y por el peligro de incendio en caso de avería, por lo general se ubican al aire libre.

Los transformadores auxiliares alimentan varios tipos de equipos auxiliares en las centrales eléctricas. Son transformadores reductores conectados directamente al generador y brindan suministro de servicio a la estación (típicamente 6.9 kV). Los kVA nominales de los transformadores auxiliares de la unidad son aproximadamente el 15% de la capacidad de generación. Estos transformadores suelen ser transformadores exteriores y hay una unidad de transformador auxiliar presente para cada unidad generadora.

1.19.3 Transformadores de Distribución

Los transformadores de distribución juegan un papel importante en la reducción de voltaje. Un transformador de distribución reduce el voltaje a 120/240 voltios monofásicos para clientes residenciales ya 480/277 o 208Y/120 voltios para clientes comerciales o de industria ligera. Los transformadores de distribución pueden variar en tamaño; la mayoría están en el rango de 5 kVA monofásico a 2500 kVA. Vienen en configuraciones monofásicas y trifásicas y pueden montarse en pedestal o en poste, la aplicación más común. Los transformadores trifásicos tipo pedestal se utilizan con un circuito primario subterráneo. Tres transformadores monofásicos montados en postes para servicio aéreo generalmente se instalan en una bóveda subterránea en grandes ciudades o en grandes concentraciones de negocios. Luego, la energía se envía a través de cables subterráneos a cada cliente.

La mayoría de los transformadores de distribución están contruidos en forma de carcasa. Por lo general, tienen dos, tres o cuatro bujes secundarios, y las clasificaciones de voltaje más comunes son 240 V y 480 V, con o sin una conexión de derivación media. La Figura 1-45 muestra varias conexiones secundarias monofásicas [6]. Un transformador con dos bushings puede suministrar solo un voltaje a la carga; un transformador con tres casquillos puede suministrar un solo voltaje con una derivación en el punto medio del voltaje. Este tipo de transformador se usa ampliamente para suministrar sistemas residenciales de tres hilos en América del Norte. Como se puede ver en la Figura 1-45, el secundario 120/240 puede suministrar carga a 120 V o 240 V. El voltaje secundario para transformadores tipo pedestal suele ser 240/120 V o 480/240 V. Algunos transformadores pueden tener un secundario con cuatro casquillos que se pueden conectar entre sí para proporcionar una conexión de derivación media con uno o dos casquillos en común. El secundario de cuatro bujes puede designarse como 120/240 V o 240/480 V.

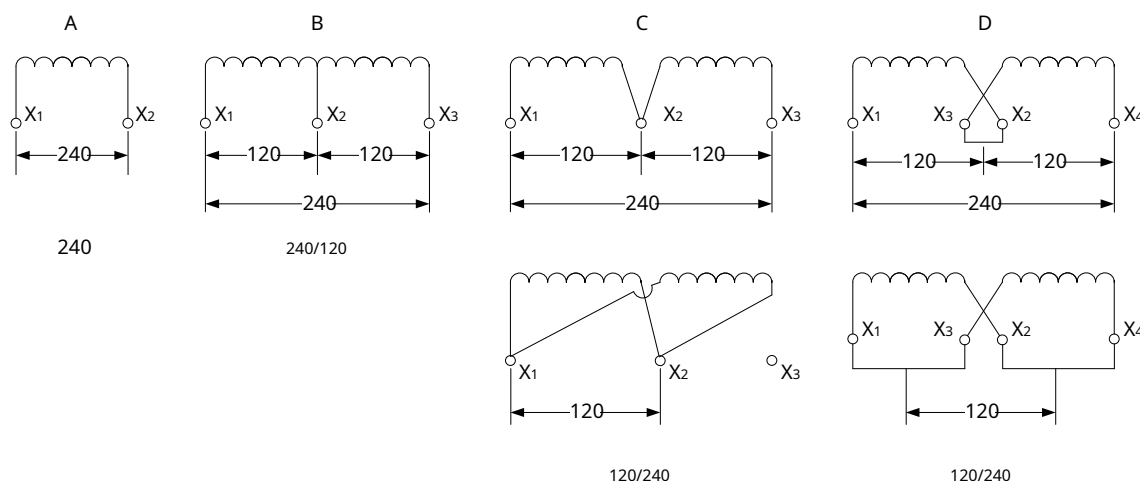


Figura 1-45- Conexiones secundarias monofásicas

Los transformadores de distribución utilizan conductores de cobre o aluminio y pueden ser de tipo seco o líquido. Los transformadores de tipo seco suelen ser más pequeños, no generan mucho calor y se pueden ubicar en un espacio confinado en la ubicación del cliente. Se utilizan como auxiliares en centrales generadoras y en aplicaciones industriales. Los transformadores de tipo líquido suelen tener aceite que rodea el núcleo del transformador y los conductores para enfriar y aislar eléctricamente el transformador. Por lo general, son más grandes que los transformadores de tipo seco y necesitan más que aire para evitar el sobrecalentamiento. Una de las principales ventajas de los transformadores de distribución es que normalmente pueden soportar sobrecargas.

1.19.4 Transformadores de Subestación Fuente de Distribución

Los transformadores de la subestación fuente de distribución (estación receptora) son básicamente transformadores reductores que reducen el voltaje de transmisión o subtransmisión al nivel del alimentador primario (por ejemplo, 25 kV). Algunos pueden abastecer directamente plantas industriales. Las cargas en estos transformadores varían en límites más amplios y sus pérdidas son costosas. Por lo general, es necesario el cambio de toma automático con carga, y su rango de toma es alto para tener en cuenta la amplia variación de voltaje.

1.19.5 Transformadores de desplazamiento de fase

Los transformadores de cambio de fase ayudan a controlar el flujo de energía real sobre las líneas de transmisión y los interconexiones de los sistemas al variar el ángulo de fase entre los voltajes de entrada y salida del transformador. A través de un cambio de toma adecuado, el voltaje de salida puede adelantarse o atrasarse con respecto al voltaje de entrada. La cantidad de cambio de fase requerida afecta directamente la clasificación y el tamaño del transformador.

Los transformadores de cambio de fase se utilizan en redes en las que se produce un intercambio intensivo de potencia debido a la desregulación. Estos transformadores están disponibles con regulación directa o indirecta asimétrica y con regulación directa o indirecta simétrica. Un transformador desfasador consta de dos transformadores, uno asociado a los terminales de línea y otro al cambiador de tomas.

Hay dos tipos de diseños para transformadores de cambio de fase: de un solo núcleo y de dos núcleos. El diseño de un solo núcleo se utiliza para cambios de fase pequeños y clasificaciones de voltaje/MVA pequeñas. El de dos núcleos

El diseño se utiliza para transferencias de energía a granel con grandes clasificaciones de MVA/voltaje. El alcance del producto depende de las especificaciones y requisitos técnicos. Sin embargo, las especificaciones técnicas y las restricciones de transporte determinan si el transformador seleccionado para una aplicación es un diseño de tanque único, tanque doble o tanque triple.

1.19.6 Transformadores de interconexión

Los transformadores de interconexión conectan dos redes o sistemas de diferentes clases de tensión (por ejemplo, 240 kV y 500 kV). Son autotransformadores que proporcionan la conversión de tensión y el control de tensión necesarios. Los transformadores de interconexión se encuentran normalmente en sistemas de transmisión y subtransmisión (clases de tensión de 500 kV, 240 kV, 138 kV y 69 kV)

En los autotransformadores no existe aislamiento eléctrico entre los devanados primario y secundario; por lo tanto, los autotransformadores se vuelven más económicos a medida que la relación entre el voltaje secundario y el voltaje primario se aproxima a la unidad. Cuando se utilizan como transformadores de interconexión, se caracterizan por un amplio rango de tomas y un devanado terciario adicional que puede cargarse o descargarse. El terciario descargado actúa como un devanado estabilizador proporcionando un camino para las corrientes del tercer armónico.

1.19.7 Transformadores de puesta a tierra

Los transformadores de puesta a tierra (puesta a tierra) se utilizan para proporcionar una ruta de tierra a un sistema "Y" no puesto a tierra o conectado en delta para facilitar la puesta a tierra y la detección de una falla a tierra. Por lo general, se utilizan para hacer lo siguiente:

- 1) Proporcionar una ruta de impedancia relativamente baja a tierra, manteniendo así el sistema neutral en o cerca del potencial de tierra
- 2) Limitar la magnitud de las sobretensiones transitorias cuando se producen fallas a tierra de reencendido
- 3) Proporcionar una fuente de corriente de falla a tierra durante las fallas de línea a tierra
- 4) Permitir la conexión de cargas fase-neutro cuando se desee

Los transformadores de puesta a tierra normalmente se construyen con un devanado conectado en zigzag (Zn) con o sin un devanado auxiliar o como un devanado conectado en estrella (Ynd) con un secundario conectado en delta que puede o no usarse para suministrar energía auxiliar. La conexión en zigzag ayuda a eliminar tensiones de tercer armónico en la línea. Puede usarse sin un devanado conectado en delta o el diseño de núcleo de 5 patas que normalmente se usa para este propósito en transformadores de distribución y transformadores de potencia. Eliminar la necesidad de un devanado secundario puede hacer que esta opción sea menos costosa y más pequeña que un transformador de puesta a tierra de dos devanados comparable. El uso de un transformador en zigzag proporciona una conexión a tierra con una unidad más pequeña que un transformador estrella-triángulo de dos devanados que proporciona la misma impedancia de secuencia cero.

Los transformadores de puesta a tierra conectados en estrella requieren un secundario conectado en delta o la aplicación de una construcción de núcleo de 4 o 5 patas para proporcionar una ruta de flujo de retorno para la carga desequilibrada asociada con esta conexión primaria. Dado que a menudo es deseable proporcionar energía auxiliar desde el devanado secundario del transformador de puesta a tierra, este beneficio puede llevar al usuario final a especificar un transformador de puesta a tierra de dos devanados en lugar de una conexión en zigzag. Esta conexión se suele utilizar en

parques eólicos. Tanto los transformadores de puesta a tierra en zigzag como los de dos devanados pueden tener la capacidad de proporcionar energía auxiliar, y esto puede ser una carga conectada en estrella o en triángulo.

En la práctica, el transformador estilo Scott-T puede proporcionar un punto neutro, pero no es rentable en comparación con los métodos mencionados anteriormente. El uso de un transformador en zigzag suele ser el método menos costoso. Se puede pedir como unidad trifásica o como tres unidades monofásicas individuales.

1.19.8 Transformadores convertidores

a) Transformadores Rectificadores

Los transformadores rectificadores se utilizan en aplicaciones en las que el voltaje secundario debe variar en un amplio rango a un valor de corriente constante de CC, como fundiciones de aluminio y plantas químicas en industrias electrolíticas. Recientemente, se han combinado con diseños de rectificador de diodo o tiristor. La fabricación de transformadores rectificadores presenta desafíos debido a las características especiales de este tipo de transformador, tales como arreglos de devanados complejos, alta corriente y efectos de campo errante asociados, pérdidas adicionales y efectos de calentamiento debido a los armónicos, y la necesidad de mantener una corriente continua constante.

Los transformadores rectificadores pueden tener dos devanados secundarios con solo una vuelta en cada uno. En consecuencia, los devanados de derivación están en el devanado primario debido al número muy bajo de vueltas y al alto valor de corriente en los devanados secundarios. Los devanados de derivación pueden estar en el devanado primario o en un autotransformador separado que se puede ubicar en el mismo tanque. Se pueden usar varios arreglos de circuito para regular el voltaje secundario [7].

b) Transformadores convertidores HVDC

Los transformadores convertidores HVDC son un tipo especial de transformador construido de acuerdo con IEEE C57.129. Los requisitos detallados para los transformadores convertidores de HVDC los especifica el proveedor de HVDC y están fuera del alcance de este documento. En principio, son similares a otras unidades de devanados múltiples, pero están sujetos a pérdidas y corrientes armónicas significativas.

Los transformadores convertidores HVDC son un componente clave de las estaciones convertidoras en los sistemas de transmisión HVDC. Los transformadores HVDC reaccionan como un elemento de acoplamiento entre las redes de CA conectadas y los rectificadores de alta potencia; por lo tanto, operan con el esfuerzo eléctrico de cd aplicado además del esfuerzo de ca, y debido a esto es necesario un diseño de aislamiento especial. Los transformadores convertidores suelen tener una reactancia de fuga de alrededor del 10-18 % para limitar la corriente durante una falla de cortocircuito en el lado de CC. Estos transformadores también están sujetos a altos niveles de armónicos en la corriente de carga. Según el voltaje y la potencia transferida, los transformadores HVDC se construyen como unidades monofásicas o trifásicas y pueden tener uno o dos devanados de válvula por fase. La variación de voltaje se realiza mediante la aplicación de cambiadores de tomas bajo carga.

1.19.9 Otros tipos de transformadores

a) Transformadores de servicio de horno

Los transformadores de servicio de horno son un tipo especial de transformador que tiene una corriente de bajo voltaje muy alta. Se utilizan en la industria siderúrgica para fundir chatarra y refinar acero como transformadores de horno de arco de CA o CC. Se pueden utilizar en hornos de inducción con diferentes diseños y funciones. Los transformadores para uso en hornos se caracterizan por un voltaje secundario bajo (80 a 1000 V) y una corriente alta, según la clasificación de MVA del transformador. En estos transformadores, generalmente se usa acero no magnético para el tanque, y generalmente se usa una terminación de cable de bajo voltaje para eliminar los puntos calientes y minimizar las pérdidas por dispersión. Las barras colectoras de alta corriente están intercaladas para reducir la reactancia de fuga.

b) Transformadores de locomotoras

Los transformadores de locomotora se montan en el compartimiento del motor de las locomotoras. El primario se alimenta de una línea aérea y este tipo de transformador reduce el voltaje a un nivel apropiado para alimentar un rectificador de CC. El voltaje de CC de salida del rectificador impulsa la locomotora.

c) Reactores en Serie

Los reactores en serie están conectados en serie con líneas de transmisión, alimentadores o generadores para limitar las corrientes de falla. Deben tener características magnéticas lineales en condiciones de falla. Los reactores en serie también se utilizan en líneas de transmisión HVDC como reactores de suavizado y se conectan entre el convertidor y la línea de CC. Suelen ser transformadores de un solo devanado.

d) Reactores de derivación

Los reactores de derivación se utilizan para compensar la potencia reactiva capacitiva generada durante la condición de carga o la operación de conmutación en líneas de transmisión de muy alta tensión, manteniendo así el perfil de tensión en el nivel deseado. También se utilizan en estructuras de filtro de armónicos, particularmente en estaciones convertidoras de tecnología HVDC de convertidor conmutado por línea. Los reactores de derivación pueden tener un diseño sin núcleo (núcleo de aire) o de núcleo con separación (circuito magnético con separación no magnética). Son similares a los reactores en serie en que generalmente son transformadores de núcleo abierto o de núcleo de aire de un devanado. Están diseñados para tener características de impedancia constante, incluso hasta 1,5 veces la tensión nominal, para operar en el área lineal y minimizar la corriente armónica generada en condiciones de sobretensión.

2 Determinación de parámetros de baja frecuencia de transformadores de dos devanados

2.1 Introducción

En la primera sección de esta guía, se explicaron los conceptos básicos de los transformadores y se proporcionó la información básica necesaria para modelar un transformador en un sistema de potencia. En esta sección se describe el modelado de transformadores de potencia monofásicos y trifásicos de dos devanados.

En la primera sección se proporcionó una descripción general de un transformador monofásico. En esta sección, se proporciona una descripción técnica y se propone un modelo genérico práctico que incluye relaciones de derivación primaria y secundaria. Para cada tipo de transformador se describe el esquema de conexión; luego se presenta el circuito equivalente genérico del transformador, el cual formará la base del modelo genérico para ese tipo de transformador. Se proporciona el procedimiento sobre cómo calcular los parámetros a partir de los resultados de las pruebas para el modelo genérico y se proporcionan datos prácticos del transformador para cada tipo de transformador. El sistema pu para modelos genéricos se define en base a la base de tensión del devanado.

2.2 Transformadores Monofásicos

Un transformador monofásico consta de dos devanados enrollados alrededor de un núcleo. El modelado de un transformador para estudios de sistemas de potencia no transitorios se lleva a cabo para determinar los parámetros del circuito representado en la Figura 2-1, en el que se presentan los ajustes de derivación de los devanados primario y secundario. La Figura 2-1-a es el modelo simplificado y la Figura 2-1-b es el modelo π equivalente de un transformador de potencia monofásico de dos devanados en un sistema por unidad. Los procedimientos para determinar los parámetros de ambos modelos son similares. Los parámetros se determinan mediante pruebas de cortocircuito y circuito abierto, como se describe en la Sección 1.5. Aunque los circuitos se ven esquemáticamente diferentes, los procedimientos utilizados para determinar los parámetros son los mismos. En esta guía,

2.2.1 Modelo genérico de transformador monofásico de dos devanados

El modelo genérico para transformadores monofásicos descrito anteriormente se presenta en la Figura 2-1.

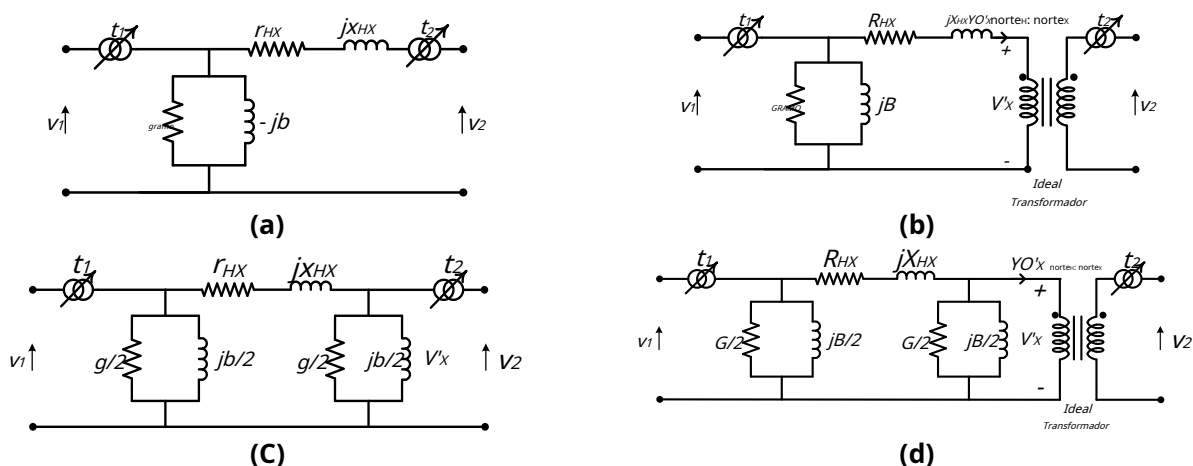


Figura 2-1- Modelos genéricos de transformadores de potencia de dos devanados en un sistema por unidad: a) modelo pu simplificado b) modelo real simplificado, c) modelo π en pu, d) modelo π en valores reales

2.2.2 Procedimiento de modelado de transformadores monofásicos de dos devanados

Para modelar un transformador monofásico de dos devanados se deben seguir los siguientes pasos:

Paso 1: Los datos del transformador enumerados en la Tabla 1-1 deben extraerse de los datos disponibles, o se deben hacer suposiciones basadas en la Tabla 1-3 y la Tabla 1-4.

Paso 2: Los parámetros del circuito equivalente deben calcularse usando las fórmulas de la Tabla 2-1.

2.3 Transformadores Trifásicos

En la práctica, la mayoría de los transformadores de potencia trifásicos son transformadores del tipo de núcleo de tres patas, aunque en transformadores muy grandes se puede requerir un núcleo de cinco patas. En esta guía, a menos que se indique lo contrario, el término transformador trifásico de dos devanados significa un transformador de dos devanados del tipo de núcleo de tres patas. Las fórmulas para calcular los parámetros del circuito equivalente de secuencia positiva y negativa son similares a las fórmulas monofásicas propuestas en la Tabla 2-1, excepto que los voltajes de línea trifásicos deben reemplazarse adecuadamente en las fórmulas.

2.4 Transformadores de dos devanados con primario en estrella y secundario en estrella

Primario en estrella y secundario en estrella es la conexión más común de transformadores trifásicos en los que los circuitos primario y secundario están en fase; es decir, no hay desplazamientos de ángulo de fase introducidos por esta conexión. Bajo un sistema balanceado, cada fase opera como un transformador monofásico separado. Los puntos neutrales en cada lado pueden estar conectados a tierra. Si el punto neutro está conectado a tierra, la conexión se designa como "GrdY". En este caso, como se mencionó en la Sección 1.9, el aislamiento cerca del punto neutro se puede graduar para reducir el costo del transformador. Esta es una ventaja de la aplicación del transformador YY en sistemas de transmisión de alto voltaje. Cabe señalar que un devanado en una conexión GrdY no debe conectarse entre dos fases. Esta limitación se expresa como GRD en la tensión nominal del transformador en la placa de identificación;

terrestre. La Figura 2-2 muestra el diagrama esquemático del transformador, la representación vectorial, el diagrama vectorial y el diagrama vectorial de desplazamiento de fase de un transformador conectado Yy. El grupo de vectores de esta conexión es Yy0. La conexión Yy también se puede conectar de manera que haya un cambio de fase de 60° entre los voltajes primario y secundario. En este caso, el grupo de vectores de esta conexión es Yy6. La Figura 2-3 muestra el diagrama esquemático del transformador, la representación vectorial, el diagrama vectorial y el diagrama vectorial de desplazamiento de fase de un transformador Yy0.

En la práctica, el problema asociado con el transformador tipo núcleo con conexión Yy es que el componente de secuencia cero no se puede eliminar fácilmente. Si ocurre una falla de línea a tierra, a través de la acción del transformador, la corriente de falla fluiría en el tanque del transformador. La instalación de un devanado terciario conectado en delta en la estructura del transformador elimina esta condición.

Tabla 2-1- Fórmulas para calcular los parámetros del modelo genérico de un transformador a partir de una prueba
Reporte

Escribe	Parámetros por unidad (base nominal de devanado)	Parámetros en Unidades SI ₁
bobinados fuga impedancia	y	$\frac{P_{H-X}}{V_{jefe}^2} - \frac{P_{H-X}}{V_{jefe}^2} - \frac{P_{H-X}}{V_{jefe}^2}$ está en pérdidas de carga MVA base
Pérdidas de carga equivalente resistencia	_____ PU	$\frac{P_{H-X}}{V_{jefe}^2} - \frac{P_{H-X}}{V_{jefe}^2} - \frac{P_{H-X}}{V_{jefe}^2}$
bobinados fuga resistencia reactiva	$X_{H-X} = \begin{cases} -\%yo_X/100 \text{ si se da} \\ -\text{de lo contrario } \sqrt{\left(\frac{\%yo_Z}{100}\right)^2 - r_2^2} \end{cases}$ PU	$X_{H-X} = \begin{cases} -\%yo_X/100 - Z_{Base H} \text{ si } \%yo_X \text{ dado} \\ -\text{de lo contrario } \sqrt{Z_{H-X}^2 - R_{H-X}^2} \end{cases}$ está en pérdidas de carga MVA base
Magnetizando rama entrada	$y = \frac{P_{H-X}}{V_{jefe}^2} - \frac{P_{H-X}}{V_{jefe}^2} - \frac{P_{H-X}}{V_{jefe}^2}$ _____ $\%yo_{Exc} / 100$ PU	$Y_X = \frac{y_{jefe}}{V_{jefe}} - \frac{\%yo_{Exc} / 100}{Z_{Base X}} \quad \text{ó} \quad Y_H = \frac{\%yo_{Exc} / 100}{Z_{Base H}}$ están sin carga MVA base
Sin carga pérdidas equivalente conductancia	$\frac{P_{H-X}}{V_{jefe}^2} - \frac{P_{H-X}}{V_{jefe}^2} - \frac{P_{H-X}}{V_{jefe}^2}$ _____ PU	Fase única $G_{H-X} = \frac{P_{H-X}}{V_{jefe}^2} - \frac{P_{H-X}}{V_{jefe}^2} - \frac{P_{H-X}}{V_{jefe}^2}$ Tres fases $G_{H-X} = \frac{P_{H-X}}{V_{jefe}^2} - \frac{P_{H-X}}{V_{jefe}^2} - \frac{P_{H-X}}{V_{jefe}^2}$

Escribe	Parámetros por unidad (base nominal de devanado)	Parámetros en Unidades SI ¹
		$X_{GRAMO} = \frac{PAGS_{\text{puises Bajos (kilovoltios)}}}{V_{X \text{ clasificado (kV)}}^2 - 1000} \quad \Omega$ $X_{GRAMO_H} = \frac{PAGS_{\text{puises Bajos (kilovoltios)}}}{V_{\text{Clasificación H (kV)}}^2 - 1000} \quad \Omega$
Magnetizando rama susceptancia	$b - y \sqrt{z - \text{gramo}} \quad 2PU$	$B_X = \frac{1}{X} \sqrt{z - \text{GRAMO}_X} \quad \Omega \text{ o}$ $B_H = \frac{1}{X_H} \sqrt{z - \text{GRAMO}_H} \quad \Omega$

1- Tenga en cuenta que se supone que la prueba de cortocircuito se realiza desde el lado de alta tensión y la prueba sin carga se realiza desde el lado de baja tensión. Por lo general, esto no se declara claramente porque en los informes de prueba, la corriente de excitación medida y el voltaje de impedancia generalmente se informan por unidad.

Para transformadores de dos devanados, los parámetros con subíndices son los mismos que los parámetros con

2.4.1 Transformador YY de dos devanados: modelo genérico de secuencia positiva y negativa

El modelo genérico de un transformador YY trifásico de dos devanados para secuencia positiva y negativa es similar al de un transformador monofásico, como se presenta en la Figura 2-1. Este modelo genérico es aplicable para todo tipo de acometidas YY así como para el tipo coraza para el tipo núcleo de 5 patas y para tres bancos de transformadores monofásicos, independientemente de que el punto neutro esté o no puesto a tierra.

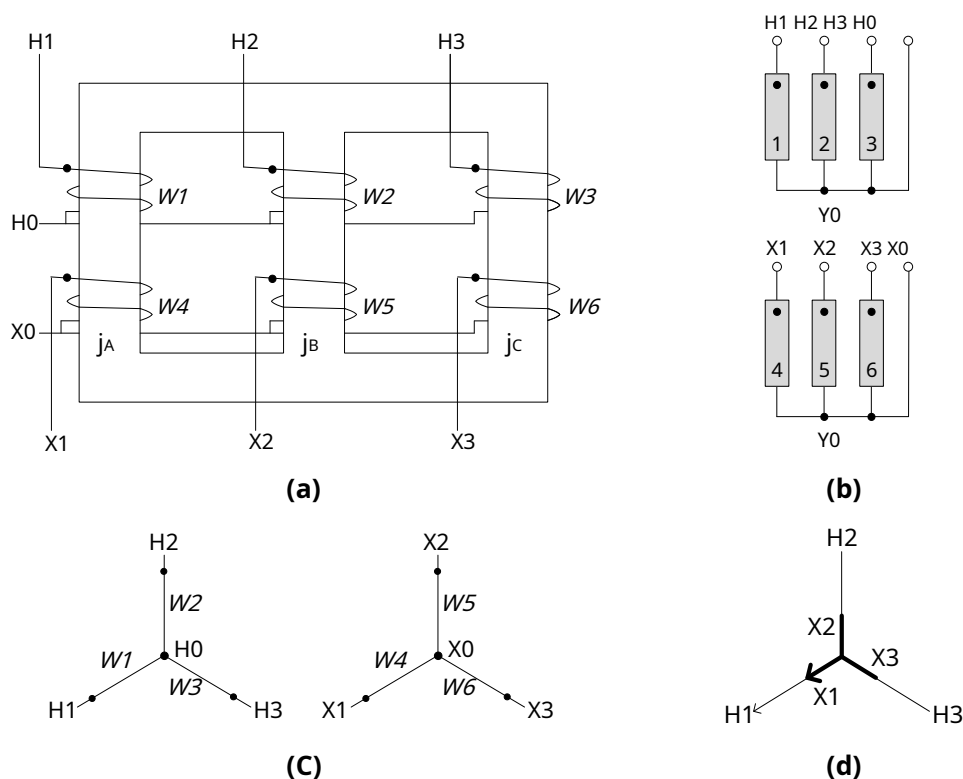


Figura 2-2- Transformador Yy0 de dos devanados con primario en estrella y secundario en estrella: a) Esquema diagrama del transformador, b) Diagrama de conexión de devanados, c) Diagrama vectorial, d) Fase diagrama vectorial de desplazamiento

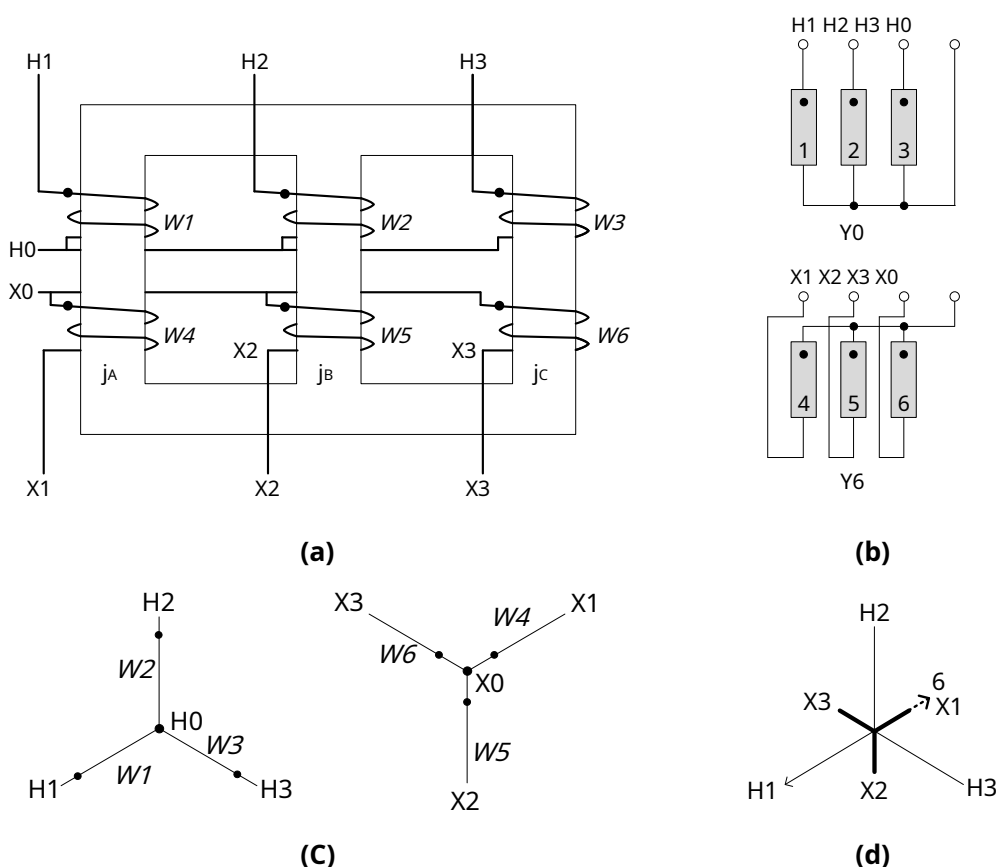


Figura 2-3- Transformador Yy6 de dos devanados con primario en estrella y secundario en estrella: a) Esquema diagrama del transformador, b) Diagrama de conexión de devanados, c) Diagrama vectorial, d) Fase diagrama vectorial de desplazamiento

2.4.2 Transformador YY de dos devanados: procedimiento para determinar los parámetros del modelo genérico

Para modelar un transformador YY trifásico de dos devanados en secuencia positiva o negativa, se deben seguir los siguientes pasos:

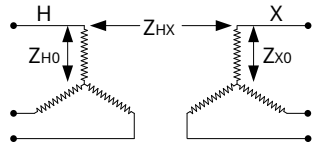
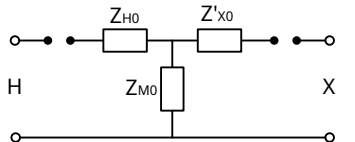
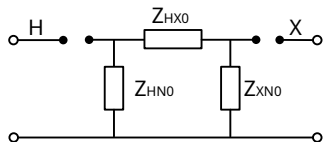
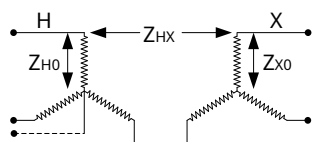
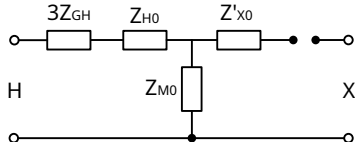
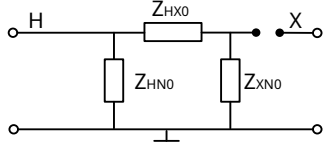
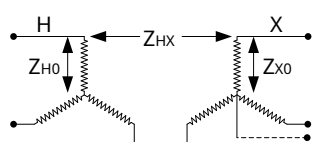
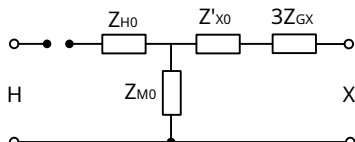
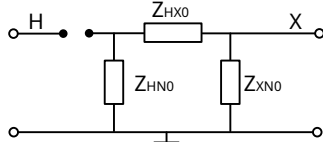
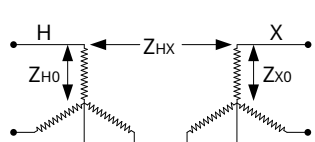
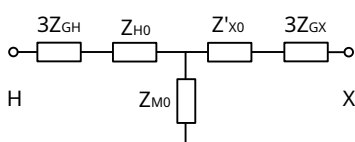
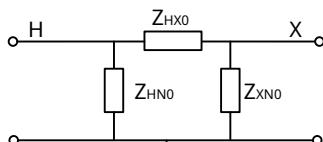
Paso 1: Los datos del transformador enumerados en la Tabla 1-1 deben extraerse de los datos disponibles, o se deben hacer suposiciones basadas en la Tabla 1-3 y la Tabla 1-4.

Paso 2: Los parámetros del circuito equivalente deben calcularse usando las fórmulas de la Tabla 2-1. Paso 3: Los parámetros de secuencia cero deben calcularse como se describe en la siguiente sección.

2.4.3 Transformador YY de dos devanados: circuito equivalente de secuencia cero

Hay cuatro tipos de conexión YY dependiendo de si el punto neutro en ambos lados está conectado a tierra o no. Algunos pueden no ser prácticos. Los cuatro tipos se enumeran en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2- Circuitos equivalentes de secuencia cero de transformadores YY

	Tipo de conexión	Modelo T	Modelo π	
1				Yy
2				YN-y
3				Y-y
4				YN-yn

2.4.4 Ejemplo 1: un transformador Yy0 práctico de dos devanados

La Figura 2-4 muestra la información de la placa de identificación de un Y de dos devanados de 138/26.5 kV, 15/20/25 MVA.^{norte}y norte- transformador conectado. El diagrama esquemático y el diagrama vectorial de este tipo de transformador se muestran en la Figura 2-2. Las tensiones nominales de los devanados primario y secundario son de 138 kV y 26,5 kV, respectivamente. El aislamiento del devanado en ambos lados está graduado; por lo tanto, los puntos neutros deben estar conectados a tierra en ambos lados; de lo contrario, el aislamiento del devanado no soportará la tensión normal durante condiciones de funcionamiento desequilibradas en la red. El informe de prueba de dos páginas del transformador se muestra en la Figura 2-21-a y la Figura 2-21-b.

El informe muestra que la prueba de pérdidas de carga se ha realizado para tres posiciones de derivación, incluida la relación de derivación nominal y voltajes nominales de $\pm 10\%$. En consecuencia, las resistencias de cd de los devanados de alto y bajo voltaje se han medido y enumerado en el informe de prueba. Para determinar los parámetros del modelo genérico del transformador, solo se utilizan los resultados de la prueba de relación de derivación nominal. En este transformador, la relación de derivación nominal es la posición de derivación 9.

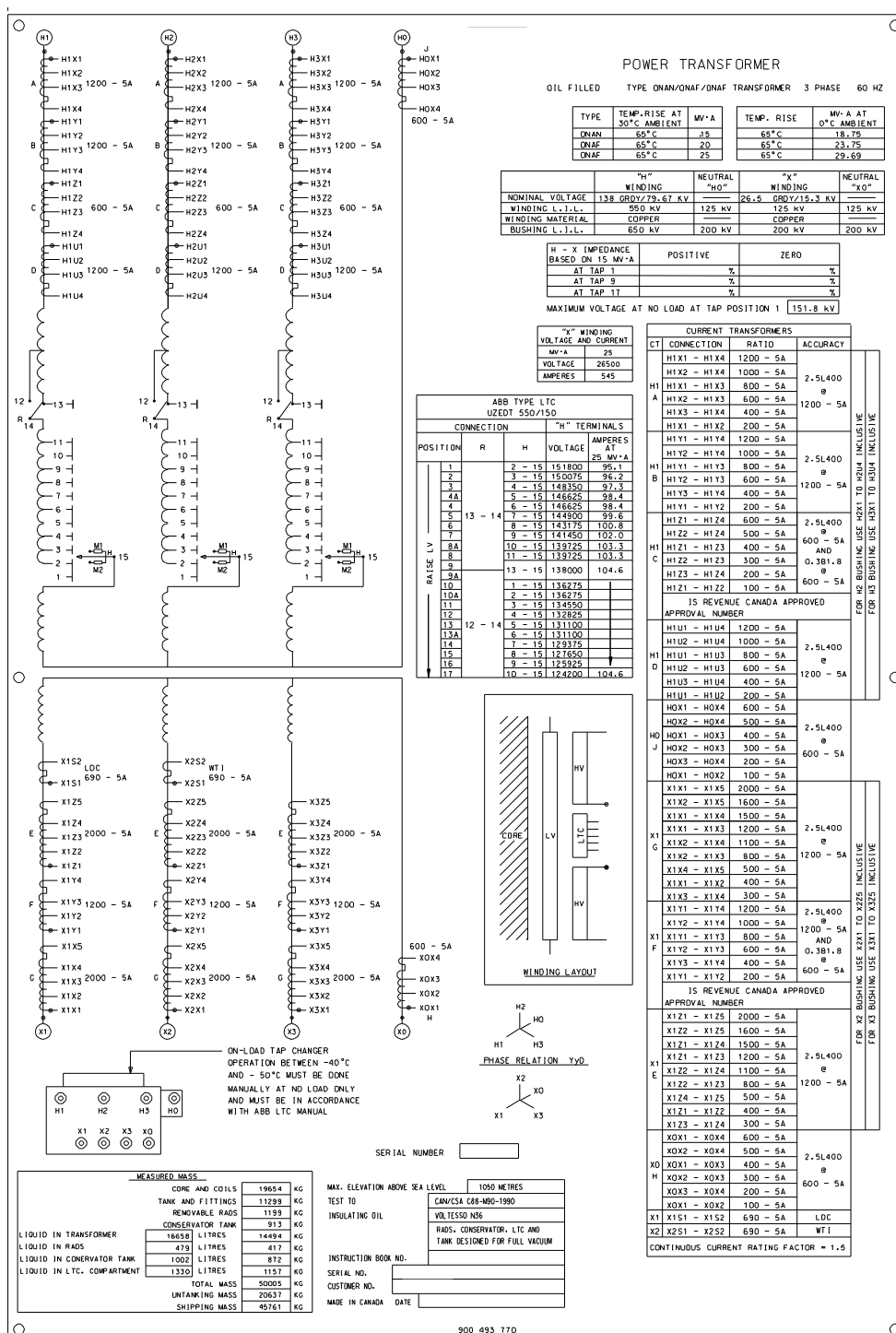


Figura 2-4- Ejemplo 1: Placa de identificación del transformador, dos devanados Y_{norte} y y_{norte} conectado

Purchaser _____		Purchaser's Order # _____		Customer Spec # _____	
Date of Test <u>January 28, 2004</u>		FP Order # _____		FP Serial # _____	
Type <u>ONAN/ONAF/ONAF</u>	Phase _____	Cycles <u>60 Hz</u>	Insulating Fluid _____	Oil _____	Temp Rise <u>65°C</u>
Winding <u>HV</u>	Winding _____	LV <u>LV</u>	Winding _____	MVA <u>MVA</u>	
MVA <u>15/20/25</u>	MVA _____	15/20/25 _____	MVA _____		
Voltage <u>138000Y/79670</u>	Voltage _____	26500Y/15300 _____	Voltage _____		
Taps <u>+/- 10% IN +/-8 STEPS RCBN</u>	Taps _____	-- _____	Taps _____		

Losses and regulation are based on wattmeter measurements.

For three-phase transformers the resistances are the sum of the three phases in series.

Note: * denotes guaranteed values

Efficiency @ 85°C : 15 MVA

Sound Level @ 1 P.U. Voltage

CM50011-101-01

Auxiliary losses

Auxiliary losses	
	MVA
Measured (kW)	-
Guarantee (kW)	-

The following tests sheets are attached:

- Ratio Test
- Impulse Log
- Doble Test
- Oil Tests (DGA, PCB)
- CT/Bushing Tests
- CT Ratio & Polarity Test
- Control Wiring Checklist

I hereby certify that this is a true report based on factory tests made in accordance with the latest transformer test code; and that the transformer withstood the above tests.

Prepared by	FP spec	Date	Approved
-------------	---------	------	----------

Figura 2-5-a- Ejemplo 1: Informe de prueba del transformador, página 1

Page 2 of 2

TRANSFORMER TESTS REPORT

Purchaser _____ Purchaser's Order # _____ Customer Spec # _____
 Date of Test January 28, 2004 FP Order # _____ FP Serial # _____
 Type ONAN/ONAF/ONAF Phase _____ Cycles 60 Hz Insulating Fluid OIL Temp Rise 65°C
 Winding HV Winding LV Winding _____
 MVA 15/20/25 MVA 15/20/25 MVA _____
 Voltage 138888Y/79670 Voltage 26500Y/15300 Voltage _____
 Taps +/- 10% IN +/-8 STEPS RCBN Taps - Taps _____

Insulation Tests

Winding	Basic Impulse		Switching Impulse	Applied Potential	
	Full Wave Level (kV)	Chopped Wave Level (kV)	Crest Wave Level (kV)	Applied Voltage (kV)	Duration (seconds)
H1,H2,H3	550	--		50	60
H0	125	--		50	60
X1,X2,X3	125	--		50	60
X0	125	--		50	60

Insulation Tests Continued

Tap	Enhanced Level			One-Hour level			Internal Partial Discharge Test			
	Times Rated Voltage	kV to Ground	Duration (cycles)	Times Rated Voltage	kV to Ground	Duration (minutes)	RIV in Phases A,B,C (µV)	Guarantee	AC in Phases A,B,C (pC)	Guarantee
#	1.700	149	7200	1.500	131.5	60	A = 70 B = 58 C = 45	<100	A = - B = - C = -	

Insulation Tests Continued

Reference Temperature	Winding Megger Test (GΩ) (values @ 1 minute)				Core Megger Test (GΩ)	
	Test kV	HV - (LV & GRD)	LV - (HV & GRD)		Test kV	CORE MEGGER
20°C	1	5.25	3.22		1	2.6

Temperature rises Average rise in °C, corrected to instant of shutdown, with windings connected and loaded as follows, until constant temperature rise was reached. (CM60011-101-01)

Winding	kV	MVA	Current	Rise of winding by resistance	Guarantee	Fluid rise			Ambient Temp.
						Average	Top	Bottom	
HV	138	15	62.8	51.4°C	65°C	40.5°C	47.5°C	33.5°C	29.9°C
LV	26.5	15	315	49.9°C	65°C				
HV	138	25	104.6	57.2°C	65°C	39.5°C	53.1°C	25.9°C	31.6°C
LV	26.5	25	545	54.9°C	65°C				

Remarks:
 Zero Sequence Impedance:-
 Tap * Z1(%) Z2(%) Z3(%)
 1 0.86 6.80 46.06
 9 0.80 7.02 45.93
 17 0.90 6.53 41.12

FORM-82-045-1-02/06/13

Figura 2-5-b- Ejemplo 1: Informe de prueba del transformador, página 2

De acuerdo con el procedimiento propuesto en la Sección 2.4.2, Paso 1, los parámetros requeridos enumerados en la Tabla 1-1 se extraen del informe de prueba. Estos datos se muestran en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3- Información Requerida para Modelar el Transformador del Ejemplo 1

Artículo	Parámetro del transformador	Símbolo	Valores
General			
1	Clasificaciones ONAN del transformador	AMEU _{EN UNA}	15 MVA
2	Voltajes de bobinado (primario secundario, ...)	V _H , V _X , ... V _{PAGS} , V _S , ... V ₁ , V ₂ , ...	138 kV / 26,5 kV
3	Tipo de conexión	-	estrella-estrella
4	Rango de toque	t ₁ , t ₂ , ...	± 10%
5	Número de pasos de toque	-	17 (±8 pasos)
6	Cuerda con grifo regulable	-	Lado primario (alto)
7	Ángulo de fase de los devanados	-1, -2, ...	0°
Resultados de la prueba sin pérdida de carga			
8	Prueba de pérdida sin carga MVA	AMEU _{Prueba de NL}	15 MVA
9	Pérdida sin carga	PAGS _{Carolna Bajos}	11.610 kilovatios
10	corriente de excitación	YOExc ^o	0,119 %
11	Toque la configuración para la prueba de pérdida sin carga	THalos Bajos	Nominal
Resultados de la prueba de pérdida de carga			
12	Prueba de pérdida de carga MVA	AMEU _{Prueba SC, ...}	15 MVA
13	Pérdida de carga	PAGS _{Carolna DEL SUR, PAGSL, HX, ...}	41.660 kilovatios
14	Impedancia	y _{OZ} , o Z _{HX} , ...	7,68 %
15	Resistencia reactiva	y _{OX} , o X _{HX} , ...	- No reportado
dieciséis	Toque la configuración para la prueba de pérdida de carga	TCAROLINA DEL SUR	Nominal
Resultados de la prueba de secuencia cero			
17	Resultados de la prueba de circuito abierto de secuencia cero	Z ₁ , Z ₂	-
18	Resultados de la prueba de cortocircuito de secuencia cero	Z ₃	-
19	Parámetros del modelo T de secuencia cero (si se proporcionaron estos parámetros en lugar de los resultados de la prueba de circuito abierto de secuencia cero)	Z _{H0} , Z' _{X0} , Z _{M0} para el modelo T	0,80%, 7,02%, 45,93%
20	Configuración de puesta a tierra	Devanado 1 sólidamente conectado a tierra Devanado 2 puesto a tierra por impedancia	Ambos sólidamente conectado a tierra
21	Impedancia de puesta a tierra	Z _{GH} , Z _{GX} , ...	0, 0

El circuito equivalente de secuencia cero del modelo T de este transformador se ha proporcionado completamente en el informe de prueba, página dos, para tres posiciones de derivación diferentes. Se puede seguir el procedimiento provisto en el Apéndice D para calcular los parámetros de secuencia cero completos. Los parámetros calculados se enumeran en la Tabla 2-4. El modelo genérico del transformador se muestra en la Figura 2-6. El circuito equivalente de secuencia cero se muestra en la figura 2-7.

Tabla 2-4- Ejemplo 1: Parámetros del Modelo Genérico del Transformador

Escribe	Parámetros en Por Unidad	Parámetros en Unidades SI
Fuga de devanados impedancia		— -
Pérdidas de carga resistencia equivalente	$r = \frac{PAGS_{CAROLINA\ DEL\ SUR}}{AMEU_{Prueba\ SCT} \cdot 1000} - 0.002777$ PU	$R_{H-X} = \frac{PAGS_{CAROLINA\ DEL\ SUR}}{y_{O2}} = \frac{PAGS_{CAROLINA\ DEL\ SUR}}{3y_{O2}}^2 - 3.526$ -
Fuga de devanados resistencia reactiva	— PU	$X_{H-X} = \sqrt{Z_{H-X}^2 - R_{H-X}^2} - 97.44150$ -
Rama magnetizante entrada	$y = \%y_{OExc} / 100 - 0.00119$ PU	$Y_X = \frac{y_{Ojefe}}{V_{jefe}} = \frac{\%y_{OExc} / 100}{Z_{Base\ X}} - 0.00003$ Uo $Y_H = \frac{\%y_{Oex} / 100}{Z_{Base\ H}} - 9.373$ mi-7 U
Sin pérdidas de carga equivalente conductancia	$g_{amo} = \frac{PAGS_{Paises\ Bajos}}{AMEU_{Prueba\ NLT} \cdot 1000} - 0.000774$ PU	$GRAMO = \frac{PAGS_{jefe}}{V_{jefe}^2} = \frac{PAGS_{Paises\ Bajos}}{V_{X\ clasificado}^2} - 1.653$ mi-5 Uo $GRAMOT = \frac{PAGS_{Paises\ Bajos}}{2} - 6.0964$ mi-7 U $V_{Clasificación\ H}$
Rama magnetizante susceptancia	$b = -y_2 \sqrt{g_{amo}^2} - 0.00090$ PU	$B_X = -Y_2 \sqrt{X_{-GRAMO}^2} - -1.9307$ mi-5 Uo $B_H = -Y_2 \sqrt{H_{-GRAMO}^2} - -7.1195$ mi-7 U
secuencia cero parámetros		- - - - -

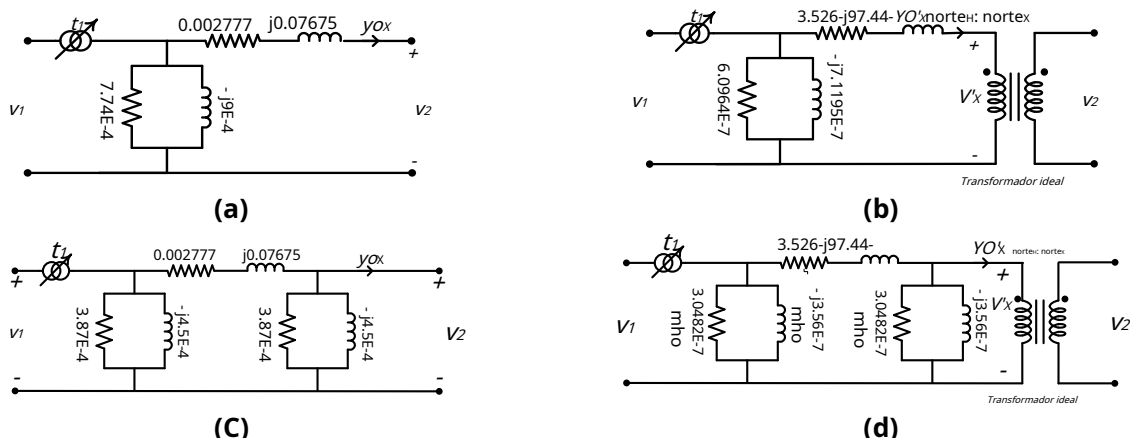


Figura 2-6- Ejemplo 1- Modelos genéricos de transformadores: a) Modelo pu simplificado b) Modelo simplificado modelo real, c) modelo π en sistema pu, d) modelo π en valores reales

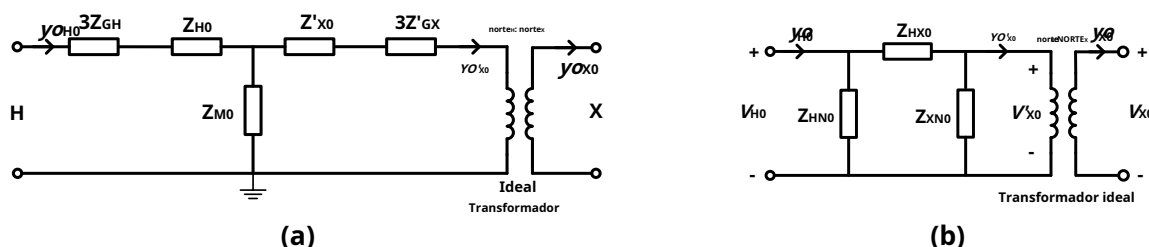


Figura 2-7- Ejemplo 1- Circuito equivalente homopolar: a) modelo T, b) modelo π

2.5 Transformadores de dos devanados con Wye Primario Delta Secundario

Las conexiones estrella-triángulo se utilizan generalmente para transformadores reductores de relación grande. La conexión en estrella en el lado de alto voltaje se usa debido a las ventajas eléctricas y mecánicas, como los bajos costos de aislamiento de los devanados o el bajo aislamiento del mecanismo del cambiador de tomas. El punto neutro se puede conectar a tierra para que sea estable con respecto a las cargas desequilibradas. El secundario conectado en delta evita que fluyan armónicos tríplex en el terminal del lado de la carga. Proporciona una forma de onda mejorada a la carga. La Figura 2-8 muestra el diagrama esquemático del transformador, la representación vectorial, el diagrama vectorial y el diagrama vectorial de desplazamiento de fase de un transformador de conexión Y-triángulo. El grupo de vectores de esta conexión se llama Yd7.

2.5.1 Transformador Y-triángulo de dos devanados: modelo genérico de secuencia positiva y negativa

El modelo genérico de un transformador Y-triángulo trifásico de dos devanados para secuencia positiva y negativa es similar al de un transformador YY o un transformador monofásico, como se muestra en la Figura 2-1.

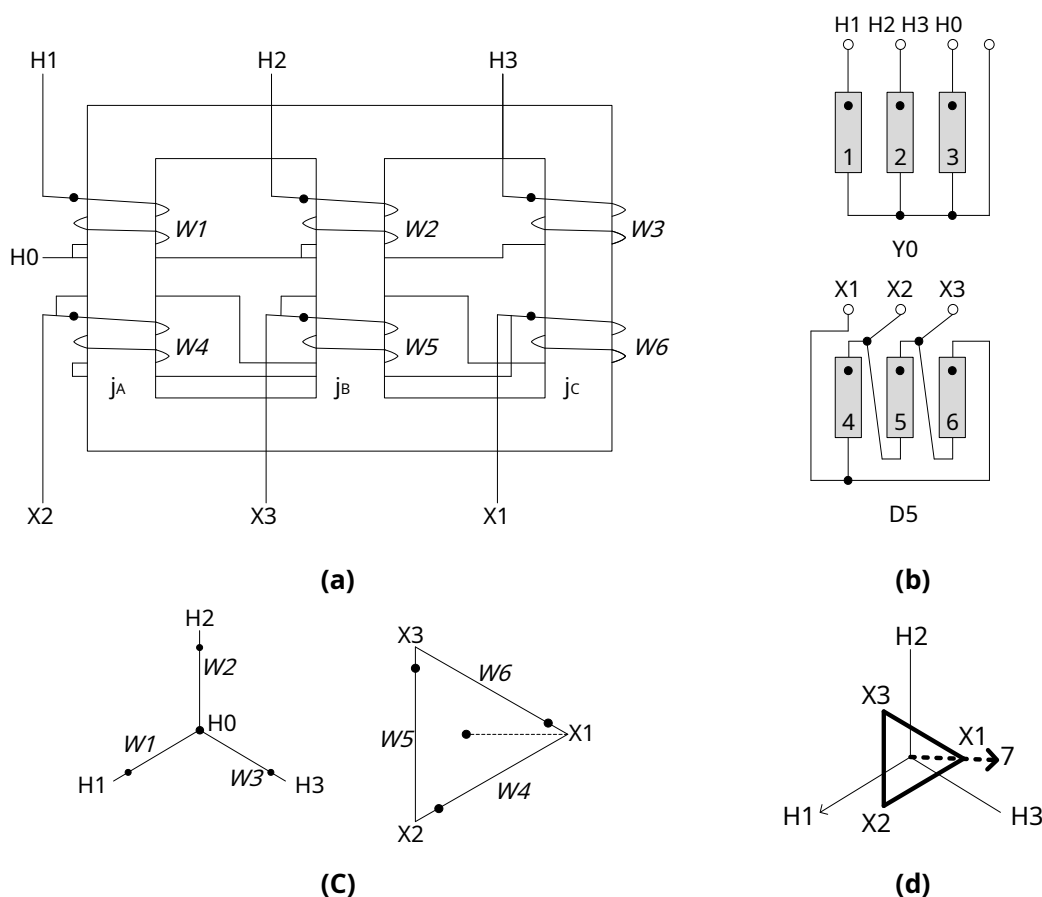


Figura 2-8- Transformador de dos devanados con Y primario delta secundario: a) Diagrama esquemático del transformador, b) Diagrama de conexión de los devanados, c) Diagrama vectorial, d) Fase diagrama vectorial de desplazamiento

2.5.2 Transformador Y-Delta de dos devanados: procedimiento para determinar los parámetros del modelo genérico

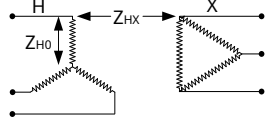
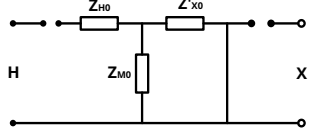
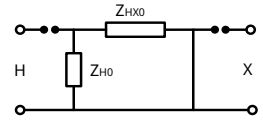
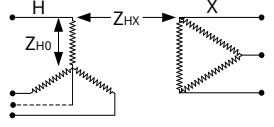
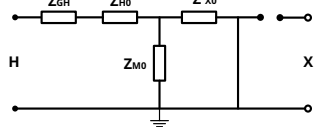
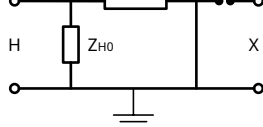
El procedimiento para modelar un transformador Y-triángulo trifásico de dos devanados en secuencia positiva o negativa es el mismo que el procedimiento del transformador YY descrito en la Sección 2.4.2, excepto que el modelo de secuencia cero es diferente. La siguiente sección describe cómo se modela el circuito equivalente de secuencia cero de un transformador Y-triángulo de dos devanados.

2.5.3 Transformador Y-Delta de dos devanados: circuito equivalente de secuencia cero

Hay dos tipos de conexión Y-triángulo, la diferencia entre los dos es si el punto neutral en el lado conectado en Y está conectado a tierra o no. La Tabla 2-5 muestra estos dos tipos de conexión. La conexión Y-delta sin conexión a tierra presenta circuito abierto bajo excitación de secuencia cero; por lo tanto, la corriente de secuencia cero no fluye a través del transformador. Sin embargo, fluye a través de un transformador conectado en Y-triángulo conectado a tierra. En la Sección 1.15.3 b) se describe que si el conjunto de devanado primario es una conexión en Y puesta a tierra, la corriente de secuencia cero fluye en el conjunto de devanado secundario conectado en delta; sin embargo, la secuencia cero total

la corriente que fluye a través de los terminales secundarios es cero y no aparece voltaje de secuencia cero en el terminal de los devanados secundarios porque la conexión delta opera como un circuito de bucle cerrado para los posibles voltajes inducidos a estos devanados debido al flujo de magnetización de fase cero. Esto se muestra esquemáticamente en la Figura 2-9.

Tabla 2-5- Circuitos equivalentes de secuencia cero de transformadores conectados en Y-Delta

	Tipo de conexión	Modelo T	Modelo π	Símbolo
1				Y-triángulo
2				YN-delta

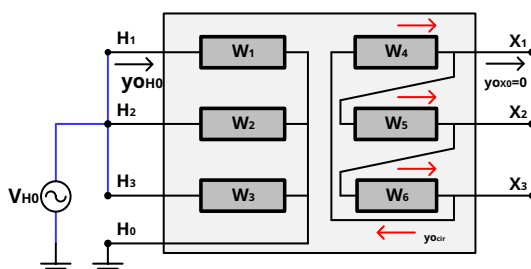


Figura 2-9- El comportamiento del transformador conectado en Y-triángulo bajo excitación de secuencia cero

La impedancia de secuencia cero descrita en la Sección 1.15.3 b) se puede calcular mediante una sola prueba desde el lado conectado en Y en la que:

$$Z_{0H} = \frac{V_{H0}}{I_{H0}}$$

2.5.4 Ejemplo 2: Un transformador YNdelta1 de dos devanados práctico

La Figura 2-10-a y la Figura 2-10-b muestran la información de la placa de identificación de un transformador conectado en YNtriángulo de dos devanados de 72/13,8 kV, 50/66/83 MVA. El diagrama esquemático y el diagrama vectorial de este tipo de transformador se muestran en la Figura 2-8. Las tensiones nominales de los devanados primario y secundario son de 72 kV y 13,8 kV, respectivamente. La placa de identificación no muestra que el devanado

el aislamiento en el lado de alta tensión está clasificado. Por lo tanto, los puntos neutros del lado de alta tensión pueden estar o no estar conectados a tierra. En este ejemplo, el punto neutro está conectado a tierra a través de una reactancia de 2 Ω . Los resultados de la prueba de este transformador se muestran en la Figura 2-11-a a la Figura 2-11-j. De manera similar a la del ejemplo 1, la prueba de pérdidas de carga para este transformador se realizó para tres posiciones de derivación, incluida la relación de derivación nominal y $\pm 10\%$ de las tensiones nominales. Se ha aclarado para este transformador que la posición de derivación nominal es la Posición 9. Para determinar los parámetros del modelo genérico del transformador, solo se utilizan los resultados de la prueba de relación de derivación nominal. Las mediciones de prueba de secuencia cero se han propuesto en la página 9 del informe de prueba, Figura 2-11-i.

De acuerdo con el procedimiento propuesto en la Sección 2.4.2 Paso 1, los parámetros requeridos enumerados en la Tabla 1-1 se extraen del informe de prueba. Estos datos se muestran en la Tabla 2-6.

GENERATOR STEP-UP TRANSFORMER

RP-8298

SERIAL NO.:			VECTOR GROUP SYMBOL	YNd1
TYPE NO.:	TM-0846		TYPE OF COOLING	ONAN / ONAF / ONAF
NUMBER OF PHASE	3		STANDARD	CSA - C88-M90
FREQUENCY	60	Hz	MAX. TEMP. RISE(WINDING/OIL)	65 / 65 deg.C
WINDING	RATED CAPACITY	RATED VOLTAGE	RATED CURRENT	B.I.L? (LINE/NEUTRAL)
H.V	50 / 66 / 83 MVA	72 KV	401/ 529 / 666 A	350 / 125 KV
L.V	50 / 66 / 83 MVA	13.8 KV	2092 / 2761 / 3473 A	125 KV
%IMPEDANCE AT 85deg.c ON 50MVA(ONAN) BASE				
MAX. TAP		%	DYNAMIC EARTHQUAKE WITHSTAND	HORIZONTAL 0.3 G VERTICAL 0.24 G
RATED TAP		%	SOUND LEVEL(AT 50 MVA BASE)	dB
MIN. TAP		%	CORE AND COIL(UNTANKING)	55,000 kg
CAPACITY AT 0deg.C AMBIENT TEMPERATURE			TANK AND FITTINGS	22,000 kg
H.V	62 / 78 / 98	MVA	TOTAL WEIGHT	100,400 kg
L.V	62 / 78 / 98	MVA	QUANTITY OF OIL	23,400 kg
MATERIAL OF CONDUCTOR	COPPER		TRANSPORTATION	69,000 kg
TANK WITHSTANDING PRESSURE	1.0	kg/cm ²	REFERENCE TO INSTRUCTION MANUAL	
YEAR OF MANUFACTURE	.	.		

CONSERVATOR TANK AND OLTC TANK ARE WITHSTAND AT FULL VACUUM BY EQUALIZING METHOD.

Figura 2-10-a- Ejemplo 2: Placa de identificación del transformador, Página 1

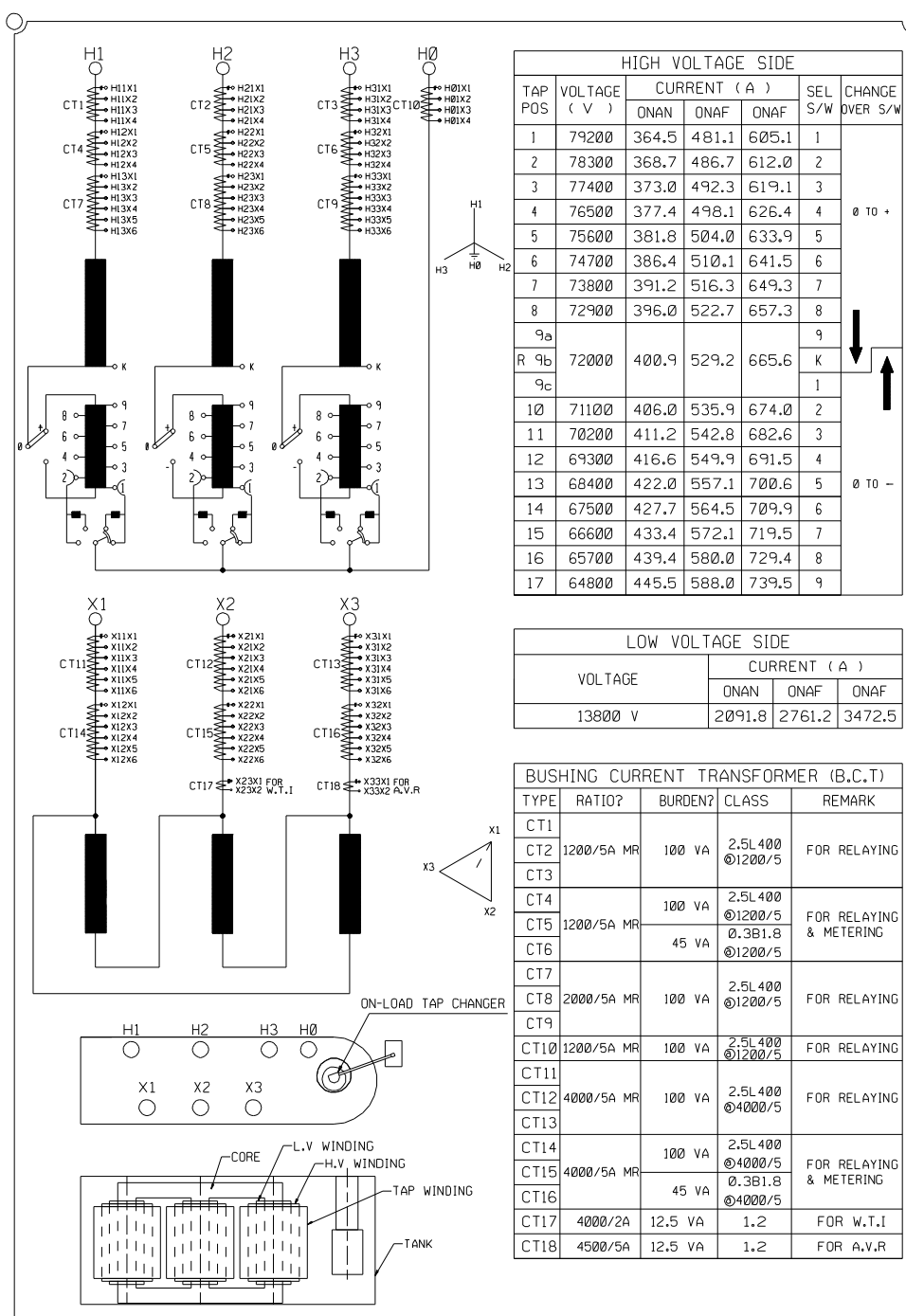


Figura 2-10- b - Ejemplo 2: Placa de identificación del transformador, Página 1

INSPECTION & TEST REPORT

FOR TRANSFORMER

Customer :
Project Name :

Applicable Standard : CSA C88-M90
Cooling Type : ONAN / ONAF1 / ONAF2
Phase : 3
Frequency : 60 Hz
Capacity : 50 / 66 /
Primary voltage : 72 kV
Tap Voltage : 72 kV $\pm$
Secondary Voltage : 13.8 kV
Vector Group : YNd1
Quantity : 1 set
Serial No. :

APPROVED BY : _____ WITNESSED BY : _____

CHECKED BY : _____

TESTED BY : _____

Figura 2-11-a- Ejemplo 2: Resultados de la prueba del transformador, página 1

GUARANTEE LIST				
Description	Unit	Guarantee Values	Tolerance	Measured values/result
1. Percent impedance at 85°C, on ONAN (50MVA) rating				
a) Highest tap(Tap No. 1)	%	12.5	± 7.5%	12.24
b) Nominal tap(Tap No. 9)	%	12.0	± 7.5%	11.64
c) Lowest tap(Tap No. 17)	%	11.4	± 7.5%	11.18
2. Zero sequence impedance at ONAN (50MVA) rating – Nominal tap	%	Approx. 11.0	—	11.25
3. No load loss at rated voltage and rated frequency				
a) Before dielectric test	kW	40.0	—	34.467
b) After 1 hour excitation test	kW	40.0	—	34.414
4. Load loss at 85°C				
a) at ONAN(50MVA) rating	kW	97.0	—	96.014
b) at Maximum(83MVA) rating	kW	268.0	—	264.576
5. Auxiliary losses	kW	6.0	—	2.192
6. Voltage regulation at ONAN(50MVA) rating				
a) at 1.0 power factor	%	1.0	—	0.869
b) at 0.8 power factor	%	8.2	—	7.557
7. Sound level				
a) without cooling system(ONAN rating)	dB	75.0	—	65.57
b) with cooling system(Maximum rating)	dB	—	—	67.93
8. Temperature rise				
a) ONAN(50MVA) rating				
— Oil temperature	°C	65.0	—	45.50
— Winding temperature(HV)	°C	65.0	—	45.78
— Winding temperature(LV)	°C	65.0	—	48.89
b) ONAF2(83MVA) rating				
— Oil temperature	°C	65.0	—	61.00

Figura 2-11-b- Ejemplo 2: Resultados de la prueba del transformador, página 2

		No load loss and current							
Test frequency at 60 Hz (LV)side connection at rated voltage 13800 V, Based 50000 KVA									
Rated voltage/ $\sqrt{3}$			No load current			Average		No load losses(W)	
(%)	mean	rms	Ia	Ib	Ic	Io	%	Pm	Po
90	6456	7171	1.70	1.19	1.25	1.38	0.07	26035	26001
100	7173	7967	2.27	1.69	1.62	1.86	0.09	34512	34467
110	7891	8764	5.56	4.61	4.33	4.83	0.23	49304	49282
* mean = rms/($\pi/2\sqrt{2}$)									
$Po = \frac{Pm}{\left(\frac{Ur}{Um \times (\pi/2\sqrt{2})} \right)^2 \times 0.5 + 0.5}$ Pm : Measured value Po : Corrected value Um : (Ua mean + Ub mean + Uc mean) / 3 Ur : (Ua rms + Ub rms + Uc rms) / 3									
Date of test :					Tested by :				

Figura 2-11-c- Ejemplo 2: Resultados de la prueba del transformador, página 3

		No load loss and current (After 1hr Excitation test)							
Test frequency at 60 Hz (LV)side connection at rated voltage 13800 V , Based on 50000 KVA									
Rated voltage/ $\sqrt{3}$			No load current			Average		No load losses(W)	
(%)	mean	rms	Ia	Ib	Ic	Io	%	Pm	Po
90	6456	7171	1.69	1.18	1.25	1.37	0.07	25878	25845
100	7173	7967	2.29	1.70	1.65	1.88	0.09	34425	34414
110	7891	8764	5.71	4.76	4.48	4.98	0.24	48973	49209
* mean = rms/($\pi/2\sqrt{2}$)									
$Po = \frac{Pm}{\left(\frac{Ur}{Um \times (\pi/2\sqrt{2})} \right)^2 \times 0.5 + 0.5}$ Pm : Measured value Po : Corrected value Um : (Ua mean + Ub mean + Uc mean) / 3 Ur : (Ua rms + Ub rms + Uc rms) / 3									
Date of test :					Tested by :				

Figura 2-11-d- Ejemplo 2: Resultados de la prueba del transformador, página 4

		Load loss and Impedance Measurement				
Measurement on 50000 KVA Base at 25 °C (HV) side connection, (LV) side short circuit						
Tap No	Rated		Impedance		Load losses(W)	
	Voltage(V)	Current(A)	Volt(V)	%(85 °C)	at 25 °C	at 85 °C
1	79200	364.5	9693	12.24	91512	96465
9	72000	400.9	8378	11.64	89931	96014
17	64800	445.5	7244	11.18	100243	109942
Correction to 66000 KVA Base						
Tap No.	Rated		Impedance		Load losses(W)	
	Voltage(V)	Current(A)	Volt(V)	%(85 °C)	at 85 °C	
1	79200	481.1	12795	16.16	168080	
9	72000	529.2	11059	15.36	167295	
17	64800	588.0	9562	14.76	191564	
Correction to 83000 KVA Base						
Tap No.	Rated		Impedance		Load losses(W)	
	Voltage(V)	Current(A)	Volt(V)	%(85 °C)	at 85 °C	
1	79200	605.1	16091	20.32	265818	
9	72000	665.6	13907	19.32	264576	
17	64800	739.5	12025	18.56	302957	
Date of test : 1999. 5. 31. Tested by :						

Figura 2-11-e- Ejemplo 2: Resultados de la prueba del transformador, página 5

Load loss and Impedance Measurement						
Measurement on 50000 KVA Base at 25 °C						
(HV) side connection, (LV) side short circuit						
Tap No	Rated		Impedance		Load losses(W)	
	Voltage(V)	Current(A)	Volt(V)	%(85 °C)	at 25 °C	at 85 °C
1	79200	364.5	9693	12.24	91512	96465
9	72000	400.9	8378	11.64	89931	96014
17	64800	445.5	7244	11.18	100243	109942
Correction to 66000 KVA Base						
Tap No.	Rated		Impedance		Load losses(W)	
	Voltage(V)	Current(A)	Volt(V)	%(85 °C)	at 85 °C	
1	79200	481.1	12795	16.16	168080	
9	72000	529.2	11059	15.36	167295	
17	64800	588.0	9562	14.76	191564	
Correction to 83000 KVA Base						
Tap No.	Rated		Impedance		Load losses(W)	
	Voltage(V)	Current(A)	Volt(V)	%(85 °C)	at 85 °C	
1	79200	605.1	16091	20.32	265818	
9	72000	665.6	13907	19.32	264576	
17	64800	739.5	12025	18.56	302957	
Date of test : 1999. 6. 31. Tested by :						

Figura 2-11-f- Ejemplo 2: Resultados de la prueba del transformador, página 6

TPR-01, Version No. 1-0-0
Calculation of 3 phase Two Winding Transformer Characteristics

Serial No : Tap No : 9

Input Data

Capacity (KVA) : 50000
 Rated Voltage HV/LV(V) : 72000 13800
 Rated Current of HV/LV(A) : 400.9 2091.85
 Impedance Voltage (V) : 8378
 No Load Loss (W) : 34467
 Load Loss (W) : 89931

Load Loss at oil Temperature : 25 (°C)
 Resistance of each winding at : 23 (°C)

HV Winding (ohm) : 0.06741 0.06722 0.06734
 LV Winding (ohm) : 0.003343 0.003335 0.003347

Output Data

Copper Loss at 25 (°C) : 54823.27 (W) at 85 °C : 67499.2 (W)
 Stray Loss at 25 (°C) : 35107.73 (W) at 85 °C : 28514.7 (W)
 Load Loss at 85 (°C) : 96013.90 (W)

%Resistance voltage drop at 85 (°C) : 0.192 %
 %Reactance voltage drop at 85 (°C) : 11.636 %
 %Impedance voltage drop at 85 (°C) : 11.637 %

Calculation of Efficiency

99.713 % at L.F(%) : 120,	99.770 % at L.F(%) : 60,
99.727 % at L.F(%) : 110,	99.767 % at L.F(%) : 50,
99.740 % at L.F(%) : 100,	99.751 % at L.F(%) : 40,
99.751 % at L.F(%) : 90,	99.713 % at L.F(%) : 30,
99.761 % at L.F(%) : 80,	99.677 % at L.F(%) : 25,
99.768 % at L.F(%) : 70,	99.618 % at L.F(%) : 20,

Calculation of Voltage Regulation

0.869 % at P.F 1.00	8.764 % at P.F : 0.70
4.420 % at P.F 0.95	9.241 % at P.F : 0.65
5.784 % at P.F 0.90	9.656 % at P.F : 0.60
6.771 % at P.F 0.85	10.017 % at P.F : 0.55
7.557 % at P.F 0.80	10.332 % at P.F : 0.50
8.209 % at P.F 0.75	

Figura 2-11-g- Ejemplo 2: Resultados de la prueba del transformador, página 7

TPR-01, Version No. 1-0-0
Calculation of 3 phase Two Winding Transformer Characteristics

Serial No : Tap No : 17

Input Data

Capacity (KVA)	:	50000		
Rated Voltage HV/LV(V)	:	64800	13800	
Rated Current of HV/LV(A)	:	445.5	2091.85	
Impedance Voltage (V)	:	7244		
No Load Loss (W)	:	34467		
Load Loss (W)	:	100243		
Load Loss at oil Temperature	:	25 (°C)		
Resistance of each winding at	:	23 (°C)		
HV Winding(ohm)	:	0.07684	0.07652	0.0765
LV Winding(ohm)	:	0.003343	0.003335	0.003347

Output Data

Copper Loss at	25 (°C)	:	68076.1 (W)	at 85 °C :	83816.2 (W)
Stray Loss at	25 (°C)	:	32166.9 (W)	at 85 °C :	26126.2 (W)
Load Loss at	85 (°C)	:	109942.4 (W)		
%Resistance voltage drop at	85 (°C)	:	0.2199	%	
%Reactance voltage drop at	85 (°C)	:	11.1790	%	
%Impedance voltage drop at	85 (°C)	:	11.1810	%	

Figura 2-11-h- Ejemplo 2: Resultados de la prueba del transformador, página 8

	Zero sequence impedance	
1. Test circuit : HV supply, LV open circuit (50 MVA Base) (Tap No. : 9) G : Generator (7500KVA, 6600V) Aux.TR : 10MVA, (6600 / 63000V) 1) Rated current : 400.9 (A) 2) Rated voltage : 72000 (V) 3) Supply current : 150.4 (A) 4) Measured voltage : 584.6 (V) 2. Corrected zero sequence impedance voltage (V) $= \text{Measured voltage} \times \{ (\text{Rated current} \times 3) + \text{Supply current} \}$ $= 584.6 \times \{ (400.9 \times 3) + 150.4 \}$ $= 4675 \text{ (V)}$ 3. Zero sequence impedance (%) $= \{ \text{Measured voltage} + (\text{Rated voltage} + \sqrt{3}) \} \times 100$ $= \{ 4675 + (72000 + \sqrt{3}) \} \times 100$ $= 11.25 \%$		
Date of test :		Tested by :

Figura 2-11-i- Ejemplo 2: Resultados de la prueba del transformador, página 9

Tabla 2-6- Información Requerida para Modelar el Transformador del Ejemplo 2

Artículo	Parámetro del transformador	Símbolo	Valores
General			
1	Clasificaciones ONAN del transformador	AMEUEN UNA	50 MVA
2	Voltajes de bobinado (primario secundario, ...)	$V_H, V_X, \dots$ $V_{PAGS}, V_S, \dots$ $V_1, V_2, \dots$	72 kV / 13,8 kV
3	Tipo de conexión	-	Estrella-triángulo
4	Rango de toque	$t_1, t_2, \dots$	$\pm 10\%$
5	Número de pasos de toque	-	17
6	Cuerda con grifo regulable	-	Lado primario (alto)
7	Ángulo de fase de los devanados	-1, -2, ...	30°
Resultados de la prueba sin pérdida de carga			
8	Prueba de pérdida sin carga MVA	AMEUPrueba de NL	50 MVA
9	Pérdida sin carga	PAGSPaises Bajos	34.467 kilovatios
10	corriente de excitación	y_{0Exc}	0,09 %
11	Toque la configuración para la prueba de pérdida sin carga	Paises Bajos	Nominal
Resultados de la prueba de pérdida de carga			
12	Prueba de pérdida de carga MVA	AMEUPrueba SC, ...	50 MVA
13	Pérdida de carga	PAGSCAROLINA DEL SURPAGSLIL, HK, ...	96.014 kilovatios
14	Impedancia	y_{0Z} , o Z_{HX} , ...	11,64 %
15	Resistencia reactiva	y_{0X} , o X_{HX} , ...	No reportado
dieciséis	Toque la configuración para la prueba de pérdida de carga	ICAROLINA DEL SUR	Nominal
Resultados de la prueba de secuencia cero			
17	Resultados de la prueba de circuito abierto de secuencia cero	$Z_1, Z_2(\text{Calculado})$	11,25%, -
18	Resultados de la prueba de cortocircuito de secuencia cero	Z_3	-
19	Parámetros del modelo T de secuencia cero	$Z_{H0}, Z'_{X0}Z_{M0}$ para el modelo T	
20	Configuración de puesta a tierra	Devanado 1 puesto a tierra por impedancia	
21	Impedancia de puesta a tierra	$Z_{GH}, Z_{GX}, \dots$	j0.5-, -

2.6 Transformadores de dos devanados con Delta Primario Delta Secundario

El diagrama esquemático del transformador, la representación vectorial, el diagrama vectorial y el diagrama vectorial de desplazamiento de fase de dos posibles transformadores conectados en triángulo-triángulo se muestran en la Figura 2-12 y la Figura 2-13. Los grupos de vectores de estas conexiones son Dd0 y Dd2, respectivamente. En una conexión delta-triángulo, si falla un devanado, los devanados restantes aún pueden proporcionar servicios trifásicos a una capacidad reducida (57,7%). Esto haría que el sistema volviera a funcionar incluso si hay un límite en la capacidad entregada. El uso de transformadores conectados en triángulo-triángulo es una solución práctica para ubicaciones remotas donde los servicios de reemplazo de transformadores no están disponibles. Esa es la principal ventaja de este tipo de conexión. En general, esto también es una ventaja para tres transformadores monofásicos conectados en triángulo-triángulo.

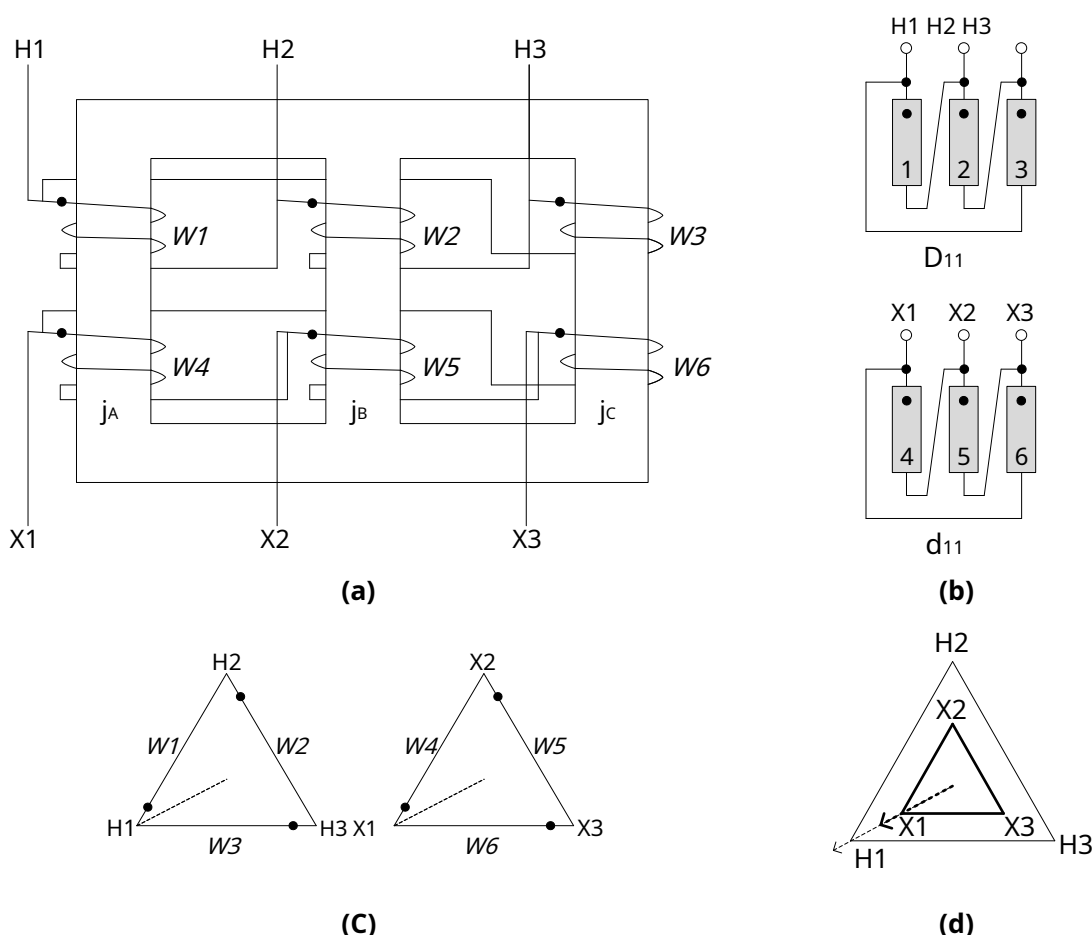


Figura 2-12- Transformador de dos devanados con primario delta secundario delta: a) Esquema diagrama del transformador, b) Diagrama de conexión de devanados, c) Diagrama vectorial, d) Fase diagrama vectorial de desplazamiento

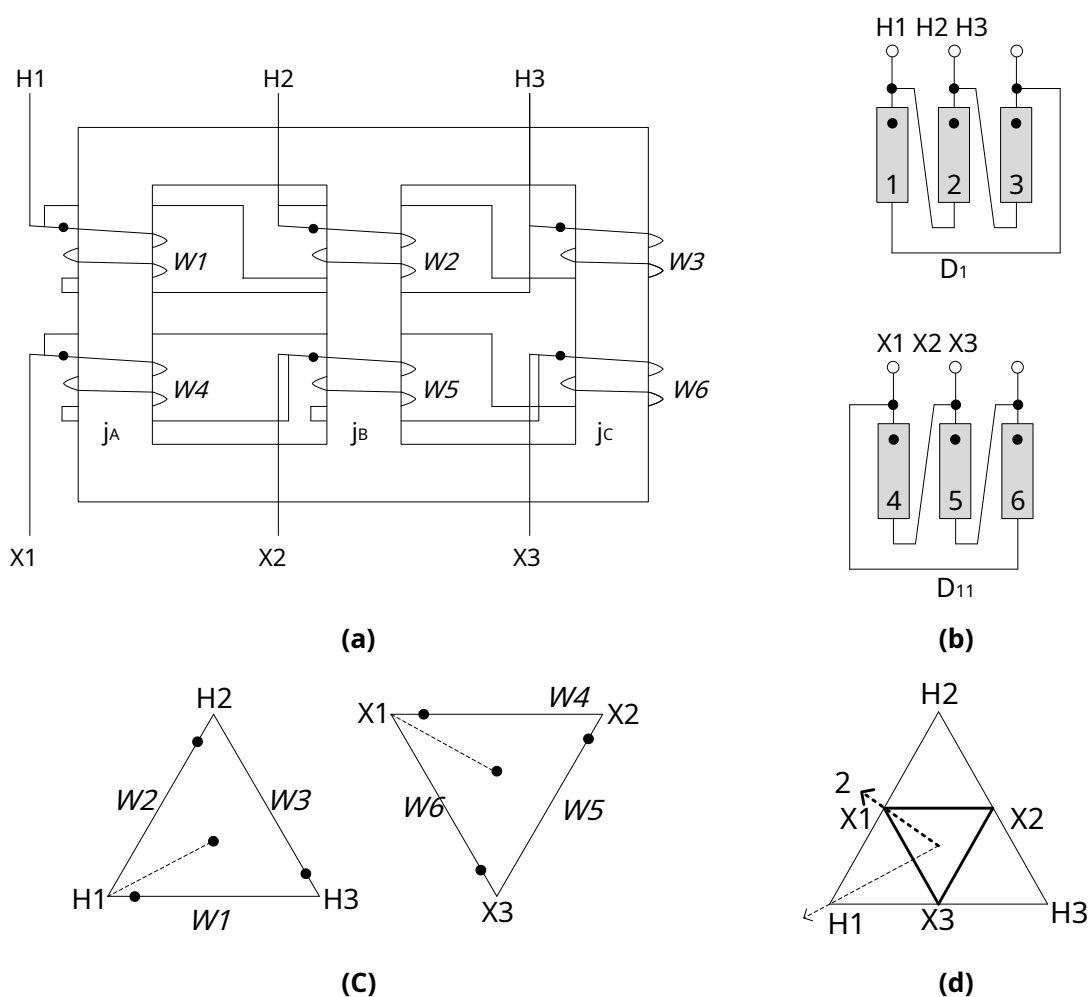


Figura 2-13- Transformador de dos devanados con delta primario delta secundario: a) Esquema diagrama del transformador, b) Diagrama de conexión de devanados, c) Diagrama vectorial, d) Fase diagrama vectorial de desplazamiento

2.6.1 Transformador delta-triángulo de dos devanados: modelo genérico de secuencia positiva y negativa

El modelo genérico de un transformador trifásico delta-triángulo de dos devanados para secuencia positiva y negativa es similar al de un transformador YY o transformador monofásico, como se muestra en la Figura 2-1.

2.6.2 Transformador delta-triángulo de dos devanados: procedimiento para determinar los parámetros del modelo genérico

El procedimiento para modelar un transformador delta-triángulo trifásico de dos devanados en secuencia positiva o negativa es el mismo que el procedimiento de modelado del transformador YY descrito en la Sección 2.4.2, excepto que el modelo de secuencia cero para transformadores conectados en triángulo-triángulo es un circuito abierto de ambos lados del transformador.

2.6.3 Transformador delta-triángulo de dos devanados: circuito equivalente de secuencia cero

El equivalente de secuencia cero para un transformador conectado delta-triángulo no tiene sentido. Se muestra teóricamente como un circuito abierto desde ambos lados, como se muestra en la Figura 2-14.

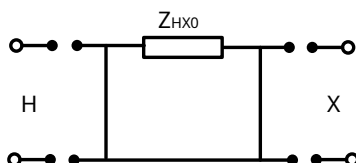


Figura 2-14- El circuito equivalente homopolar de un transformador conectado delta-triángulo

2.6.4 Ejemplo 3: un transformador Dd0 práctico de dos devanados

La Figura 2-15 muestra la información de la placa de identificación de un transformador conectado Dd0 de dos devanados de 66/2,4 kV, 7,5/8,4 MVA. El diagrama esquemático y el diagrama vectorial de este tipo de transformador se muestran en la Figura 2-13. La tensión nominal del primario es de 66 kV y la del secundario de 2,4 kV. Tiene un cambiador de tomas sin carga de cinco pasos en el lado de alto voltaje; cada paso es 2.5%. El informe de prueba del transformador se presenta en la Figura 2-16. Muestra que se realizó la prueba de pérdidas de carga para la posición de toma nominal, que es la posición 3. Se midieron las resistencias de CC de los devanados de alto y bajo voltaje y se enumeran en el informe de la prueba. Para determinar los parámetros del modelo genérico del transformador, solo se utilizan los resultados de la prueba de relación de derivación nominal.

La información requerida para determinar los parámetros genéricos del modelo enumerados en la Tabla 1-1 se extrajo del informe de prueba. Estos datos se muestran en la Tabla 2-8. Los parámetros calculados para el modelo genérico se muestran en la Tabla 2-9.

THREE PHASE TRANSFORMER

K.V.A. 7500 / 2100 H.V. 66000 Δ L.V. 2400 Δ 4165Y/2400 TEMP. RISE 55/65 °C
 TYPE OLAN PO FREQ. 60 HZ IMP AT 7500 KVA % COOLANT OIL
 MFR'S SERIAL & INST. BOOK NO. PURCHASER'S ORDER NO.

TANK WILL WITHSTAND FULL VACUUM

APPROXIMATE WEIGHT IN POUNDS
 CORE & COILS 18000
 TANK & FITTINGS 15000
 COOLANT 1645 IMP. GALS. 15000
 TOTAL WEIGHT 430

'T' - LOCATION OF TAP CHANGER

HIGH VOLTAGE			
TAP CHANGER	POS. CONN.	AMPS AT <u>7500</u> KVA	VOLTS
1	A-B	62.5	69300
2	B-C	64.0	67650
3	C-D	65.6	66000
4	D-E	67.3	64350
5	E-F	69.1	62700

LOW VOLTAGE AT <u>7500</u> KVA		
VOLTAGE	AMPS	CONNECT
2400 Δ	1804	1-5, 2-6, 3-4, 10-11
4165 Y	1041	5-8, 7-4, 12, 9-10

CURRENT TRANSFORMER			
C.T.	CLASS	RATIO	CONN.
1	250/400	100:5	1-2
2	100/400	1200:5	1-2

DESIGNED FOR ONAN OPERATION
 WHEN FANS ARE USED

BUILT TO C.S.A. STD. FULL WAVE IMPULSE LEVEL H.V. 66000 K.V. L.V. 2400 K.V.

H.V. WINDING

H2

H1 H3

X2

X1 X3

X0

X1 X2 X3

2D1

2

11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100

L.V. WINDING

X1 X2 X3

"C.P. LTD. SERIAL NO. "

Figura 2-15- Ejemplo 3: Placa de identificación del transformador

TRANSFORMER TEST REPORT

DATE September 20, 1972

Customer:

Order No:

Rating: 3-60-7500 KVA 66000 Delta 2400 Delta 4160Y/2400

Taps: +2½% +5% in HV Off Load

<u>Serial No.</u>	<u>Test Values</u>	<u>Guaranteed Values</u>
-------------------	--------------------	--------------------------

WT 3288-1

Open Circuit Test:

% Voltage % Io	1.0	
<u>100</u> Watts	12,350	12,000
% Voltage % Io	2.65	
<u>110</u> Watts	18,800	

Load Loss Test:

Watts @ 75 °C	41,110	42,000
% IX	6.92	
% IZ @ 75 °C	6.93	6.8

Total Watts @ 100%
Voltage & 75 °C

53,460	54,000
--------	--------

Resistance Per Phase:

Ohms @ 24 °C	
HV Position	
1	3.96
2	
3	3.76
4	
5	3.58
L.V. Delta	.00391

Heat Run Results:

Oil Rise	39.3	55
H.V. Cu. Rise	47.1	
L.V. Cu. Rise	42.2	

Noise Level:

Insulation Tests:

H.V. to L.V. and Ground 140 KV for 1 minute
L.V. to H.V. and Ground 19 KV for 1 minute
Induced Voltage at 2 times normal for 7200 cycles.

Figura 2-16- Ejemplo 3: Resultados de la prueba del transformador

Tabla 2-8- Información Requerida para Modelar el Transformador del Ejemplo 3

Artículo	Parámetro del transformador	Símbolo	Valores
General			
1	Clasificaciones ONAN del transformador	AMEU _{EN UNA}	7,5 MVA
2	Voltajes de bobinado (primario secundario, ...)	V _H , V _X , ... V _{PAGS} , V _S , ... V ₁ , V ₂ , ...	66 kV/2,4 kV
3	Tipo de conexión	-	delta-delta
4	Rango de toque	t ₁ , t ₂ , ...	± 5%
5	Número de pasos de toque	-	5
6	Cuerda con grifo regulable	-	Lado primario (alto)
7	Ángulo de fase de los devanados	-1, -2, ...	0°
Resultados de la prueba sin pérdida de carga			
8	Prueba de pérdida sin carga MVA	AMEU _{Prueba de NL}	7,5 MVA
9	Pérdida sin carga	PAGS _{Pruebas Bajos}	12.350 kilovatios
10	corriente de excitación	y _{0Exc} ⁴	1 %
11	Toque la configuración para la prueba de pérdida sin carga	Trastes Bajos	Nominal
Resultados de la prueba de pérdida de carga			
12	Prueba de pérdida de carga MVA	AMEU _{Prueba SC, ...}	7,5 MVA
13	Pérdida de carga	PAGS _{CAROLINA DEL SUR, PAGS_{SL, HK, ...}}	41,11 kilovatios
14	Impedancia	y _{0Z} , o Z _{HX} , ...	6,93 %
15	Resistencia reactiva	y _{0X} , o X _{HX} , ...	6,92 %
dieciséis	Toque la configuración para la prueba de pérdida de carga	TCAROLINA DEL SUR	Nominal
Resultados de la prueba de secuencia cero			
17	Resultados de la prueba de circuito abierto de secuencia cero	Z ₁ , Z ₂	-
18	Resultados de la prueba de cortocircuito de secuencia cero	Z ₃	-
19	Parámetros del modelo T de secuencia cero	Z _{H0} , Z _{X0} , Z _{M0} para el modelo T	-
20	Configuración de puesta a tierra	Devanado 1 sólidamente conectado a tierra Devanado 2 conectado a tierra a través de la impedancia	-
21	Impedancia de puesta a tierra	Z _{GH} , Z _{GX} , ...	-

Tabla 2-9- Ejemplo 3: Parámetros del Modelo Genérico del Transformador

Escribe	Parámetros en Por Unidad	Parámetros en Unidades SI
Fuga de devanados impedancia	PU	— -
Pérdidas de carga equivalente resistencia	$r = \frac{PAGS_c}{AMEU_{Prueba\ SCT} \cdot 1000} - 0.00548 \text{ PU}$	$R_{H-X} = \frac{PAGS_{CAROLINA\ DEL\ SUR}}{yO_2} - \frac{PAGS_{CAROLINA\ DEL\ SUR}}{yO_3} = 3.1836 -$
Fuga de devanados resistencia reactiva	PU	$X_{H-X} = Z_{H-X} \sqrt{2 - R_{H-X}} = 40.1914 -$
Rama magnetizante entrada	$y = \%yO_{Exc} / 100 = 0.01 \text{ PU}$	$Y_X = \frac{yO_{jefe}}{V_{jefe}} = \frac{\%yO_{Exc} / 100}{Z_{Base\ X}} = -0.01302 \text{ uo}$ $Y_H = \frac{\%yO_{Exc} / 100}{Z_{Base\ H}} = -1.7218 \text{ mi-5u}$
Sin pérdidas de carga equivalente conductancia	$g_{amo} = \frac{PAGS_{Países\ Bajos}}{AMEU_{Prueba\ NL} \cdot 1000} = -0.0016467 \text{ PU}$	$GRAMO = \frac{PAGS_{Países\ Bajos}}{V_{jefe}} = \frac{PAGS_{Países\ Bajos}}{V_X\text{ clasificado}} = -0.002144 \text{ uo}$ $GRAMO = \frac{PAGS_{Países\ Bajos}}{2} = 2.8352 \text{ mi-6 u}$
Rama magnetizante susceptancia	$b = y_2 \sqrt{g_{amo} \cdot 2} = -0.009863 \text{ PU}$	$B_X = Y_2 \sqrt{X - GRAMO}^2 = -0.01284 \text{ uo}$ $B_H = Y_2 \sqrt{H - GRAMO_H}^2 = -1.70 \text{ mi-5u}$
secuencia cero parámetros	Circuito abierto	Circuito abierto

2.7 Transformadores de dos devanados con secundario en estrella primario delta

Un transformador delta-Y convierte la energía eléctrica trifásica sin un cable neutro en energía trifásica con un neutro. Esta conexión se usa comúnmente en ubicaciones residenciales comerciales, industriales y de alta densidad. El secundario se puede usar para proporcionar un punto neutro para suministrar energía de línea a neutral para servir cargas monofásicas. Además, el punto neutro se puede conectar a tierra por razones de seguridad. La conexión delta en el secundario bajo una gran cantidad de carga desequilibrada proporciona un mejor equilibrio de corriente para el primario. El delta primario atrapa la corriente de los terceros armónicos para que fluya en el sistema. Por estas razones, el transformador conectado en delta-Y se usa ampliamente en la red de distribución. El diagrama de transformador esquemático, representación vectorial, diagrama vectorial, y el diagrama vectorial de desplazamiento de fase de dos posibles transformadores conectados en delta se muestran en la Figura 2-17 y la Figura 2-18. Los grupos de vectores de estas conexiones son Dy5 y Dy1, respectivamente.

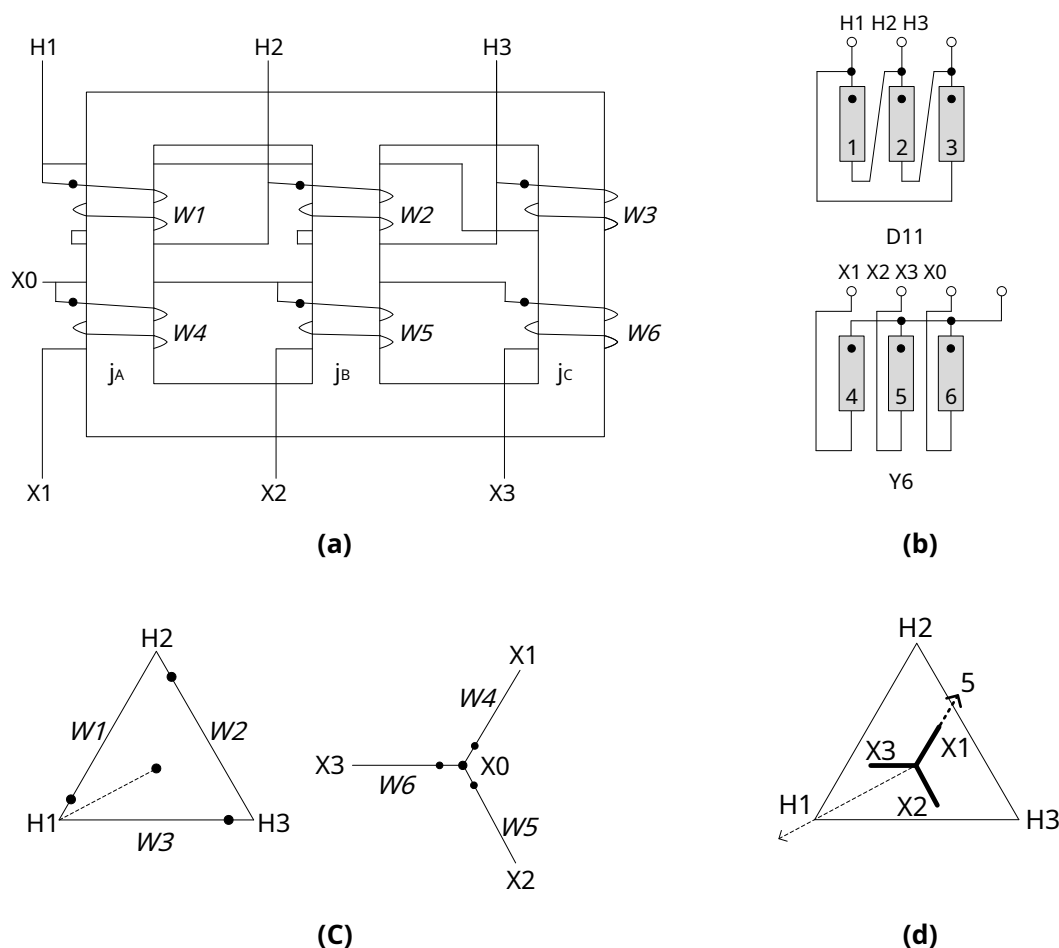


Figura 2-17- Transformador de dos devanados con delta primario Y secundario: a) Esquema diagrama del transformador, b) Diagrama de conexión de devanados, c) Diagrama vectorial, d) Fase diagrama vectorial de desplazamiento

2.7.1 Transformador Delta-Y de dos devanados: modelo genérico de secuencia positiva y negativa

El modelo genérico de un transformador trifásico delta-Y de dos devanados para secuencia positiva y negativa es similar al de un transformador YY o un transformador monofásico, como se muestra en la Figura 2-1.

2.7.2 Transformador Delta-Y de dos devanados: procedimiento para determinar los parámetros del modelo genérico

El procedimiento para modelar un transformador delta-Y trifásico de dos devanados en secuencia positiva o negativa es el mismo que el procedimiento de modelado del transformador YY descrito en la Sección 2.4.2, excepto que el modelo de secuencia cero para transformadores conectados en delta-Y está abierto. circuito desde el lado conectado en delta.

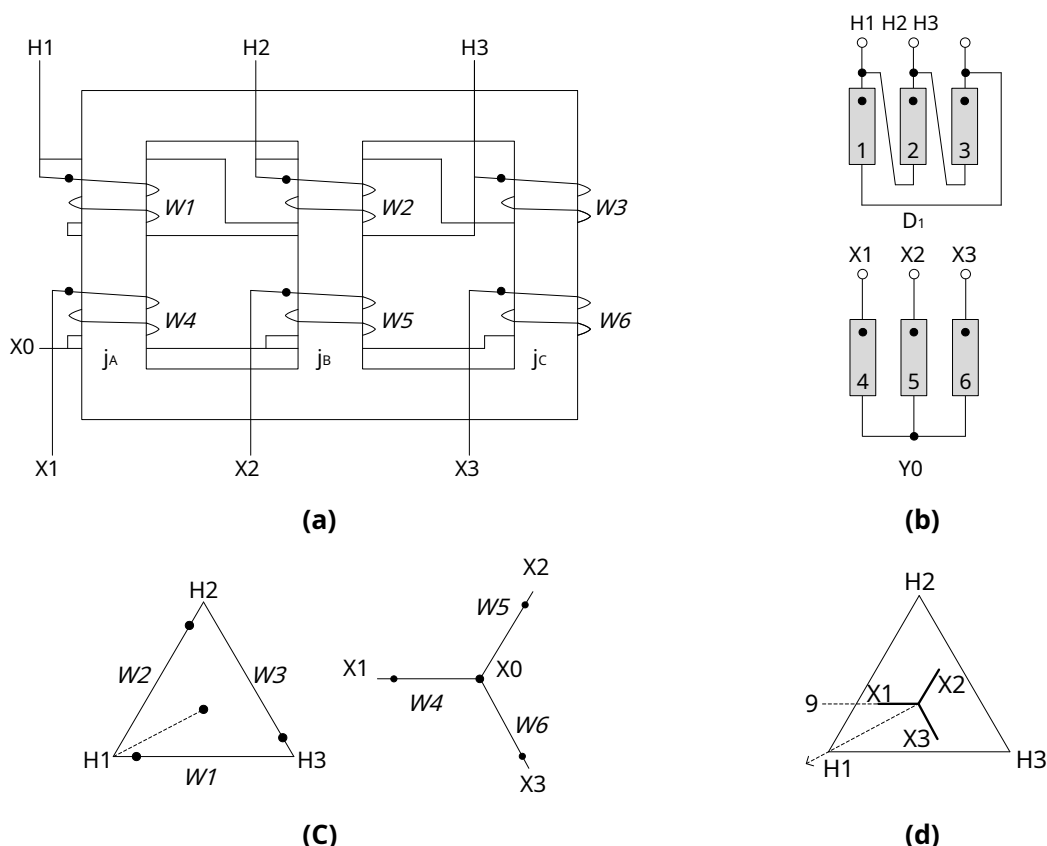


Figura 2-18- Transformador de dos devanados con delta primario Y secundario: a) Esquema diagrama del transformador, b) Diagrama de conexión de devanados, c) Diagrama vectorial, d) Fase diagrama vectorial de desplazamiento

2.7.3 Transformador Delta-Y de dos devanados: circuito equivalente de secuencia cero

Hay dos tipos de aplicaciones de transformadores de conexión Y-triángulo; la diferencia entre los dos tipos es si el punto neutral en el lado conectado en Y está conectado a tierra. La Tabla 2-5 muestra los dos tipos de conexión. La corriente de secuencia cero no fluye a través del transformador con una conexión Y-delta sin conexión a tierra si el lado conectado en Y está conectado a tierra; en cualquier caso, el conjunto de devanados secundarios conectados en triángulo siempre contribuye a la excitación de secuencia cero; sin embargo, la corriente de secuencia cero total que fluye a través de los terminales conectados en delta es cero y no aparece voltaje de secuencia cero en estos terminales porque la conexión delta opera como un circuito de bucle cerrado para los posibles voltajes inducidos a estos devanados debido a la fase cero. flujo de magnetización. Esto se muestra esquemáticamente en la Figura 2-19.

Tabla 2-10- Circuitos equivalentes de secuencia cero de transformadores conectados en Y-Delta

	Tipo de conexión	Modelo T	Modelo π	Símbolo
1				delta-y
2				delta-yn

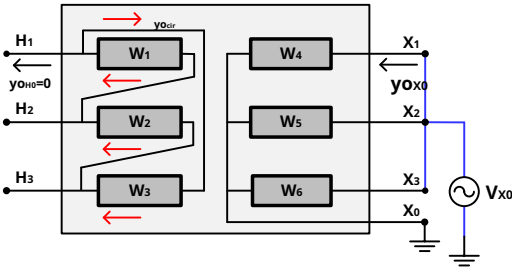


Figura 2-19- El comportamiento del transformador conectado a tierra delta-Y bajo excitación de secuencia cero

La impedancia de secuencia cero descrita en la Sección 1.15.3 b) se puede calcular a través de una sola prueba desde el lado conectado en Y. Por lo tanto:



en el cual z_0 , y_0 son, respectivamente, la impedancia de secuencia cero, la resistencia y la reactancia en el lado de bajo voltaje, y_0 y z_0 son parámetros de secuencia cero transferidos al lado de bajo voltaje.

2.7.4 Ejemplo 4: Transformador práctico Delta-yn1 de dos devanados

La Figura 2-20 muestra la información de la placa de identificación de un transformador conectado en Dyn de dos devanados de 138/13,8 kV, 20/26,7/33,3 MVA; el punto neutro está conectado a tierra a través de una resistencia de 40 Ω . El diagrama esquemático y el diagrama vectorial de este tipo de transformador se muestran en la Figura 2-17.

La tensión nominal del primario es de 138 kV y la del secundario de 13,8 kV. Tiene cambiador de tomas en carga de 17 pasos en el lado de alta tensión. El informe de prueba del transformador se muestra en la Figura 2-21-a a la Figura 2-21-e. Muestra que la prueba de pérdidas de carga se ha realizado para tres posiciones de derivación, incluida la relación de derivación nominal y voltajes nominales de $\pm 10\%$. Las resistencias de CC del lado de bajo voltaje y el lado de alto voltaje para todas las posiciones de toma se han medido y enumerado en el informe de prueba. Para determinar los parámetros del modelo genérico del transformador, solo se utilizan los resultados de la prueba de relación de derivación nominal. La posición de toma nominal es la posición 9.

La prueba de pérdidas de carga normalmente se realiza desde el lado de alto voltaje con el lado de bajo voltaje cortocircuitado. En el informe de la prueba se indica que el devanado de baja tensión se ha excitado para la prueba de pérdidas de carga. Es posible que se trate de un error tipográfico porque la corriente de prueba, 87,5 A, que debe ser la corriente nominal, está en el rango de la corriente nominal del lado de alto voltaje. Además, las mediciones de prueba de pérdidas de carga se han informado en el informe de prueba en lugar del voltaje de impedancia. Como se mencionó en la Sección 1.15.2, la corriente de prueba de pérdidas de carga no debe ser exactamente igual a la corriente nominal del lado de alta tensión. La Figura 2-21-c en la Sección 5.8 muestra que la prueba de pérdidas de carga se ha realizado utilizando una corriente 4.6% mayor que la corriente nominal. Como se explica en la Sección 1.15.2, el valor de pérdida de carga medido debe corregirse de la siguiente manera:

En consecuencia, la tensión de alimentación utilizada para hacer fluir la corriente nominal en el transformador durante la prueba de pérdidas de carga se corrige de la siguiente manera:

Estos cálculos son válidos solo si el núcleo magnético permanece lineal bajo esta sobreexcitación; por lo tanto, se supone que esto es así.

La información requerida para determinar los parámetros del modelo genérico enumerados en la Tabla 1-1 se extrae del informe de prueba. Estos datos se muestran en la Tabla 2-11. Los parámetros calculados para el modelo genérico se muestran en la Tabla 2-12.

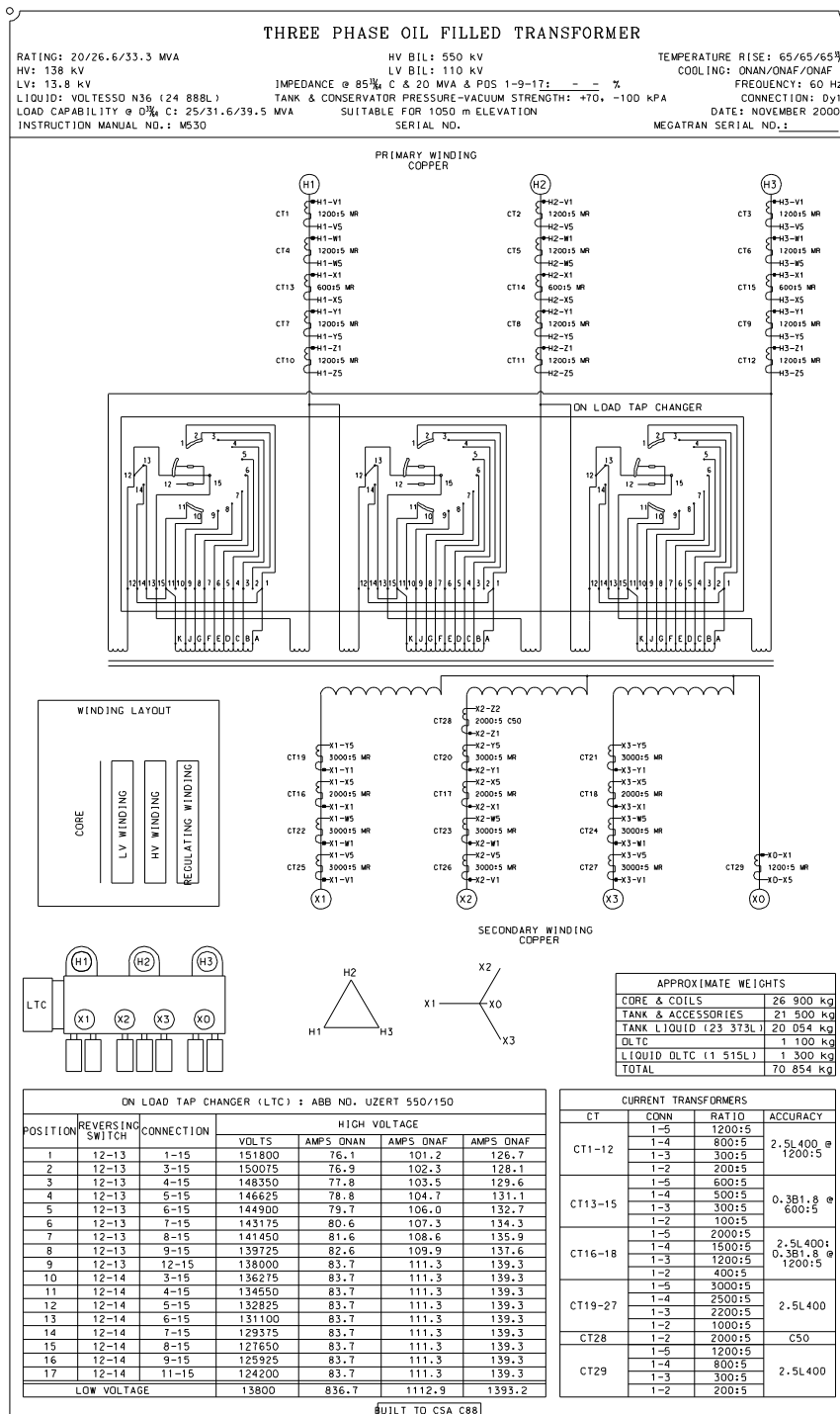


Figura 2-20- Ejemplo 4: Placa de identificación del transformador

5.1 MEGGER (core)

Resistance Megger: >	500	MΩ	Expected : >	50 MΩ
----------------------	-----	----	--------------	-------

Meghommeter : Brunelle Instruments, model 1010-T, 1000 Volts

Tested by : _____

Date : 6 December 2000

5.2 RESISTANCE

Primary (Corrected to 20°C)				
Position	Units	H1-H2	H2-H3	H3-H1
1	Ω	2.95	2.96	2.96
2	Ω	2.92	2.93	2.92
3	Ω	2.89	2.90	2.89
4	Ω	2.86	2.88	2.86
5	Ω	2.83	2.85	2.83
6	Ω	2.81	2.82	2.80
7	Ω	2.78	2.79	2.77
8	Ω	2.75	2.76	2.74
9	Ω	2.72	2.73	2.72
10	Ω	2.75	2.76	2.75
11	Ω	2.78	2.79	2.77
12	Ω	2.81	2.82	2.80
13	Ω	2.84	2.84	2.83
14	Ω	2.86	2.87	2.86
15	Ω	2.89	2.90	2.89
16	Ω	2.92	2.93	2.92
17	Ω	2.95	2.96	2.94

Secondary (Corrected to 20°C)				
Connection	Units	X1-X2	X2-X3	X3-X1
NA	mΩ	14.75	14.75	14.76

Transformer Ohmmeter : Multi-Amp, model 830280

Tested by : _____

Date : 10 December 2000

Figura 2-21-a- Ejemplo 4: Resultados de la prueba del transformador, página 1

5.3 RATIO TEST

TAP	Calculated	H1-H2 X1-X0	H2-H3 X2-X0	H3-H1 X3-X0	Polarity
1	19.054	19.074	19.074	19.074	N
2	18.837	18.854	18.854	18.854	N
3	18.620	18.640	18.640	18.640	N
4	18.402	18.420	18.420	18.420	N
5	18.185	18.202	18.202	18.202	N
6	17.967	17.982	17.982	17.982	N
7	17.750	17.764	17.764	17.764	N
8	17.533	17.550	17.550	17.550	N
9	17.315	17.330	17.330	17.330	N
10	17.098	17.112	17.112	17.112	N
11	16.880	16.892	16.892	16.892	N
12	16.663	16.674	16.674	16.674	N
13	16.446	16.460	16.460	16.460	N
14	16.228	16.242	16.242	16.242	N
15	16.011	16.022	16.022	16.022	N
16	15.793	15.804	15.804	15.804	N
17	15.570	15.590	15.590	15.590	N

Ratiometer : Multi-Amp, model TR-800

Tested by : _____

Date : 6 December 2000

5.4 APPLIED VOLTAGE TEST

(60 seconds)	Voltage (kV)	Leakage Current (mA)
H.V.	208	163
L.V.	34	55

H.V. A.C. source for hi-pot : Hipotronics, model 7200-40. 200 kV max

Tested by : _____

Date : 12/10 December 2000

5.5 APPLIED TEST (CT wiring and control wiring)

CT grounds were removed (terminals still shorted) and 2.5 kV was applied for 60 seconds.
There was no sign of discharge or leakage current.

Control box wiring grounds were removed and 1.5 kV was applied for 60 seconds.
There was no sign of discharge or leakage current.

Tested by : _____

Date : 14 December 2000

Figura 2-21-b- Ejemplo 4: Resultados de la prueba del transformador, página 2

5.6 DOUBLE INDUCED VOLTAGE TEST

2 x N (2/000 kV) induced for 1 hour on L.V., at 120 Hz

Megatran 120 Hz A.C. source, with step up transformer.

Tested by : _____ Date : 14 December 2000

5.7 ZERO-SEQUENCE IMPEDANCE

Tap	Voltage (Volts)	Current (Amps)	Power (Watts)	Impedance (%)
9	72.46	264.1	15520	8.64

Test done with LV line terminals shorted together, voltage applied between lines and neutral.

ACE 2000 power meter

Tested by : _____ Date : 10 December 2000

5.8 LOAD LOSS, IMPEDANCE

ONAN

Tested @ 21.5 °C	VOLTS	AMPS	WATTS	Loss Corrected @ 85 °C
Tap 9	9900	87.5	55400	60703
Tap 1	10240	71.4	49570	58561
Tap 17	7915	85.7	53730	60452

Energised winding: LV, ACE 2000 power meter

IMPEDANCE @ 20 000 kVA & @ 85°C	6.9 %
---------------------------------	-------

5.9 NO-LOAD LOSS AND EXCITATION CURRENT

Series	VOLTS	AMPS	LOSS (W)	Corrected @ 20 °C (W)
(25.5 kW quoted)				
100 %, Tap C	13848	3.1	22777	22991
Excitation current	0.4 %			

Energised winding: LV

ACE 2000 power meter

Tested by : _____ Date : 10 December 2000

Figura 2-21-c- Ejemplo 4: Resultados de la prueba del transformador, página 3

5.10 DISSIPATION FACTOR TEST

Setup				Readings	
H	L	Guard	Switch	Capacitance (pF)	Diss. (%)
HV	LV	GND	3-term	3974	0.289
HV	GND	LV	2-term	3317	0.233
LV	GND	HV	2-term	12220	0.319

Capacitance Bridge, Criterion Instrument Inc., model TCB-108

Tested by :

Date : 6 December 2000

5.11 ACCESSORIES TEST

All accessories: fan switches and contactors, door switch and light, thermostat and heater, outlet as well as auxiliaries contacts (temperature, level, pressure) were tested for proper operation.

Tested by :

Date : 6 December 2000

5.12 PRESSURE VACUUM TEST

Both tests were performed with all accessories mounted on the transformer.

Vacuum was pulled to 1mm of Hg. The vacuum pump was turned off, pressure then stabilised to 1.5mm. After 10 minutes the pressure was still 1.5mm, as well as after 13 minutes. (4-12-00)

Fine white powder was put on all joints and soldering.

A 35 kPa pressure was applied for 24 hours.

Careful examination did not show any displacement of powder.

Tested by :

Date : 11 December 2000

Figura 2-21-d- Ejemplo 4: Resultados de la prueba del transformador, página 4

5.13 TEMPERATURE RISE TEST

Temperature Rise Test (Heat Run)

Megatran Job

Tested by:

Date: 7-8 December 2000

Unit Tested: Serial # 20011002

Tests and calculations performed as described in CSA-C88 Section 16.1

Starting Resistances @ 20 °C	
X2-X0	H2-H1
14.75	2720 (mOhm)

Final Results		
33333 kVA Heat Run (Final ambient: 21 °C)		
	LV X2-X0	HV H2-H1
Final resistance:	17.7	3260
Time (s):	180	180
Temp (°C)	70.90	70.53
Correction for Current	0.00	0.00
Correction to Shutdown	+1.81	+3.18
Final Temp (°C)	72.71	73.71
Winding Rise (°C)	51.71	52.71

Figura 2-21-e- Ejemplo 4: Resultados de la prueba del transformador, página 5

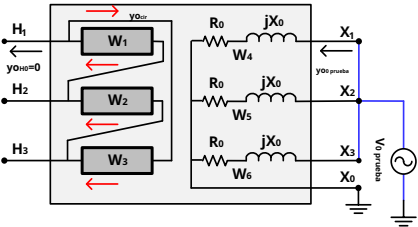
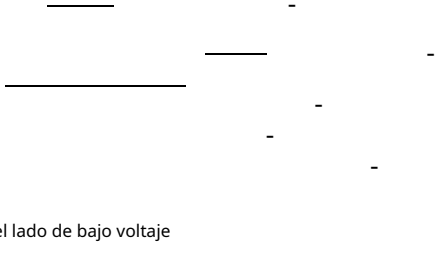
Tabla 2-11- Información Requerida para Modelar el Transformador del Ejemplo 4

Artículo	Parámetro del transformador	Símbolo	Valores
General			
1	Clasificaciones ONAN del transformador	AMEU _{EN UNA}	20 MVA
2	Tensión de devanados (primario, secundario)	V _H , V _X ,... o V _{PAGS} , V _S , ...	138 kV / 13,8 kV
3	Tipo de conexión	-	delta-Y
4	Rango de toque	t ₁ , t ₂ , ...	± 10%
5	Número de pasos de toque	-	17
6	Cuerda con grifo regulable	-	Lado primario (alto)
7	Ángulo de fase de los devanados	-1, -2, ...	30°
Resultados de la prueba sin pérdida de carga			
8	Prueba de pérdida sin carga MVA	AMEU _{Prueba de NL}	20 MVA
9	Pérdida sin carga	PAGS _{Pruebas Bajas}	22.991 kilovatios
10	corriente de excitación	y _{0Exc} [*]	3,1 A (0,4 % *)
11	Toque la configuración para la prueba de pérdida sin carga	Pruebas Bajas	Nominal
Resultados de la prueba de pérdida de carga			
12	Prueba de pérdida de carga MVA	AMEU _{Prueba SC, ...}	20 MVA
13	Pérdida de carga	PAGS _{CAROLINA DEL SUR, PAGS_{L, H, ...}}	55.505 kilovatios **
14	Impedancia	y _{0Z} , o Z _{HX} , ...	6,9 % *
15	Voltaje de prueba de pérdida de carga	V _{Prueba}	9466,66V**
dieciséis	Prueba de pérdida de carga Corriente	y _{0Prueba} **	83.67A
17	Resistencia reactiva	y _{0X} , o X _{HX} , ...	No reportado
18	Toque la configuración para la prueba de pérdida de carga	CAROLINA DEL SUR	Nominal
Resultados de la prueba de secuencia cero			
19	Resultados de la prueba de circuito abierto de secuencia cero	Z ₁ , Z ₂	-
20	Resultados de la prueba de cortocircuito de secuencia cero	V _{Prueba} , Y _{0Prueba} , PAGS _{Prueba} , Z _{X0}	72,46 V, 264,1 A, 15,52kW, 8,64% @ 20MVA
21	Parámetros del modelo T de secuencia cero	Z _{H0} , Z _{X0} Z _{M0} para el modelo T	-
22	Configuración de puesta a tierra	Devanado 2 conectado a tierra a través de la resistencia	40 ohmios
23	Impedancia de puesta a tierra	Z _{GH} , Z _{GX} , ...	-

* y son valores garantizados. Los valores de prueba deberían haber sido corregidos.

** Valores corregidos.

Tabla 2-12- Ejemplo 4: Parámetros del Modelo Genérico del Transformador

Escribe	Parámetros en Por Unidad	Parámetros en Unidades SI
Fuga de devanados impedancia	$\frac{PAGS_{SC}}{AMEU_{Prueba SCT} \cdot 1000}$ -0.002775 PU	$R_{HX} = \frac{PAGS_{CAROLINA DEL SUR} \cdot PAGS_{CAROLINA DEL SUR}}{y_o^2 \cdot CAROLINA DEL SUR \cdot 3 y_o \text{ clasificación H}}$ -2.6428 -
Pérdidas de carga resistencia equivalente	r_s -0.002775 PU	$R_{HX} = \frac{PAGS_{CAROLINA DEL SUR} \cdot PAGS_{CAROLINA DEL SUR}}{y_o^2 \cdot CAROLINA DEL SUR \cdot 3 y_o \text{ clasificación H}}$ -2.6428 -
Fuga de devanados resistencia reactiva	X_{H2} -65.27 - PU	$X_{H2} = \frac{Z_2}{R_H} \sqrt{\frac{X_H}{H}}$ -65.27 -
Rama magnetizante entrada	$y = \%y_o^{Exc} / 100$ -0,0037PU	$Y_X = \frac{y_o^{efe}}{V_{jefe}} - \frac{\%y_o^{Exc} / 100}{Z_{base} \times mi}$ -3.9mi-4Üo $Y_H = \frac{\%y_o^{Exc} / 100}{Z_{Base H}}$ -3.886mi-6Ü
Sin pérdidas de carga conductancia equivalente	$gramo$ -0.00115 PU	$GRAMO_X = \frac{PAGS_{jefe}}{V_{jefe}} - \frac{PAGS_{NLT}}{V_{clasificado}^2}$ -1.207mi-4Üo $GRAMO_H = \frac{PAGS_{Bajos}}{2}$ -1.20726mi-6Ü $V_{clasificación H}$
Rama magnetizante susceptancia	$b = y_2 \sqrt{gramo_2}$ -0.00352PU	$B_X = Y_A \sqrt{X - GRAMO_X}$ -3.69mi-4Üo $B_H = Y_A \sqrt{H - GRAMO_H}$ -0.0369Ü
secuencia cero parámetros	como se informó PU 	 Todo en el lado de bajo voltaje

2.8 Autotransformadores de dos devanados (estrella-Y)

El diagrama esquemático del transformador, la representación vectorial, el diagrama vectorial y el diagrama vectorial de desplazamiento de fase de un autotransformador de dos devanados se muestran en la figura 2-22. El grupo vectorial de autotransformadores de dos devanados es $Y_{\text{norte}}-y_{\text{norte}}$. El punto neutro generalmente está conectado a tierra.

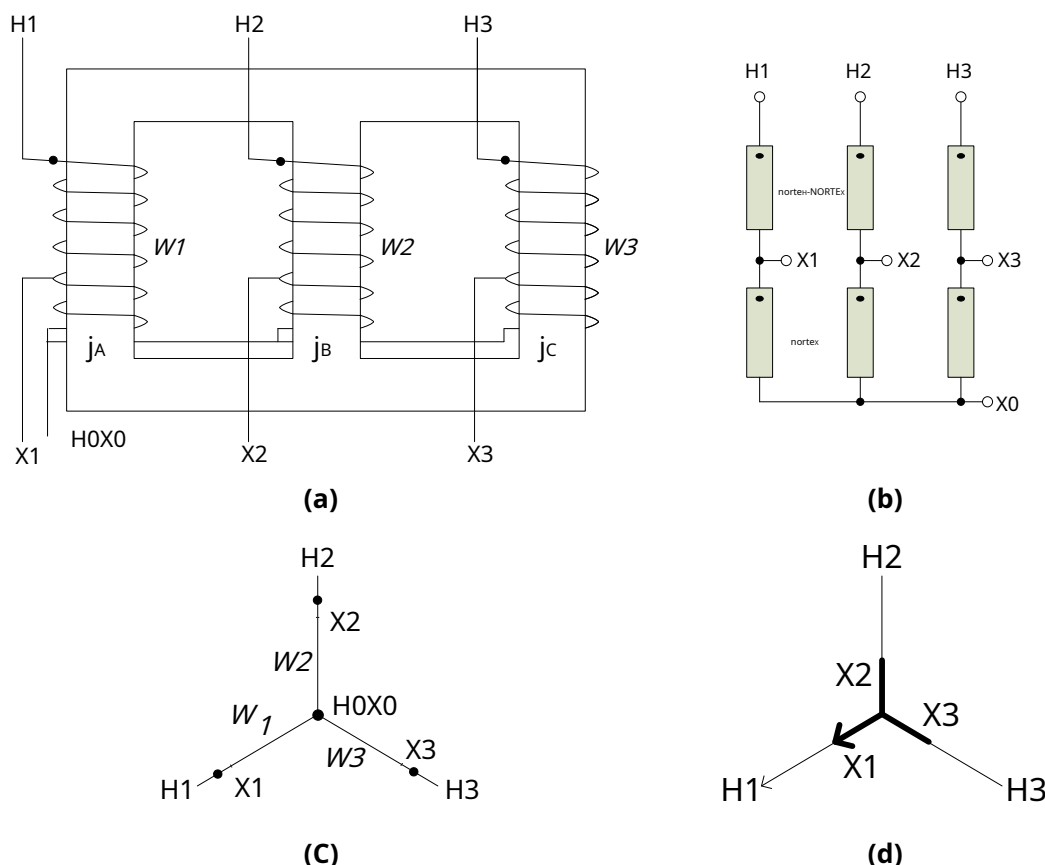
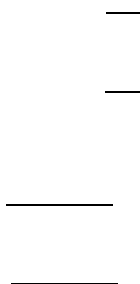


Figura 2-22- Autotransformador de dos devanados: a) Diagrama esquemático del transformador, b) Devanado diagrama de conexión, c) Diagrama vectorial, d) Diagrama vectorial de desplazamiento de fase

2.8.1 Autotransformador de dos devanados: modelo genérico de secuencia positiva y negativa

Para construir el modelo de circuito de un autotransformador de dos devanados, el devanado de cada fase o tramo se puede considerar como un devanado separado. Como se describe en la Sección 1.10, el circuito equivalente de un autotransformador es generalmente similar al circuito equivalente de un transformador normal de dos devanados. Por lo tanto, el modelo genérico de un autotransformador trifásico de dos devanados para secuencia positiva y negativa es similar al de un transformador monofásico, como se muestra en la Figura 2-1, excepto que, por tener un devanado común entre el primario y secundaria, los parámetros de impedancia en serie equivalentes, teóricamente, son los siguientes:



Este modelo genérico es aplicable para todo tipo de transformadores autoconectados, así como para autotransformadores monofásicos, trifásicos tipo carcasa, tipo núcleo de 4 y 5 patas y para tres bancos de transformadores monofásicos.

2.8.2 Autotransformador de dos devanados: procedimiento para determinar los parámetros del modelo genérico

El procedimiento para determinar los parámetros del circuito equivalente a partir de los resultados de las pruebas es el mismo que para los transformadores YY conectados de dos devanados descritos en la Sección 2.4.2, excepto que para el modelo de secuencia cero el tipo de conexión del autotransformador es el mismo que el del modelo de secuencia cero. modelo de secuencia de un transformador YY puesto a tierra. La siguiente sección describe cómo se modela el circuito equivalente de secuencia cero de un autotransformador de dos devanados.

2.8.3 Autotransformador de dos devanados: circuito equivalente de secuencia cero

El circuito equivalente de secuencia cero de un banco de tres autotransformadores monofásicos conectados como autotransformadores trifásicos y trifásicos tipo carcasa para que el punto neutro esté sólidamente conectado a tierra es el mismo que el circuito equivalente de secuencia positiva. Si el punto neutro no está conectado a tierra, el circuito equivalente de secuencia cero es un circuito abierto. Si el punto neutro está conectado a tierra a través de una impedancia, como se muestra en la Figura 2-23, esta impedancia transporta la suma de la corriente de tierra en los tres devanados. La caída de voltaje en esta impedancia será $I_0 Z_n$. Si esta impedancia de puesta a tierra se transfiere al lado de alta tensión aparece como una impedancia $3Z_n$ en la excitación de secuencia cero. Los autotransformadores generalmente se conectan a tierra sin conexión a tierra. impedancia.

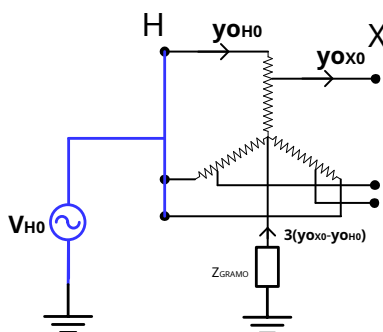


Figura 2-23- Excitación homopolar de un autotransformador

El circuito equivalente de secuencia cero de un autotransformador tipo núcleo de tres patas, como se muestra en la figura 2-24, es similar al circuito equivalente de secuencia cero de un transformador conectado Yy conectado a tierra, excepto por el efecto de la impedancia de puesta a tierra del punto neutro en el parámetros. Como se describió anteriormente, si el punto neutro está conectado a tierra a través de una impedancia de puesta a tierra, esta impedancia aparece como una impedancia — en el lado de alta tensión y como impedancia negativa

— en el lado de baja tensión. Cuando el neutro no está conectado a tierra, —y las impedancias de la estrella equivalente también se vuelven infinitas porque aparentemente no hay caminos para las corrientes de secuencia cero entre los devanados, aunque existe un circuito físico y se puede obtener un balance de amperios-vueltas. El modelo de secuencia cero de un autotransformador también es similar a su modelo de secuencia positiva. Las explicaciones y la ecuación descritas anteriormente y en la Sección 2.4.2 también son válidas para el modelo de secuencia cero. Las pruebas de impedancia de secuencia cero para determinar los parámetros de secuencia cero a partir de las mediciones de prueba descritas en la Sección 1.15.3 c) son similares a las de un transformador conectado en Yy.

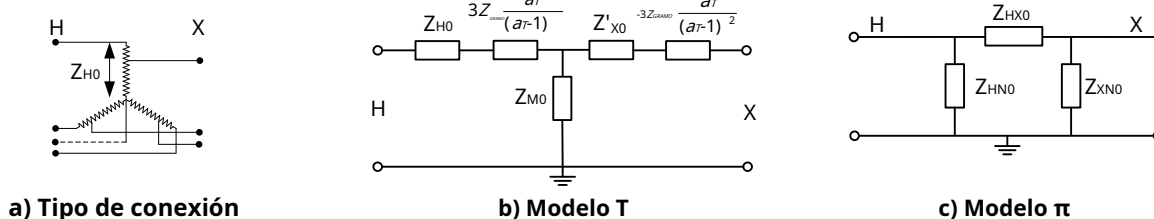


Figura 2-24- Circuitos equivalentes homopolares de transformadores YY

2.8.4 Ejemplo 5: Autotransformador práctico de dos devanados (YY conectado)

La Figura 2-25 muestra la información de la placa de identificación de un autotransformador de dos devanados de 250/138 kV GRDY, 100/134.4/160 MVA. El punto neutro está sólidamente conectado a tierra. El diagrama esquemático y el diagrama vectorial de este tipo de transformador se muestran en la Figura 2-22. La tensión nominal del primario es de 250 kV y la tensión nominal del secundario es de 138 kV. Tiene un cambiador de tomas bajo carga de 19 pasos en la terminal de punto medio. La Figura 1-28-a muestra el diagrama esquemático de este tipo de cambiador de tomas. Como se describe en la Sección 1.12, este tipo de cambiador de tomas se usa cuando el voltaje en el secundario debe mantenerse constante mientras que el voltaje en el lado de alto voltaje puede variar. En consecuencia, el flujo en

el núcleo es constante. El informe de prueba del transformador se muestra en la Figura 2-26. Muestra que la prueba de pérdidas de carga se ha realizado para tres posiciones de derivación, incluida la relación de derivación nominal y voltajes nominales de $\pm 7,5\%$. Para determinar los parámetros del modelo genérico del transformador, solo se utilizan los resultados de la prueba de relación de derivación nominal.

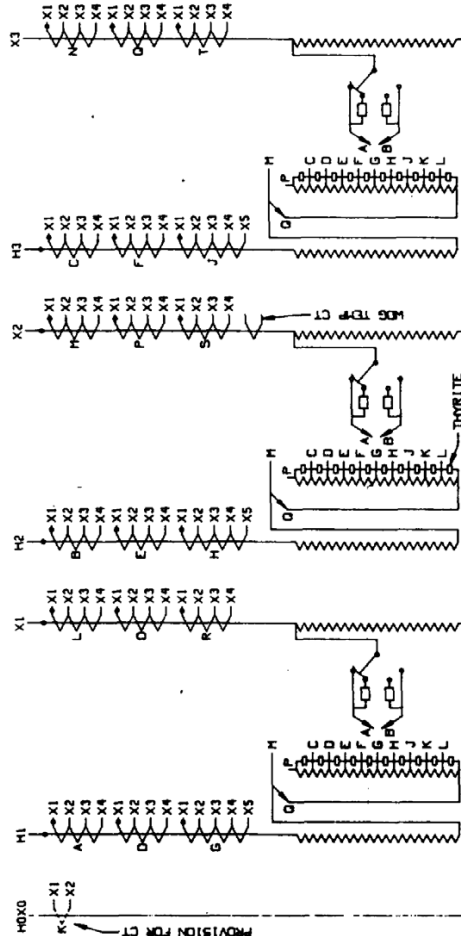
La información requerida para determinar los parámetros del modelo genérico enumerados en la Tabla 1-1 se extrae del informe de prueba. Estos datos se muestran en la Tabla 2-13. Los parámetros calculados para el modelo genérico se muestran en la Tabla 2-14.

AUTO-TRANSFORMER

NO 284235
EN 58361
BUILT 1961

FULL WAVE IMPULSE LEVEL
HV LINE 900 KV
LV LINE 550 KV
HV AND LV NEUT 110 KV

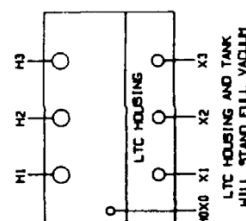
90000/120000/150000 KVA OUTPUT - 55°C - DNAN/DNAF/DNAF
100800/134400/168000 KVA OUTPUT - 65°C - DNAN/DNAF/DNAF
3 PHASE - 60 HZ
250000/138000 EMPT VOLTS



HIGH VOLTAGE		LOW VOLTAGE	
NO	AMPERES	NO	AMPERES
A B H	90 120 150 168	X1	1200-5
TO TO TO	193 258 322 361	X2	1000-5
1 L	268750	X3	800-5
2 K	266670	X4	600-5
3 J	264580	X5	400-5
4 H	262500	X6	200-5
5 G	260420	X7	2000-5
6 F	258330	X8	1600-5
7 E	256250	X9	1500-5
8 D	254170	X10	1200-5
9 C	252080	X11	1000-5
10 B	250000	X12	800-5
11 A	247920	X13	600-5
12 K	245830	X14	400-5
13 J	243750	X15	200-5
14 H	241670	X16	2000-5
15 G	239580	X17	1600-5
16 F	237500	X18	1500-5
17 E	235420	X19	1200-5
18 D	233330	X20	1000-5
19 C	231250	X21	800-5
		X22	600-5
		X23	400-5
		X24	200-5
		X25	200-5

LOW VOLTAGE	
VOLTS	AMPERES
90	120 150 168
138000	377 502 628 703

CURRENT TRANSFORMERS	
CT	CONNECT RATIO
A B C	1200-5
D E F	1000-5
G H J	800-5
K	600-5
L M N O	400-5
P Q R S T	200-5
U V W X Y Z	100-5



CONTROL DIAGRAM 582E/69

IMPEDANCE AT 150 MVA

MADE IN CANADA AT GUELPH, ONTARIO

WARNING - THIS UNIT IS FILLED WITH OIL. IN THE EVENT OF A LEAK, DO NOT ATTEMPT TO REPAIR OR REPLACE ANY PARTS WITHOUT FIRST CONSULTING THE INSTRUCTION BOOK. IF NECESSARY, CONTACT THE MANUFACTURER FOR ASSISTANCE.

NP277374 REV 0

Figura 2-25- Ejemplo 5: Placa de identificación del autotransformador

RECORD OF TRANSFORMER TESTS

Rating		90/120/150 MVA-OUTPUT-55-ONS/ONP/ONPP-3-60-250/138 KV GrdY			Superseded
Customer		Calgary Power Ltd.			By Test Report
Notice		58361			73-11-06
S.O.		721127			Reg. No. 9261-1412
Serial Numbers		284235			Guarantee
NO-LOAD LOSSES		Volts			138000
Connection		Amps.			1.11
250 KV-(138 KV)		K.W.			81.33
		Pos. 1			Pos. 10
		Pos. 19			97 KW
LOAD LOSSES		Temp. °C.			75
Connection		Volts			12320 = 8.90
250 KV-(138 KV)		Amps.			628
Total Loss 150 MVA		K.W. 150 MVA			339.50
RESISTANCE		H.V. Conn. Series			.5075
between terminals		L.V. Conn. Common			.4120
at 25° C 75° C		Tertiary			.4120
EFFICIENCY		5/4 Load			99.70
Based On		4/4 Load			99.75
50 MVA		3/4 Load			99.80
os. 10		2/4 Load			99.79
		1/4 Load			99.73
LOAD REGULATION		100% P.F.			% P.F.
HEAT RUN		ONS			ONPP
% Load		100			100
Gala. Water per Minute					
Hours Run		7 1/2 hrs.			10 hrs.
TEMPERATURE		Idler Oil			23.4
°C		Water In			23.9
		Water Out			
OIL RISE BY THERMOMETER		49.0			50.2
RISE BY R.M.		H.V. Coils			45.5
		L.V. Coils			43.9
		Tertiary			46.6
Zero Sequence Impedance		$Z_1 = 317 \text{ Ohms}$			$Z_2 = 103 \text{ Ohms}$
at 150 MVA - 240 KV base					$Z_0 = 6.22 \text{ Ohms}$
INSULATION TEST		H.V. to L.V., Tertiary and Core			34000
Impulse Tests in		L.V. to Tertiary and Core			Volts
Report		Tertiary to Core			Minutes
		Induced Voltage			7200 cye.
		HV - 395 KV			7200 cye.
		LV - 230 KV			
Reported 5th Mar 62		Certified Correct			
		Approved By			

Tabla 2-13- Información Requerida para Modelar el Transformador del Ejemplo 5

Artículo	Parámetro del transformador	Símbolo	Valores
General			
1	Clasificaciones ONAN del transformador	AMEU _{EN UNA}	90 MVA
2	Voltajes de bobinado (primario secundario, ...)	V _H , V _X , ... V _{PAGS} , V _S , ... V ₁ , V ₂ , ...	250 kV / 138 kV
3	Tipo de conexión	-	Autotransformador
4	Rango de toque	t ₁ , t ₂ , ...	± 7,5%
5	Número de pasos de toque	-	18
6	Cuerda con grifo regulable	-	Lado primario (alto)
7	Ángulo de fase de los devanados	-1, -2, ...	0°
Resultados de la prueba sin pérdida de carga			
8	Prueba de pérdida sin carga MVA	AMEU _{Prueba de NL}	-
9	Pérdida sin carga	PAGS _{Pruebas Bajos}	81,33 kilovatios
10	corriente de excitación	yO _{Exc} ^a	1,11 A
11	Toque la configuración para la prueba de pérdida sin carga	Dratos Bajos	Nominal , toque 10
Resultados de la prueba de pérdida de carga			
12	Prueba de pérdida de carga MVA	AMEU _{Prueba SC, ...}	150 MVA
13	Pérdida de carga	PAGS _{CAROLINA DEL SUR, PAGS_{IL, HK, ...}}	302,40 kilovatios
14	Impedancia	yOZ, o Z _{HX} , ...	8,47 %
15	Resistencia reactiva	yOX, o X _{HX} , ...	No reportado
dieciséis	Toque la configuración para la prueba de pérdida de carga	TCAROLINA DEL SUR	Nominal
Resultados de la prueba de secuencia cero			
17	Resultados de la prueba de circuito abierto de secuencia cero	Z ₁ , Z ₂	317-, 103-
18	Resultados de la prueba de cortocircuito de secuencia cero	Z ₃	6.22-
19	Parámetros del modelo T de secuencia cero	Z _{H0} , Z' _{X0} Z _{M0} para el modelo T	-
20	Configuración de puesta a tierra	Punto neutro de los devanados método de puesta a tierra	sólidamente conectado a tierra
21	Impedancia de puesta a tierra	Z _{GH} , Z _{GX} , ...	0, 0
22	Prueba de impedancia de secuencia cero MVA y kV		150MVA y 240 kV

Tabla 2-14- Ejemplo 5: Parámetros del Modelo Genérico del Transformador

Escribe	Parámetros en Por Unidad	Parámetros en Unidades SI
Fuga de devanados impedancia	PU	— -
Pérdidas de carga equivalente resistencia	$r = \frac{PAGS_{CAROLINA DEL SUR}}{METW_{Virginia} Prueba SCT-1000} - 0.002016$ PU	$R_{H-X} = \frac{PAGS_{CAROLINA DEL SUR}}{2} - \frac{PAGS_{CAROLINA DEL SUR}}{3} - 0.840 -$ $Y_{O_{CAROLINA DEL SUR}} Y_{O_{Clasificación H}}$
Fuga de devanados resistencia reactiva	PU	$X_{H-X} = \sqrt{Z_{H-X}^2 - R_{H-X}^2} - 35.282 -$
Rama magnetizante entrada	$y = \%YO_{Exc} / 100 - 0.00295$ PU	$Y_X = \frac{YO_{jefe}}{V_{jefe}} - \frac{\%YO_{Exc} / 100}{Z_{Base X}} - 1mi-5\psi_0$ $Y_H = \frac{\%YO_{Exc} / 100}{Z_{Base H}} - 4.248mi-6\psi$
Sin pérdidas de carga equivalente conductancia	$g_{amo} = \frac{PAGS_{Países Bajos}}{AMEU_{Prueba NL T-1000}} - 0.0009037$ PU	$GRAM_{XO} = \frac{PAGS_{jefe}}{V_{jefe}} - \frac{PAGS_{Países Bajos}}{V_{X clasificado}} - 4.2706mi-6 \psi_0$ $GRAM_H = \frac{PAGS_{Países Bajos}}{V_{Clasificación H}} - 1.3013mi-6 \psi$
Rama magnetizante susceptancia	$b = -y_2 \sqrt{g_{amo}^2} - 0.00281$ PU	$B_X = -Y_2 \sqrt{X - GRAM_X} - 1.327mi-5\psi_0$ $B_H = -Y_2 \sqrt{H - GRAM_H} - 4.0438mi-6\psi$
secuencia cero parámetros	PU PU PU PU 13.606 pu PU	- - - - - -

2.9 Transformadores reguladores de tensión de dos devanados

Los sistemas de distribución están diseñados para que las magnitudes de voltaje permanezcan dentro del rango especificado requerido por ANSI C84. Esto se puede lograr mediante el uso de un regulador de voltaje adecuadamente controlado. Los transformadores de potencia de regulación llamados transformadores de cambio de toma de carga y los reguladores de voltaje escalonados monofásicos o trifásicos son equipos típicos de tipo transformador que se utilizan para mejorar el perfil de voltaje de un sistema. Los reguladores de voltaje se utilizan en subestaciones o (a veces) en circuitos de líneas de transmisión para regular los voltajes de los circuitos alimentadores. También se utilizan a lo largo de las líneas de transmisión donde la caída de voltaje es un problema. Los reguladores de voltaje por pasos con cambio de toma bajo carga se utilizan para mantener el voltaje dentro de un rango requerido.

El diseño de un regulador de voltaje escalonado consta de un autotransformador con un mecanismo de cambio de tomas de carga de extremo de línea en el que el devanado común forma un circuito de derivación conectado de línea a neutro (y alimenta la excitación), y el devanado de derivación forma la serie. bobinado y proporciona el voltaje para la compensación. El primario y el secundario tienen las mismas clasificaciones de voltaje. De acuerdo con IEEE C57.15, los reguladores de paso se pueden conectar en una conexión Tipo "A" o Tipo "B", como se muestra en la Figura 2-27 y la Figura 2-28.

Un regulador de voltaje de paso tipo A tiene el circuito primario conectado directamente al devanado de derivación del regulador. El devanado en serie se conecta al devanado en derivación ya través de las derivaciones al circuito regulado, como se muestra en la Figura 2-27. En este tipo de regulador, la excitación del núcleo varía porque el devanado de derivación está conectado al circuito primario.

Un regulador de voltaje de paso tipo B tiene el circuito primario conectado, a través de derivaciones, al devanado en serie del regulador. El devanado en serie está conectado directamente al circuito regulado, como en la figura 2-28. En este tipo de regulador, la excitación del núcleo es constante porque el devanado en derivación está conectado a través del circuito regulado.

El cambio de tensión se obtiene cambiando las tomas del devanado en serie del autotransformador y, en consecuencia, variando la relación de transformación. La posición del grifo se determina por un circuito de control llamado compensador de caída de línea. Los reguladores de paso estándar contienen un interruptor de inversión que permite un rango de regulador de $\pm 10\%$, generalmente en 32 pasos de aproximadamente $0,625\%$ cada uno. La posición elevada en la que el regulador de voltaje aumenta el voltaje se denomina posición de refuerzo, y la posición inferior en la que el regulador de voltaje reduce el voltaje se denomina posición de reducción. La polaridad de un regulador de voltaje es intrínseca a su diseño. La polaridad relativa del devanado en derivación y los devanados en serie de un regulador de voltaje escalonado en los modos elevador y reductor será diferente en los reguladores de voltaje tipo A y tipo B. La regulación de voltaje de un regulador de voltaje de paso está dada por:

en el cual α es la posición del grifo y V_d es el voltaje por derivación por unidad del voltaje nominal del devanados También, positivo α es para la posición elevada y negativa α es para la posición baja. Para Regulador de voltaje de paso de 32 pasos $\alpha = \frac{V_d}{32}$. Se llama un regulador de voltaje de paso de 32-5/8%.

Cuando los devanados de tres reguladores monofásicos se conectan internamente para formar un regulador trifásico, el regulador funciona de modo que las tomas de todos los devanados cambien al mismo tiempo y, como resultado, solo se requiere un circuito compensador. Los reguladores trifásicos sólo se conectarán en estrella trifásica o triángulo cerrado.

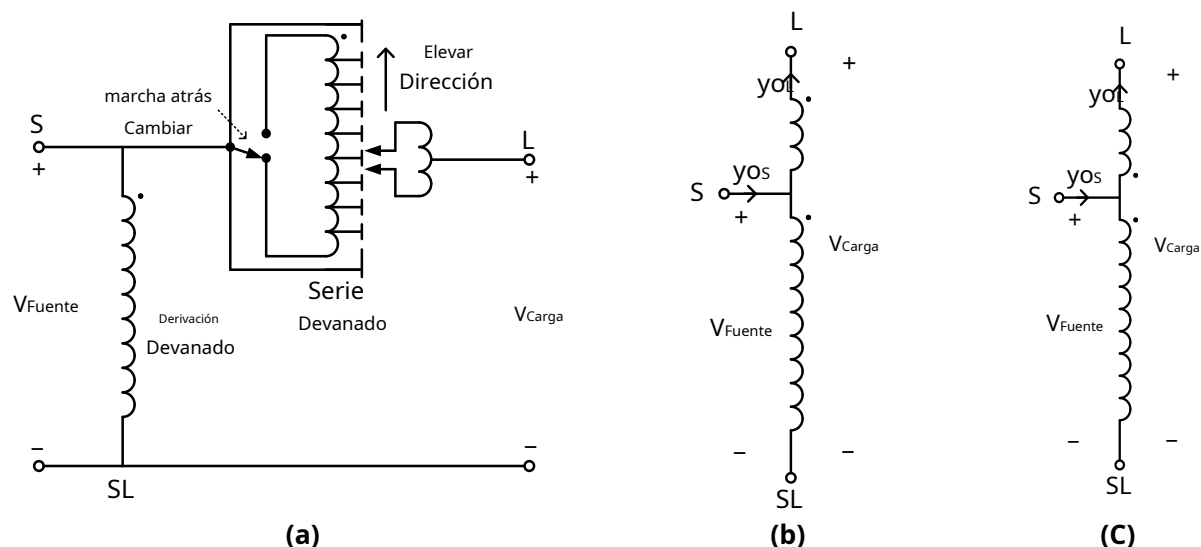


Figura 2-27- a) Diagrama esquemático de un regulador de voltaje de paso tipo A monofásico, b) Posición Boost, c) Posición Buck

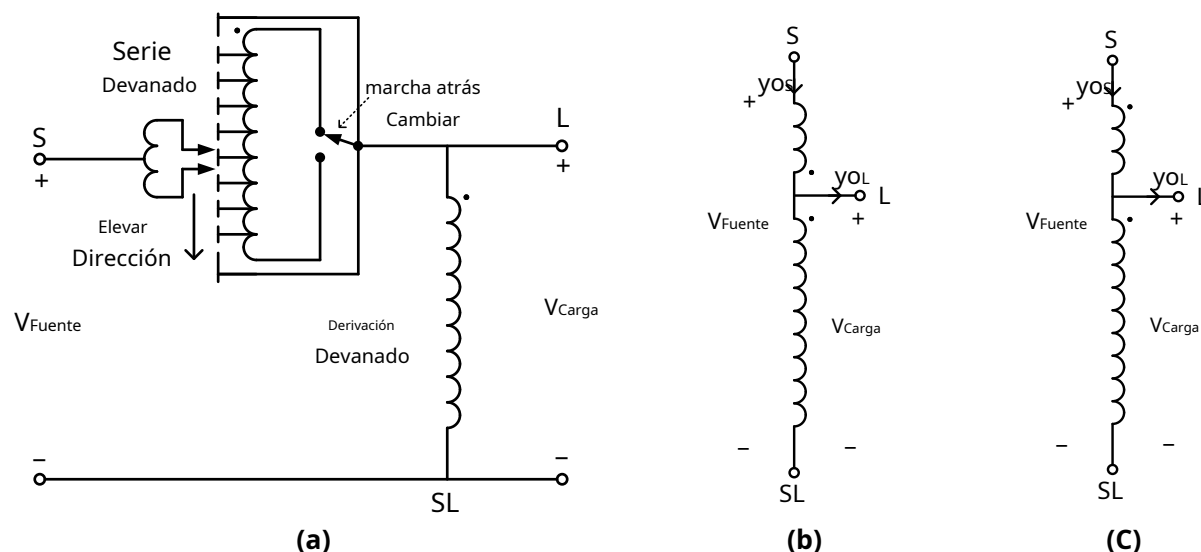


Figura 2-28- a) Diagrama esquemático del regulador de voltaje de paso tipo B monofásico, b) Boost posición, c) Posición Buck

Los reguladores trifásicos sólo se conectarán en estrella trifásica o en triángulo cerrado. En esta guía, solo se considera el regulador de voltaje escalonado conectado en estrella trifásica. En la práctica, el punto neutro en una conexión en estrella no es para conexión a tierra; por lo tanto, no es accesible en los terminales del transformador.

La impedancia de un transformador regulador de tensión por pasos es muy baja y las corrientes de cortocircuito en los terminales del transformador están determinadas principalmente por las características del sistema en el

Ubicación del transformador. La impedancia inherente de cualquier componente conectado directamente al regulador de voltaje mediante barras o cables cortos debe disponerse de modo que no haya posibilidad práctica de falla entre ellos.

En la red de Alberta, los transformadores reguladores de voltaje generalmente se conectan después de los transformadores YY para regular el voltaje del alimentador de carga, y ambos puntos neutros del transformador se han conectado a tierra. El punto neutro del transformador regulador de voltaje también está conectado a tierra.

Las pérdidas de carga de un regulador de voltaje son pérdidas disipadas en una carga específica transportada por el regulador de voltaje. Las pérdidas de carga se miden aplicando suficiente voltaje a través del devanado en derivación para hacer que fluya una corriente específica en los devanados mientras el devanado en serie está en cortocircuito. La posición de toma no debe estar en la posición normal porque en la posición de toma normal, el primario se conecta inmediatamente al secundario sin que ningún devanado gire entre ellos.

La pérdida de carga es la pérdida de carga promedio en cuatro posiciones de derivación, incluidas las posiciones de reducción máxima y adyacente al máximo y las posiciones de refuerzo máxima y adyacente al máximo con corriente nominal en los devanados. Por lo general, los resultados de la prueba no incluyen la pérdida de carga para todas estas cuatro posiciones de toma; los resultados de la prueba generalmente tienen solo los resultados para la posición máxima de reducción y la posición máxima de impulso. En este caso, la pérdida de carga es el promedio de estos dos valores. Debido a que ambas pérdidas de carga informadas (o incluso cuatro pérdidas de carga, si se informan) se miden a la corriente nominal, los parámetros de impedancia en serie del circuito equivalente son el valor promedio de los parámetros en las posiciones informadas.

Como se mencionó en la Sección 1.15.1, y de acuerdo con IEEE C57.15, las pérdidas sin carga en transformadores reguladores de voltaje escalonado es el promedio de las pérdidas sin carga en el neutro y la siguiente posición de refuerzo adyacente con el voltaje nominal aplicado a la derivación o, para los reguladores de voltaje que no incluyen un transformador en serie, aplicado al devanado en serie.

2.9.1 Transformador regulador de tensión de dos devanados: modelo genérico de secuencia positiva y negativa

El circuito equivalente de secuencia positiva y negativa de un transformador regulador de voltaje es similar al del transformador de dos devanados que se muestra en la figura 2-29. Pero, la impedancia en serie depende más de la posición del cambiador de tomas en un transformador regulador de voltaje que en un transformador normal. El circuito equivalente más preciso será el que use la tabla de impedancia, como se explica en la Tabla de impedancia del transformador en el Apéndice-F. Sin embargo, la impedancia en serie aproximada, que es similar a la de los transformadores reguladores, se puede utilizar en la mayoría de los estudios con un alto nivel de precisión. Como se mencionó anteriormente, los parámetros de impedancia en serie del circuito equivalente son el valor promedio de los parámetros en las posiciones reportadas.

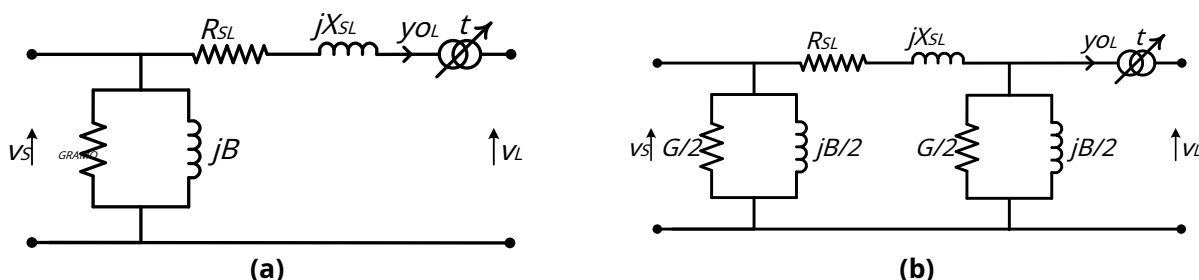


Figura 2-29 - Transformador regulador de tensión genérico: a) modelo simplificado, b) modelo π

2.9.2 Transformador regulador de voltaje de dos devanados: circuito equivalente de secuencia cero

El tipo de conexión de los transformadores reguladores de tensión es prácticamente una conexión Y-Y puesta a tierra. Sin embargo, la conexión interna de un transformador regulador de voltaje es más complicada que la de un transformador normal conectado YY. Por lo tanto, el circuito equivalente de secuencia cero de un transformador regulador de voltaje depende de si los puntos neutros están o no conectados a tierra. En los transformadores reguladores de tensión, el punto neutro principal se denomina $SoLo$, y a través de él, la corriente de secuencia cero del lado de la fuente y el lado de la carga fluyen a tierra. Este punto neutro principal suele estar conectado a tierra. Como se muestra en la Tabla 1-2 y la Tabla 2-2, línea 4, el circuito equivalente de secuencia cero de un regulador de voltaje es similar al de un transformador conectado YY sólidamente conectado a tierra (YN-yn).

2.9.3 Ejemplo 6: Un transformador regulador de voltaje de dos devanados práctico

La Figura 2-30 muestra la información de la placa de identificación de un transformador regulador de voltaje de dos devanados de 4.16/2.4 kV, 15/20/25 MVA. Este transformador VR es un transformador conectado yy de dos devanados y dos núcleos en un tanque. También se le llama Transformador de refuerzo en serie [10]. La Figura-B1-b en el Apéndice B muestra el diagrama de circuito esquemático de una fase del transformador y su conexión del cambiador de tomas.

Los puntos neutros de ambos devanados secundarios están conectados al tanque y puestos a tierra a través del tanque. El diagrama esquemático equivalente del transformador es similar a la Figura 2-27. El punto neutro del devanado primario conectado en Y del primer núcleo, $SoLo$, es accesible para ser conectado a tierra según el plan de diseño. Los resultados de la prueba, el diagrama esquemático de este transformador VR, el diagrama esquemático del devanado y el diagrama vectorial se muestran en la Figura 2-31, la Figura 2-32 y la Figura 2-33. La relación de voltaje de la terminal de carga a la terminal de fuente se puede mostrar de la siguiente manera:

En este transformador:

De manera similar a los autotransformadores, los núcleos no están diseñados para la potencia nominal total del transformador porque la potencia total del transformador no se convierte a través del campo magnético.

núcleos Sin embargo, el conjunto de devanados secundarios del segundo núcleo (los devanados entre los terminales S y los terminales L) están diseñados para soportar la corriente a plena carga.

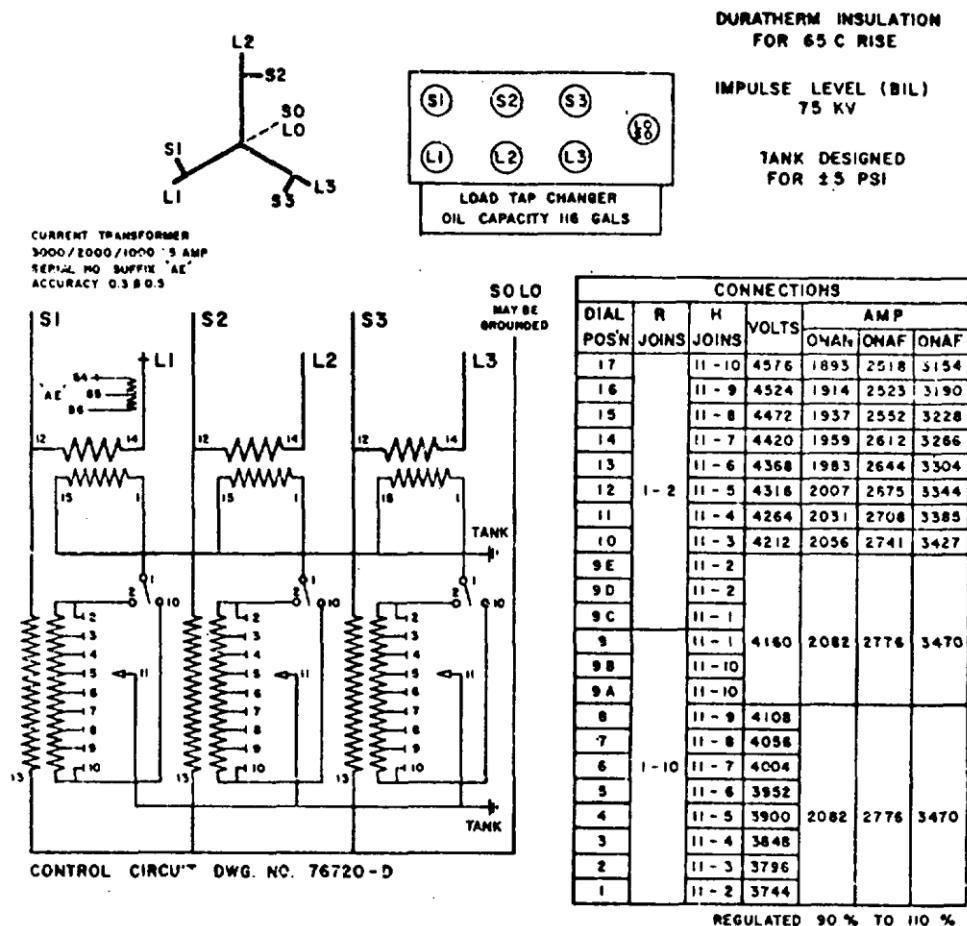
Como se puede observar, la tensión nominal de este transformador regulador de tensión es de 4,16 kV. El transformador puede regular de 3.744 kV a 4.576 kV en las terminales de fuente a 4.16 kV en la terminal de carga. Tiene un (1) interruptor de dos estados y nueve (9) posiciones de derivación. El interruptor de dos estados cambia la dirección de regulación de regulación positiva a regulación negativa y viceversa. Aunque no se indica en la placa de identificación, el cambiador de tomas es un cambiador de tomas graduado porque está ubicado cerca de un punto neutro conectado a tierra a través del tanque del transformador.

El núcleo principal de este transformador de dos núcleos siempre está excitado por un voltaje en el rango de $\pm 10\%$ del voltaje nominal. La excitación del segundo núcleo depende de la cantidad de ajuste de voltaje que hace el transformador de voltaje. En otras palabras, depende de la posición de toma del cambiador de tomas. Por lo tanto, la pérdida del núcleo en el núcleo principal es aproximadamente constante (dentro del 81 % al 122 % del voltaje nominal sin pérdida de carga). Pero en el segundo núcleo, la pérdida del núcleo depende de la posición del grifo. Cabe señalar que cuando el transformador opera en condiciones reductoras, el voltaje de entrada es mayor que el voltaje nominal (lo que debe considerarse en el diseño del transformador). Por lo tanto, se supone que el transformador opera siempre en el área lineal.

El segundo núcleo cumple con diferentes voltajes según la posición del grifo. En la posición de toma normal, el voltaje de salida es igual al voltaje de entrada, y el voltaje en el segundo núcleo es cero porque no hay voltaje de refuerzo o reducción en los devanados del segundo núcleo.

Como se menciona en los dos últimos párrafos de la Sección 2.9, se supone que la pérdida de carga es el valor promedio de las pérdidas en las posiciones 1 y 17 según lo dispuesto en el informe de prueba. La pérdida sin carga de un transformador regulador de voltaje es la pérdida sin carga de la posición de derivación neutra y la siguiente posición de refuerzo adyacente con voltaje nominal aplicado al devanado en derivación o en serie para reguladores de voltaje que no incluyen un transformador en serie. En este ejemplo, no se informó la pérdida sin carga para la siguiente posición de refuerzo adyacente. Debido a que normalmente se espera que un sistema opere a voltaje nominal, usar la posición de derivación neutra para modelar la rama de magnetización puede ser una suposición realista. La información requerida para modelar este transformador se da en la Tabla 2-15.

El informe de prueba indica que la prueba de pérdidas de carga para la posición de toma 1 se llevó a cabo a la corriente nominal nominal. Este es un requisito para una prueba de pérdidas a plena carga, pero no está identificado para la posición de toma 17, aunque se han proporcionado parámetros para esta posición. Dado que el modelo genérico es el modelo lineal del transformador, se supone que la corriente de prueba sin pérdidas de carga en la posición 17 es también la corriente nominal. En consecuencia, los parámetros de impedancia en serie son un valor promedio de los parámetros en la posición 1 y la posición 17.



OIL FILLED VOLTAGE REGULATOR

15000 KVA CIRCUIT CAPACITY AT 55 C RISE ONAN
 20000 KVA CIRCUIT CAPACITY AT 55 C RISE ONAF
 25000 KVA CIRCUIT CAPACITY AT 55 C RISE ONAF
 VOLTAGE 4160Y/2400 3 PHASE 60 HZ
 MAX LOAD 2082/2776/3470 AMP ONAN/ONAF/ONAF
 % IZ AT 75 C ONAN
 MAX TAP POSITION
 MIN TAP POSITION
 NET WEIGHTS
 CORE & COILS 10800 LB
 TANK & FITTINGS 9900 LB
 OIL 1240 GALS 10600 LB
 TOTAL WEIGHT 31300 LB
 SERIAL NO

BUILT IN CANADA TO CSA C68-1968

Figura 2-30 - Ejemplo 6: Placa de identificación del transformador regulador de voltaje

MOLONEY ELECTRIC CORPORATION **CD-18366**
CERTIFIED TEST REPORT

CUSTOMER		Purchase Order No.			
M	SALES ORDER #	UNIT #	COIL #	TYPE ONAN/ONAF/ONAF	
	H.V. $\pm$ 10% REGLT. 4160Y/2400	L.V. -	PHASE 3	HZ 60	TEMPERATURE 55 °C

Serial No.					GUARANTEE	
NO LOAD LOSSES						
		TAP POS'N 17	TAP POS'N 9	TAP POS'N 1		6200
VOLTS	AMPS	0.87	0.47	1.16		
	% lex	0.437	0.212	0.524		
4576	WATTS	4375	2310	4694		
			4160 V	3744 V		
	AMPS	1.89	1.38	2.42		
	% lex	0.95	0.624	1.094		
5034	WATTS	6253	3498	6330		
	AMPS					
	% lex					
	WATTS					
LOAD LOSSES						
		1 5 MVA		2 0 MVA		2 5 MVA
CONNECTION OR TAP		Pos.'n 1 *	17	Pos.'n 1*	17	Pos.'n 1*
IMPEDANCE %		1.566	1.419	2.089	1.9016	2.627
REACTANCE %		1.553	1.410	2.072	1.890	2.605
WATTS 75 °C		27051	23342	48044	42361	75094
TOTAL LOSSES		31745	27717	52738	46736	69259
						31000
RESISTANCES						
AVERAGE BETWEEN TERMINALS						
TF C		23.5	23.5			
X IMS EXT.WDG.		0.04959	0.04959	-	-	-
X CHMS HV & REGL.		0.03139	0.03139	-	-	-
WINDING						
CONNECTION SERIES		0.0004547	0.0004547	-	-	-
EFFICIENCY %						
		POS'N 1	POS'N 17	POS'N 1	POS'N 17	POS'N 1
5/4 LOAD		99.72	99.78	99.65	99.72	99.57
4/4 "		99.77	99.81	99.71	99.77	99.65
3/4 "		99.80	99.84	99.77	99.81	99.72
2/4 "		99.83	99.86	99.81	99.85	99.79
1/4 "		99.81	99.84	99.83	99.86	99.83
REGULATION %						
100% P.F.		-	-	-	-	-
% P.F.		-	-	-	-	-
80% P.F.		-	-	-	-	-
POS.'N 1 *		TESTED AT RATED NOMINAL CURRENT.				

TYPE TESTS					DIELECTRIC TESTS:	
SERIAL#	H.V.	TEMPERATURE RISE				
		L.V.	OIL			
3876/1	51.7	45.5	43.6	@ 15 MVA	APPLIED, H.V.	19
3876/1	50.2	50.2	36.2	@ 25 MVA	APPLIED, L.V.	19
					INDUCED, FOR 7200 HZ	200
					IMPULSE	-
ALL UNITS RECEIVE TESTS FOR RATIO AND POLARITY TESTS ARE MADE IN ACCORD WITH RELEVANT CANADIAN STANDARDS.						

ENTERED BY	DATE 12 June, 79	APPROVED BY
------------	------------------	-------------

Figura 2-31 - Ejemplo 6: Resultados de la prueba del transformador del regulador de voltaje

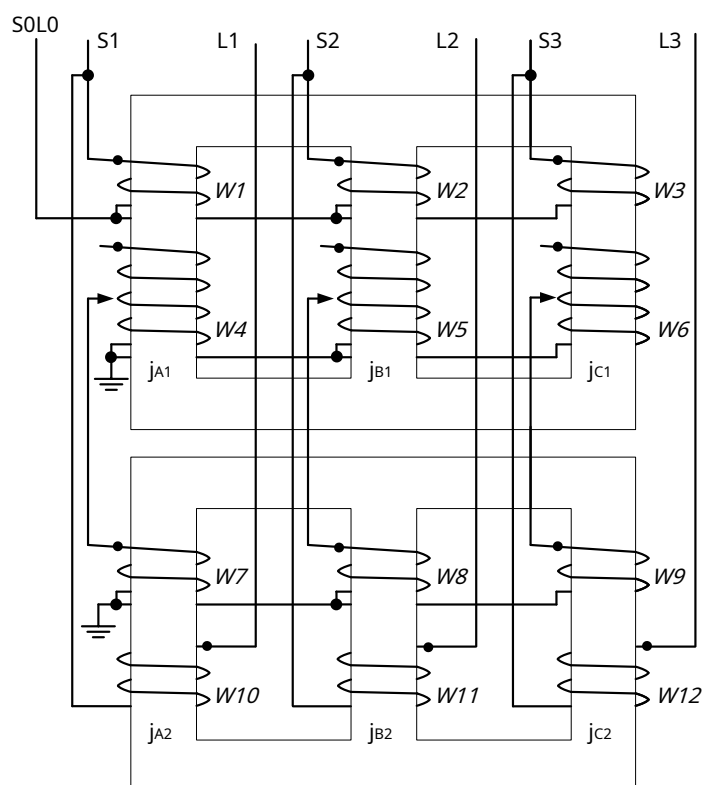


Figura 2-32 - Ejemplo 6: Diagrama esquemático del transformador regulador de voltaje

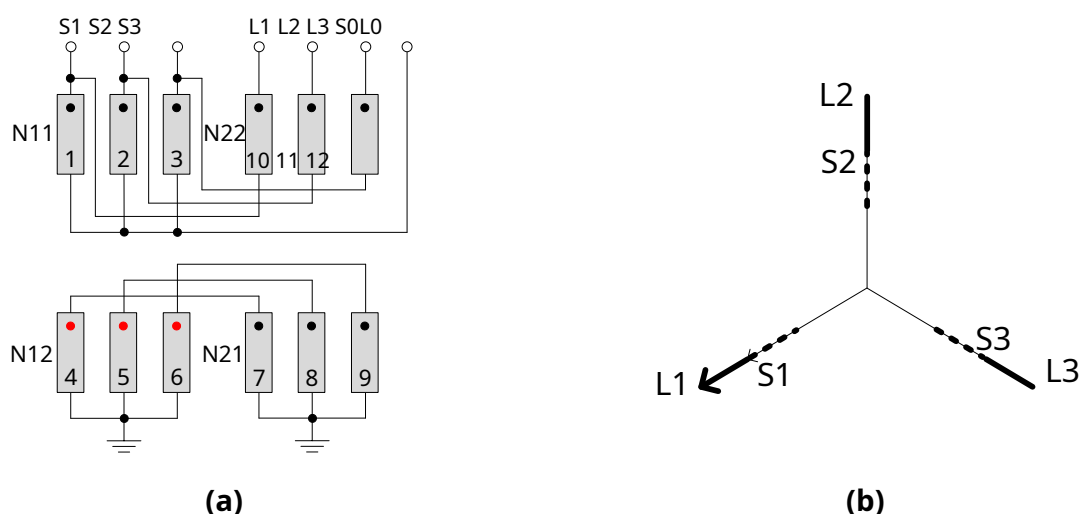
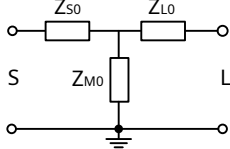


Figura 2-33 - Ejemplo 6: Transformador regulador de tensión: a) Diagrama de conexión de los devanados, b) Diagrama vectorial

Tabla 2-15 - Información requerida para modelar el transformador de voltaje en el ejemplo 6

Artículo	Parámetro del transformador	Símbolo	Valores
General			
1	Clasificaciones ONAN del transformador	AMEU _{EN UNA}	15 MVA
2	Voltajes de bobinado (Fuente, Carga, ...) en este transformador	V_S, V_L $V_H, V_X, \dots$	4.160kV
3	Tipo de conexión	-	Regulador de voltaje transformador
4	Rango de toque	$t_1, t_2, \dots$	$\pm 10\%$
5	Número de pasos de toque	-	17
6	Cuerda con grifo regulable	-	Secundario del primer núcleo
7	Ángulo de fase de los devanados	-1, -2, ...	0°
Resultados de la prueba sin pérdida de carga			
8	Prueba de pérdida sin carga MVA	AMEU _{Prueba de NL}	15
9	Pérdida sin carga	PAGS _{Pruebas Bajos}	2,31 kilovatios
10	corriente de excitación	y_{OExc}^a	0.212%
11	Toque la configuración para la prueba de pérdida sin carga	_{Pruebas Bajos}	Nominal
Resultados de la prueba de pérdida de carga			
12	Prueba de pérdida de carga MVA	AMEU _{Prueba SC, ...}	15 MVA
13	Pérdida de carga	PAGS _{CAROLINA DEL SUR, PAGS_{LI, HK, ...}}	27.051 kilovatios, 23.342 kilovatios
14	Impedancia	$y_{OZ}, o Z_{HX}, \dots$	1,566 %, 1,419 %
15	Resistencia reactiva	$y_{OX}, o X_{HX}, \dots$	1.553 %, 1.410 %
dieciséis	Toque la configuración para la prueba de pérdida de carga	_{CAROLINA DEL SUR}	Toque 1, toque 17
Resultados de la prueba de secuencia cero			
17	Resultados de la prueba de circuito abierto de secuencia cero	Z_1, Z_2	
18	Resultados de la prueba de cortocircuito de secuencia cero	Z_3	
19	Parámetros del modelo T de secuencia cero	$Z_{H0}, Z'_{X0} Z_{M0}$ para el modelo T	-
20	Configuración de puesta a tierra	Punto neutro de los devanados método de puesta a tierra	sólidamente conectado a tierra
21	Impedancia de puesta a tierra	$Z_{GH}, Z_{GX}, \dots$	0, 0
22	Prueba de impedancia de secuencia cero MVA y kV		

Tabla 2-16 - Ejemplo 6: Parámetros del Modelo Genérico del Transformador Regulador de Voltaje

Escribe	Parámetros en Por Unidad	Parámetros en Unidades SI
Valores promedio	_____ _____ _____ kilovatios	
Fuga de devanados impedancia	PU	4,16 kV, _____ _____ -
Fuga de devanados resistencia reactiva	PU	-
Pérdidas de carga resistencia equivalente	_____ PU Prueba: _____ PU	_____ _____ - - -Está cerca.
Rama magnetizante entrada	$y - \%yo_{Exc} / 100 - 0.00212 PU$	$Y_S - Y_L - \frac{yo}{V_{jefe}} - \frac{\%yo/100}{Z_{Base H}} - 0.00184$ $\bar{U}$
Sin pérdidas de carga equivalente conductancia	_____ PU	$\frac{GRAMOS}{GRAMOS} - \frac{GRAMOS}{GRAMOS} - \frac{PAGS_{jefe}}{V_{jefe}^2} - \frac{PAGS_{raises Base}}{V_{calificado}^2} - 0.13348 mi-3$ $\bar{U}$
Rama magnetizante susceptancia	$b - y_2 \sqrt{gramo_2} - 0.002114 PU$	$B_S - B_L - Y_2 \sqrt{s-GRAMOS} - -1.835 mi-3 \bar{U}$
secuencia cero parámetros: Según Tabla 1-4, en la Sección 1.16, la secuencia cero los parámetros son estimado como : *	PU PU PU 	0.0155 - 0.00172 - -

* Dado que los coeficientes 0,9 y 0,1 dependen de la posición de toma y de la dirección de impulso o reducción, dividir la impedancia equivalente en serie en dos impedancias iguales para cada terminal es una buena manera de estimar la impedancia de secuencia cero.

2.10 Transformadores en zigzag (buje de dos devanados)

El propósito de un transformador en zigzag es proporcionar un camino de retorno a la corriente de falla a tierra en los sistemas conectados en delta. Como se describe en la Sección 1.19.7, puede contener solo seis devanados en tres patas conectadas en zigzag para proporcionar una conexión a tierra, o puede contener nueve devanados y alimentar algunas cargas o cargas auxiliares. El diagrama esquemático del transformador, la representación vectorial, el diagrama vectorial y el diagrama vectorial de desplazamiento de fase de un transformador conectado en zigzag se muestran en la Figura 2-34. El grupo vectorial de autotransformadores de dos devanados es YN-yn. El punto neutro generalmente está conectado a tierra en los autotransformadores.

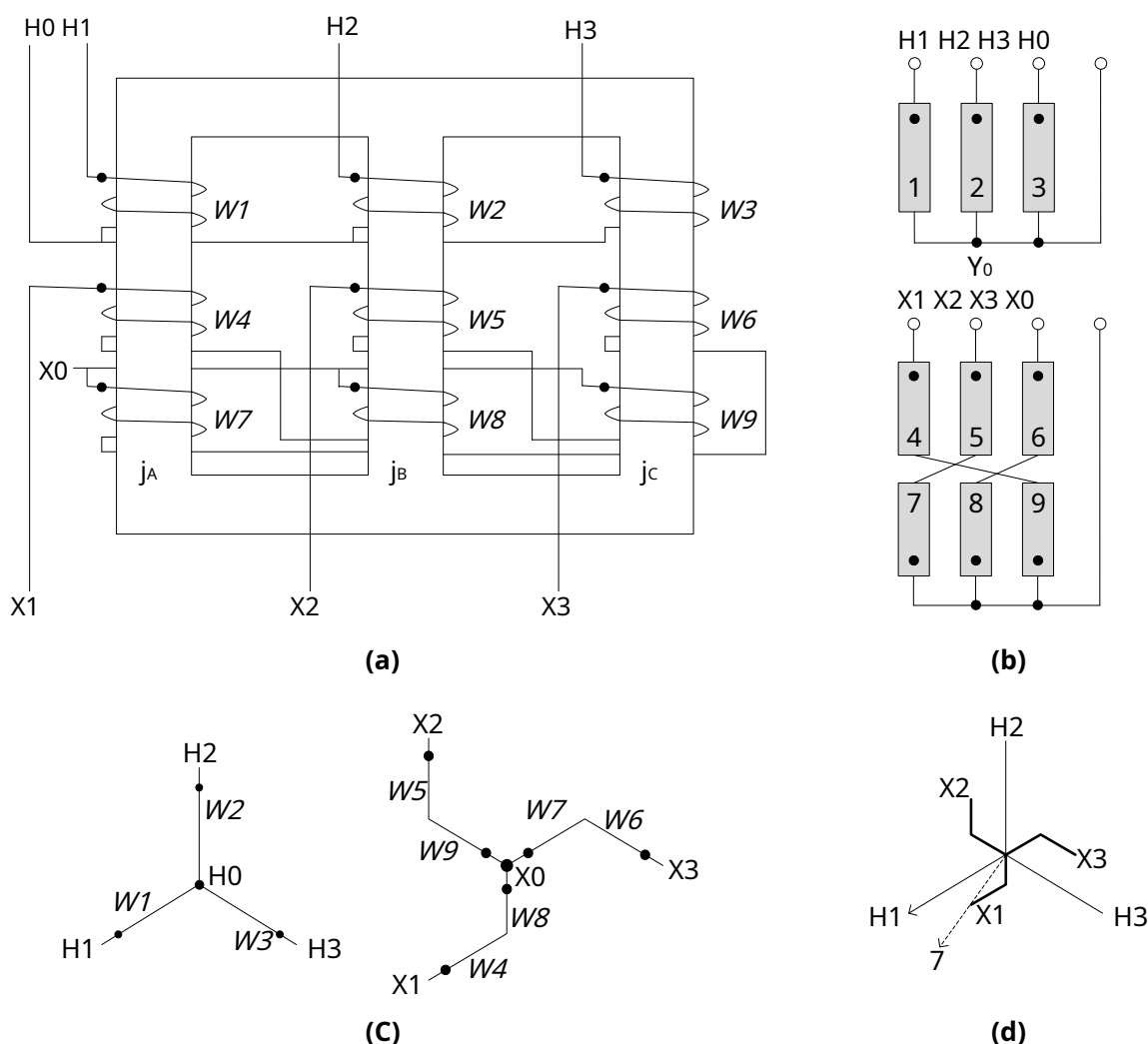


Figura 2-34- El transformador en zigzag: a) Diagrama esquemático del transformador, b) Devanado diagrama de conexión, c) Diagrama vectorial, d) Diagrama vectorial de desplazamiento de fase

3 Determinación de parámetros de baja frecuencia de transformadores de tres devanados

3.1 Introducción

Los transformadores trifásicos de tres devanados se utilizan ampliamente en los sistemas de potencia. Cuando la clasificación de MVA del tercer devanado es considerablemente más baja que la clasificación del devanado primario o secundario, el tercer devanado se denomina devanado terciario. Se puede utilizar un devanado terciario cuando las cargas reales o las cargas auxiliares en una subestación deben suministrarse a un nivel de voltaje que es diferente al nivel de voltaje primario o al nivel de voltaje secundario. El devanado terciario se puede conectar a dispositivos de compensación de potencia reactiva, como condensadores, reactores de derivación o bancos de condensadores para la inyección de potencia reactiva en un sistema para mantener el voltaje dentro del límite especificado.

En las aplicaciones mencionadas anteriormente, el devanado terciario está cargado. En algunos casos, puede ser necesario un devanado terciario conectado en delta descargado llamado devanado estabilizador. El devanado estabilizador juega los siguientes roles en el sistema [7]:

- Bajo una condición de carga asimétrica, cuando la impedancia de secuencia cero es menor, un devanado terciario conectado en delta proporciona un paso a la corriente para que fluya de tal manera que el amperio-vuelta entre los tres devanados esté equilibrado.
- Un transformador conectado en YY rara vez se usa en un sistema de energía, excepto en sistemas de transmisión de alto voltaje por razones de seguridad y ahorro de costos. La conexión AY es susceptible a terceros armónicos y transitorios de voltaje cuando no está conectada a tierra. Un devanado terciario conectado en delta puede proporcionar un paso de circuito cerrado para la corriente de magnetización del tercer armónico y haría que el flujo del núcleo y el voltaje inducido fueran sinusoidales. Esto podría evitar interferencias en las líneas telefónicas causadas por corrientes y voltajes de terceros armónicos.

A veces, en los transformadores de potencia, un tercer devanado forma un devanado secundario doble. Dichos transformadores se utilizan a menudo para suministrar cargas de alta densidad en las ciudades. El tercer devanado proporciona beneficios económicos porque no se requiere tanta aparamenta de alto voltaje. Si los dos terminales del devanado secundario no están conectados a la misma barra, el tercer devanado brinda el beneficio adicional de limitar las corrientes de cortocircuito del sistema de bajo voltaje. Los transformadores de doble secundario se pueden utilizar para la conexión de dos generadores a una red eléctrica. Los transformadores de tres devanados se utilizan para la interconexión de tres líneas de transmisión a tres niveles de tensión diferentes. En esta guía, todos estos transformadores se reconocen como transformadores de tres devanados. El procedimiento de modelado para transformadores de tres devanados se utiliza para modelar este tipo de transformadores.

En transformadores de devanados múltiples, los devanados pueden tener diferentes clasificaciones de MVA. En transformadores de dos devanados, el primario y el secundario tienen la misma clasificación de MVA. Sin embargo, el devanado terciario de un transformador de tres devanados puede tener una clasificación de MVA diferente. En transformadores de devanados múltiples, la potencia nominal de cada devanado debe indicarse en la placa de identificación. La impedancia de cada devanado puede normalizarse en función de la clasificación de su devanado o puede referirse a una base común. En transformadores de devanados múltiples, las combinaciones de carga deben indicarse a menos que la potencia nominal de uno de los devanados sea la suma de las potencias nominales de los otros devanados.

3.2 Transformadores monofásicos de tres devanados

La figura 3-1 muestra un diagrama esquemático de un transformador de tres devanados enrollado alrededor de un núcleo. En los transformadores trifásicos, los tres devanados de cada fase están enrollados alrededor de la misma pata.

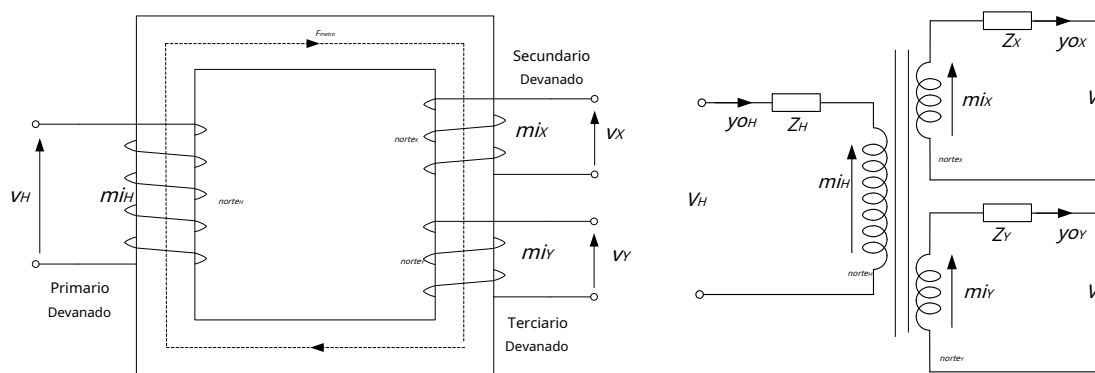


Figura 3-1- Diagrama esquemático de un transformador con tres devanados

Las condiciones ideales para un transformador de tres devanados (que son similares a las de un transformador ideal de dos devanados) son:

$$m_{IH} + m_{IX} + m_{IY} = 0$$

Esta ecuación significa que la potencia neta en un transformador ideal de tres devanados es cero.

3.2.1 Modelo genérico de transformador monofásico de tres devanados

Un transformador monofásico de tres devanados se puede modelar como se muestra en la Figura 3-2. El modelo incluye la impedancia de fuga equivalente de tres devanados y, de manera similar a la empleada para transformadores de dos devanados, la corriente de magnetización y las pérdidas en el núcleo se modelan como una rama de magnetización. Este modelo es un modelo tradicional y tiene una aplicación limitada. Es razonablemente preciso cuando el núcleo del transformador no está saturado. Cuando la inductancia de magnetización está saturada, la ubicación de conexión de la rama de magnetización es importante. La ubicación arbitraria de la rama de magnetización en transformadores de devanados múltiples es uno de los inconvenientes de este modelo tradicional. En la literatura se propone otro modelo de circuito equivalente [5] que es muy preciso cuando el modelo se utiliza para describir el comportamiento del núcleo magnético,

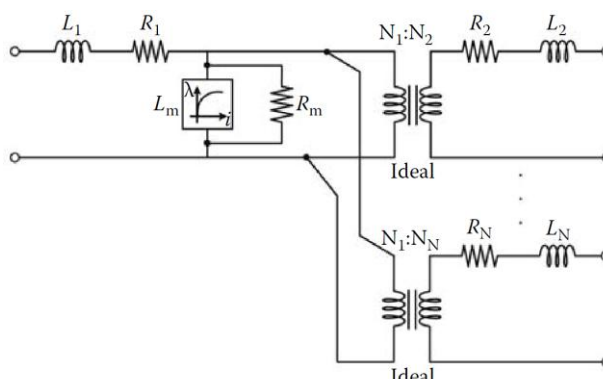


Figura 3-2- Representación del circuito equivalente en estrella de un transformador de devanados múltiples (modelo)

Para determinar los parámetros de un transformador de tres devanados, normalmente se realizan una prueba sin carga y tres pruebas con pérdidas de carga. Las mediciones en las pruebas de pérdidas con carga se realizan en las tres combinaciones diferentes de dos devanados y los resultados se vuelven a calcular, asignando impedancias y pérdidas a los devanados individuales. Las pérdidas totales para casos de carga especificados que involucren a todos estos devanados se determinan en consecuencia.

Algunos transformadores de tres devanados tienen un devanado primario y dos secundarios. Los devanados secundarios tienen la misma potencia nominal, voltaje nominal e igual impedancia que el primario. Estos transformadores generalmente se denominan transformadores de doble secundario. En estos transformadores, la carga simétrica puede probarse mediante una prueba adicional con ambos devanados secundarios cortocircuitados simultáneamente.

Los fabricantes no suelen proporcionar los resultados de las pruebas de tres pérdidas de carga en la hoja de resumen de resultados de las pruebas, especialmente para transformadores de doble secundario o transformadores con devanados terciarios. En más del 98% de los transformadores de tres devanados, solo hay un resultado de prueba de pérdidas de carga en la hoja de resultados de la prueba. Esta prueba se debe realizar en la capacidad nominal total de la unidad desde el devanado de alto voltaje hasta ambos devanados de bajo voltaje. Se cortocircuitan ambos devanados de bajo voltaje, se aplica un voltaje de prueba al lado de alto voltaje y se miden la potencia activa y el voltaje aplicado mientras fluye la corriente nominal en el devanado de alto voltaje. Es importante darse cuenta de cuándo el devanado de alto voltaje totalmente cargado divide su capacidad de MVA entre los devanados de bajo voltaje.

En algunos transformadores, la potencia nominal del devanado de alta tensión es la suma de las potencias nominales de todos los devanados de baja tensión. En estos transformadores, cuando la corriente nominal fluye en el devanado de alta tensión, los otros dos devanados también llevan la corriente nominal. En algunos transformadores, la clasificación de carga completa del lado de alto voltaje es menor que la suma de las dos clasificaciones de bajo voltaje. En estos transformadores, cuando el devanado de alto voltaje está completamente cargado, los otros dos devanados nunca llevan la corriente de carga completa. Por lo tanto, la corriente en el devanado de alto voltaje debe mantenerse en el valor nominal durante la prueba de pérdidas de carga. Este procedimiento de monitoreo es un poco diferente al procedimiento de monitoreo para tres pruebas de pérdidas de carga separadas. Para realizar tres pruebas de pérdidas de carga en transformadores de tres devanados entre pares de devanados, se monitorea la corriente en el devanado que tiene la clasificación MVA más baja. La prueba se lleva a cabo mientras el devanado de MVA nominal más bajo lleva la corriente nominal.

3.2.2 Impedancias de fuga en transformadores de tres devanados

Para medir las impedancias de fuga de dos devanados entre el devanado 1 y el devanado 2, los terminales del devanado secundario se cortocircuitan y los terminales del devanado terciario se dejan en circuito abierto. Las impedancias de fuga de dos devanados entre el devanado 1 y el devanado 3 y entre el devanado 2 y el devanado 3 se miden de manera similar. Las impedancias de fuga medidas de esta manera se denominan Z'_{HX} , Z'_{HY} , y Z'_{XY} . Estas notaciones corresponden a la notación

utilizado anteriormente para transformadores de dos devanados. Las tres pruebas de pérdidas de carga dan:

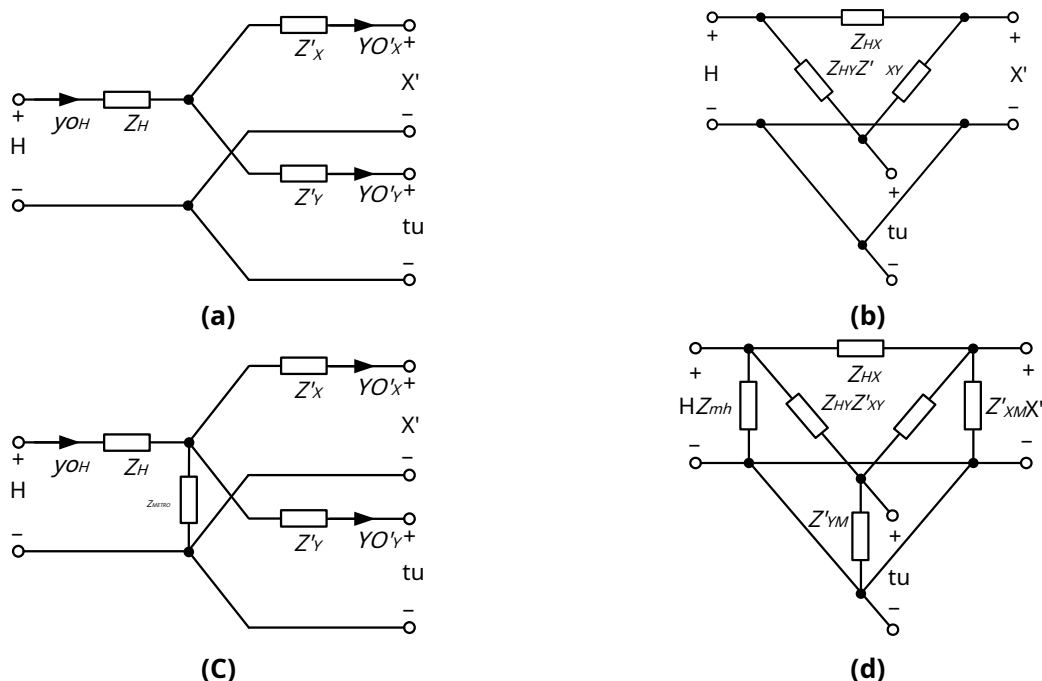


Figura 3-3- El circuito equivalente de un transformador de tres devanados: a) modelo T sin rama magnetizadora, b) modelo π sin rama magnetizadora, c) modelo T con rama magnetizadora, d) π -modelo con rama magnetizante

Cabe señalar que todas estas impedancias tienen una resistencia y una reactancia, y que Z'_{HX} se miden desde la terminal del devanado 1, y Z'_{HY} se mide desde el terminal de bobinado 2.

—
—
—

en el cual Z_{12} y Z_{13} son las impedancias de fuga transferidas del secundario y terciario devanados al lado primario, respectivamente. Z_{23} es la impedancia de fuga terciaria transferida al lado secundario. La resolución de estas ecuaciones para las impedancias de fuga da:

$$\begin{aligned} Z_{12} &= \frac{Z_{123}Z_{23}}{Z_{123} + Z_{23} + Z_{13}} \\ Z_{13} &= \frac{Z_{123}Z_{12}}{Z_{123} + Z_{23} + Z_{13}} \\ Z_{23} &= \frac{Z_{123}Z_{12}Z_{13}}{Z_{123} + Z_{23} + Z_{13}} \end{aligned}$$

Estas ecuaciones en forma por unidad se convierten en:

La resolución de estas ecuaciones por unidad da:

$$\begin{aligned} Z_{12} &= \frac{Z_{123}Z_{23}}{Z_{123} + Z_{23} + Z_{13}} \\ Z_{13} &= \frac{Z_{123}Z_{12}}{Z_{123} + Z_{23} + Z_{13}} \\ Z_{23} &= \frac{Z_{123}Z_{12}Z_{13}}{Z_{123} + Z_{23} + Z_{13}} \end{aligned}$$

Como se mencionó en la sección anterior, los fabricantes a veces no brindan los resultados completos de las pruebas de pérdidas de tres cargas entre pares de devanados en el informe de prueba resumido, particularmente para transformadores de doble secundario. Por lo general, informan un resultado de prueba de cortocircuito en la condición de carga completa de la unidad. La Figura 3-4 muestra el diagrama de prueba y el circuito equivalente de las impedancias de fuga del transformador para esta prueba. La prueba de pérdidas de una carga reportada da:

—

Teóricamente, esta impedancia equivalente calculada vista desde el terminal de alto voltaje no brinda una forma directa de separar Z_{12} y Z_{13} , pero sí elimina la relación X/R para las impedancias de fuga de secuencia positiva. En algunos transformadores de tres devanados, la potencia nominal del devanado de alta tensión es la suma de las potencias nominales de todos los devanados de baja tensión. En estos transformadores, cuando la corriente nominal fluye en el devanado de alta tensión, los otros dos devanados también

transportar la corriente nominal. En algunos transformadores, la clasificación de carga completa del lado de alto voltaje es menor que la suma de las dos clasificaciones de bajo voltaje. En estos transformadores, la suma de la potencia nominal en dos devanados de baja tensión nunca debe exceder la potencia nominal del lado de alta tensión.

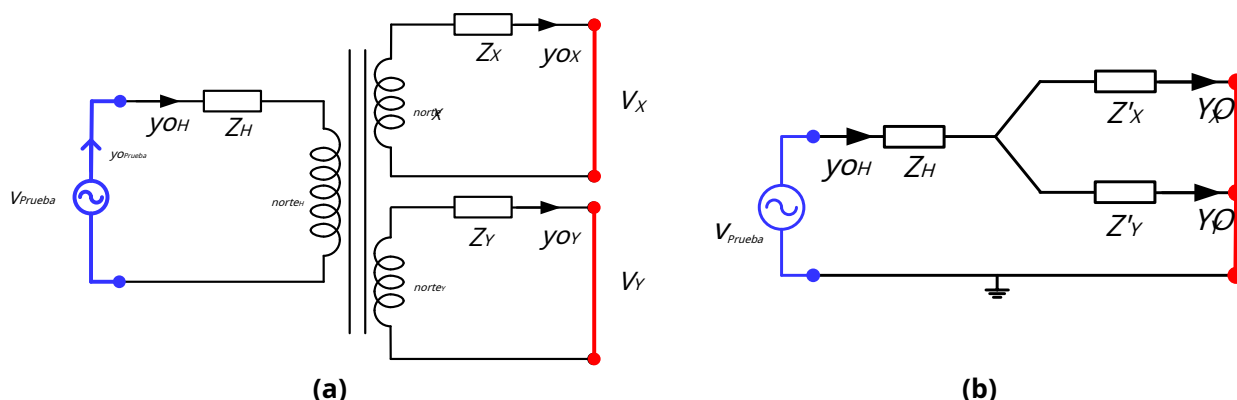


Figura 3-4- Diagrama para una sola prueba de pérdidas con carga en transformadores de tres devanados: a) Prueba diagrama, b) Circuito equivalente de impedancias de fuga

3.2.3 Impedancia de rama magnetizante en transformadores de tres devanados

La impedancia de la rama magnetizante en transformadores de devanados múltiples se calcula mediante una prueba de pérdidas sin carga. Es lo mismo que la prueba sin carga del transformador de dos devanados y se aplican las mismas fórmulas.

3.2.4 Procedimiento de modelado de transformadores monofásicos de tres devanados

La Tabla 3-1 resume cómo se pueden usar las ecuaciones descritas anteriormente para calcular los parámetros del transformador de tres devanados. Para modelar un transformador monofásico de tres devanados se deben seguir los siguientes pasos:

Paso 1: Los datos del transformador enumerados en la Tabla 1-1 deben extraerse de los datos disponibles, o se deben hacer suposiciones basadas en la Tabla 1-3 y la Tabla 1-4. Como se mencionó anteriormente, los devanados en transformadores de múltiples devanados pueden tener diferentes valores nominales de VA. Las mediciones pueden normalizarse en función de la clasificación del propio devanado del transformador en el informe de prueba; en tal caso, deben estar referidos a una base común.

Paso 2: Los parámetros del circuito equivalente deben calcularse usando las fórmulas dadas en Tabla 3-1.

Para transformadores trifásicos de tres devanados, se debe seguir otro paso para obtener los parámetros de secuencia cero.

Tabla 3-1- Fórmulas para calcular los parámetros del modelo genérico de un devanado de tres Transformador de un informe de prueba

Prueba	Parámetros	Parámetros en Por Unidad	Parámetros en Unidades SI
Pruebas de pérdidas de carga (Tres pruebas de cortocircuito)	de dos devanados fuga impedancias	$\frac{Z_{12}}{V_{LL}}$ $\frac{Z_{13}}{V_{LL}}$ $\frac{Z_{23}}{V_{LL}}$	$\frac{Z_{12}}{V_{LL}}$ $\frac{Z_{13}}{V_{LL}}$ $\frac{Z_{23}}{V_{LL}}$
	de dos devanados equivalente resistencias	$\frac{R_{12}}{V_{LL}}$ $\frac{R_{13}}{V_{LL}}$ $\frac{R_{23}}{V_{LL}}$	$\frac{R_{12}}{V_{LL}}$ $\frac{R_{13}}{V_{LL}}$ $\frac{R_{23}}{V_{LL}}$
	de dos devanados fuga reactancias	$\frac{X_{12}}{V_{LL}}$ $\frac{X_{13}}{V_{LL}}$ $\frac{X_{23}}{V_{LL}}$	$\frac{X_{12}}{V_{LL}}$ $\frac{X_{13}}{V_{LL}}$ $\frac{X_{23}}{V_{LL}}$
	Calculado equivalente devanados' resistencia y fuga resistencia reactiva (modelo T parámetros)	$\frac{R_{12}}{V_{LL}}$ $\frac{R_{13}}{V_{LL}}$ $\frac{R_{23}}{V_{LL}}$ $\frac{X_{12}}{V_{LL}}$ $\frac{X_{13}}{V_{LL}}$ $\frac{X_{23}}{V_{LL}}$	$\frac{R_{12}}{V_{LL}}$ $\frac{R_{13}}{V_{LL}}$ $\frac{R_{23}}{V_{LL}}$ $\frac{X_{12}}{V_{LL}}$ $\frac{X_{13}}{V_{LL}}$ $\frac{X_{23}}{V_{LL}}$

Prueba	Parámetros	Parámetros en Por Unidad	Parámetros en Unidades SI
Prueba sin carga (una prueba de circuito abierto)	Magnetizando rama entrada	$y_{gramo-jb} \cdot \%yo_{Exc} / 100 \text{ PU}$	$Y_{-} = \frac{yo_{jefe}}{V_{jefe(fase)}} \angle \theta$ $Y_{X-} = \frac{yo_{jefe}}{V_{jefe}} - \frac{\%yo_{Exc}}{Z_{Base X}} \angle \theta$ $Y_{H-} = \frac{\%yo_{Exc}}{Z_{Base H}} \angle \theta$ $Y_{Y-} = \frac{\%yo_{Exc}}{Z_{base Y}} \angle \theta$ están sin carga MVA base
	Sin carga pérdidas equivalente conductancia	$gramo = \frac{PAGSPais(Bajo(kilovoltios))}{AMEU_{Prueba} \cdot NL[AMEU] \cdot 1000} \text{ PU}$	Para monofásico $V_{jefe(fase)} = \frac{PAGSPais(Bajo(kilovoltios))}{2} \angle \theta$ Para trifásico $V_{jefe(línea)} = \frac{PAGSPais(Bajo(kilovoltios))}{2} \angle \theta$ $GRAMO_{-} = \frac{PAGSPais(Bajo(kilovoltios))}{V_{Clasificación Y(kV)}^2 \cdot 1000} \angle \theta$ $GRAMO_{X} = \frac{PAGSPais(Bajo(kilovoltios))}{V_{X clasificado(kV)}^2 \cdot 1000} \angle \theta$ $GRAMO_{H} = \frac{PAGSPais(Bajo(kilovoltios))}{V_{Clasificación H(kV)}^2 \cdot 1000} \angle \theta$
	Magnetizando rama susceptancia	$b = -y \sqrt{2 \cdot gramo^2} \text{ PU}$	$B_{Y-} = -Y_{Y-} \sqrt{2 \cdot GRAMO_{Y-}^2} \angle \theta$ $B_{X-} = -Y_{X-} \sqrt{2 \cdot GRAMO_{X-}^2} \angle \theta$ $B_{H-} = -Y_{H-} \sqrt{2 \cdot GRAMO_{H-}^2} \angle \theta$

3.3 Transformadores trifásicos de tres devanados

La estructura de un transformador trifásico de tres devanados es similar a la de un transformador trifásico de dos devanados, pero tiene un devanado adicional en cada juego de devanados. El procedimiento de modelado es el mismo que para un transformador monofásico de tres devanados (descrito anteriormente). Las ecuaciones de la Tabla 3-1 se utilizan para calcular los parámetros de secuencia positiva de todos los tipos de transformadores de tres devanados.

El circuito equivalente de secuencia cero de un transformador de tres devanados depende del tipo de conexión de los devanados establecidos y de si el punto neutro en el devanado conectado en Y está conectado a tierra o no, lo cual se analiza en la Sección 1.15.3. Los circuitos equivalentes de secuencia cero de diferentes tipos de transformadores de tres devanados se enumeran en la Tabla 1-2. La corriente de secuencia cero no

fluya a través de los devanados del transformador a menos que tenga al menos una conexión Y puesta a tierra. Dependiendo de los tipos de conexión de los transformadores de tres devanados, los parámetros del circuito equivalente de secuencia cero se pueden calcular a partir de las mediciones de prueba de secuencia cero.

3.4 Transformadores de tres devanados con primario en estrella, secundario en estrella y terciario en estrella

El diagrama esquemático del transformador, la representación vectorial, el diagrama vectorial y el diagrama vectorial de desplazamiento de fase de un transformador de tres devanados conectado en Yyy se muestran en la Figura 3-7. El grupo de vectores de esta conexión es Y0y0y6. En aplicaciones prácticas, el lado de bajo voltaje de un transformador conectado en Yyy debe conectarse a tierra a través de una resistencia para limitar la corriente de falla a tierra.

3.4.1 Transformador Yyy de tres devanados: modelo genérico de secuencia positiva y negativa

El modelo genérico de un transformador Yyy trifásico de tres devanados para secuencia positiva y negativa es similar al de un transformador monofásico de tres devanados, que se muestra en la Figura 3-3.

3.4.2 Transformador Yyy de tres devanados: procedimiento para determinar los parámetros del modelo genérico

El procedimiento para modelar un transformador Yyy trifásico con tres devanados en secuencia positiva o negativa es el mismo que el procedimiento de modelado de transformadores monofásicos descrito en la Sección 3.2.4, excepto que se debe determinar la secuencia cero. La siguiente sección describe cómo se modela el circuito equivalente de secuencia cero de un transformador Yyy de tres devanados.

3.4.3 Transformador Yyy de tres devanados: circuito equivalente de secuencia cero

El circuito equivalente de secuencia cero de un transformador conectado en Yyy depende de si los puntos neutros están conectados a tierra o no. Por lo tanto, existen seis tipos diferentes de circuitos equivalentes de secuencia cero para esta conexión; sin embargo, algunos de ellos no son prácticos. En la práctica, los puntos neutros están conectados a tierra en todos los juegos de tres devanados de un transformador conectado en Yyy. La impedancia de secuencia cero total en esta conexión consiste en una conexión en serie que es la suma de las tres secuencias cero, como se muestra en la figura 3-5. En condiciones de falla a tierra, las impedancias de secuencia cero del devanado de alto voltaje están muy influenciadas por su ruta de retorno a la fuente de suministro, y no se puede confiar en que su valor sea cero. Este es un problema para las configuraciones de protección.

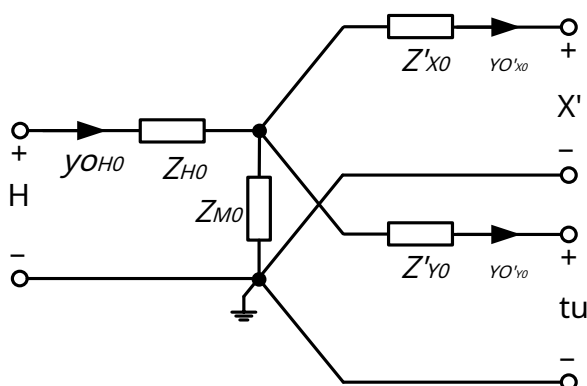
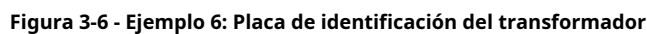


Figura 3-5- El circuito equivalente homopolar de un transformador YNyn de tres devanados

3.4.4 Ejemplo 6: Un transformador Yyy práctico de tres devanados

La Figura 3-6 muestra la información de la placa de identificación de un transformador de 245/26/26 kV, 50/66.7/83.3 MVA de tres devanados conectado en Yyy. El diagrama esquemático y el diagrama vectorial de este tipo de transformador se muestran en la Figura 3-7. El voltaje nominal del devanado de alto voltaje es de 245 kV y para ambos devanados de bajo voltaje es de 26 kV. La clasificación del devanado primario no se ha especificado por separado. Se supone que es igual a la clasificación de MVA del transformador. Los devanados de bajo voltaje son iguales y tienen la misma clasificación de MVA dada, 41.7 MVA. Dado que el valor nominal de MVA del transformador no es mayor que la suma de los valores nominales de MVA de los otros dos devanados, los devanados secundario y terciario no deben suministrar 41,7 MVA a plena carga al mismo tiempo. La carga total que se puede suministrar a través de dos devanados debe ser inferior a 50 MVA, que es la clasificación primaria de MVA. Tiene un cambiador de tomas bajo carga de 24 pasos en el extremo del punto neutro del lado de alto voltaje. El punto neutro de los devanados de alto voltaje está sólidamente conectado a tierra y en ambos devanados de bajo voltaje el punto neutro está conectado a tierra a través de una reactancia de 1 ohm. Dado que los puntos neutros de todos los devanados están conectados a tierra de alguna manera, la corriente de secuencia cero puede fluir a través de todos los devanados. Por lo tanto, el circuito equivalente de secuencia cero puede mostrarse como en la figura 3-5. Los resultados de las pruebas para este transformador y otros transformadores similares se han informado como en la figura 3-8-a y la Figura 3-8-b. Los resultados de esta prueba muestran que solo se ha realizado una prueba de pérdidas de carga para la posición de toma nominal a 117,8 A. Significa que la prueba de pérdidas de carga se ha realizado a 50 MVA, mientras que ambos devanados de bajo voltaje están en cortocircuito. Para determinar los parámetros del modelo genérico del transformador, solo se utilizan los resultados de la prueba de relación de derivación nominal. La posición de toma nominal es la posición 10.



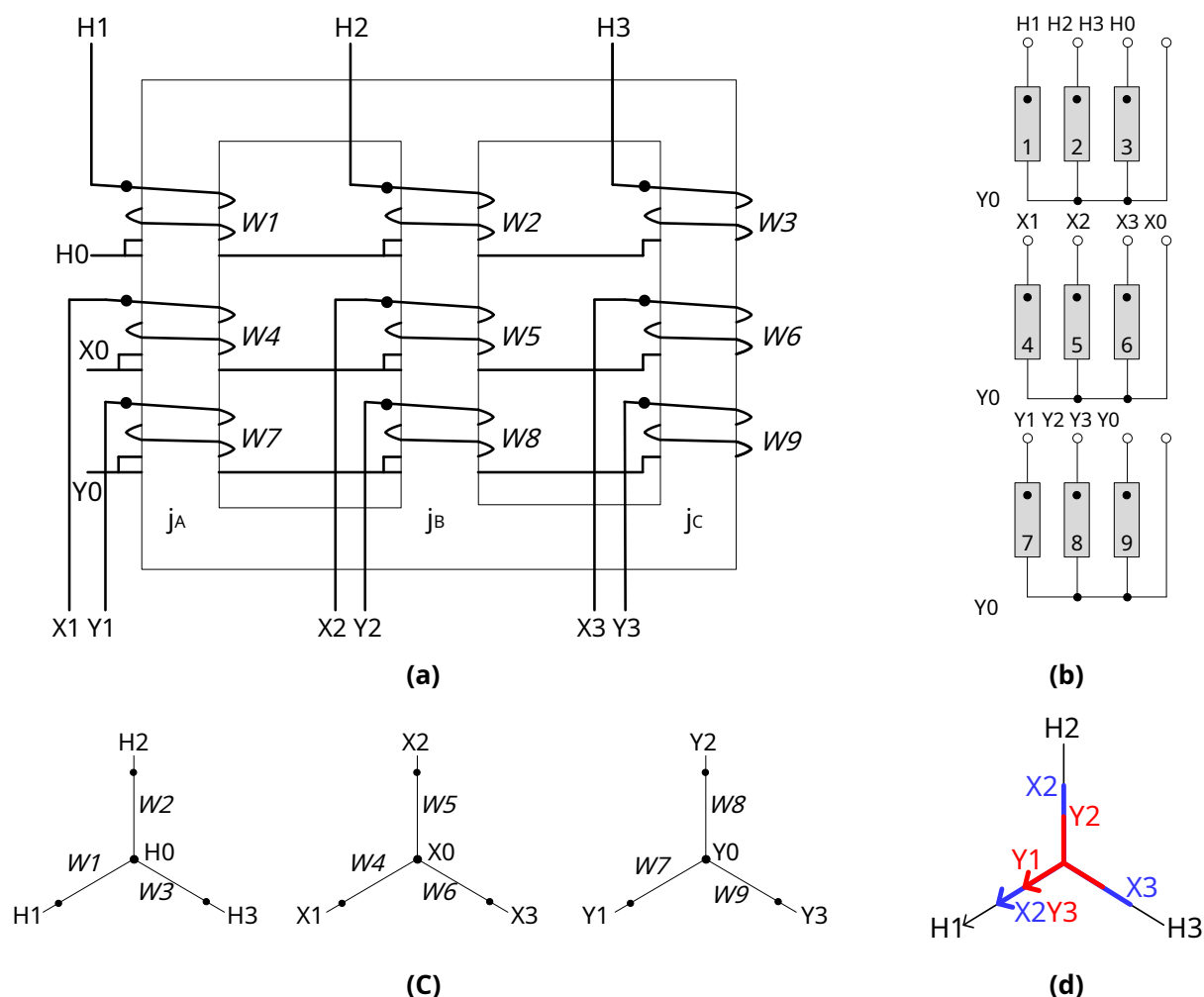


Figura 3-7- Transformador Yy0y0 de tres devanados con estrella primaria, estrella secundaria y estrella terciario: a) Diagrama esquemático del transformador, b) Diagrama de conexión del devanado, c) Vector diagrama, d) Diagrama vectorial de desplazamiento de fase

La información requerida para determinar los parámetros del modelo genérico enumerados en la Tabla 1-1 se extrae del informe de prueba. Estos datos se muestran en la Tabla 3-2. Los parámetros calculados para el modelo genérico se muestran en la Tabla 3-3, y el circuito equivalente de secuencia cero se muestra en la Figura 3-5. En el informe de prueba, solo se han proporcionado dos mediciones para la secuencia cero:

y . Se ha supuesto que la impedancia de la rama magnetizante es infinita. Con solo estos dos datos, , , y no se pueden determinar por separado. Por lo tanto, como se muestra en Figura 3-9, se supone que es cero. Este circuito es aproximadamente correcto cuando se acopla entre el devanado de alta tensión y los devanados de baja tensión.

RECORD OF TRANSFORMER TESTS

RATING 50/66.7/83.3MVA-65°C-ONAN/AF/AF-3-60-245/141.455-26/15.011-26/15.011 kV

ENG. NOTICE 120861

REQ.NO.

CUST.ORDER NO.

NOTE: Unless otherwise expressed, all values are based on 50 MVA

		Ejemplo6		
SERIAL NUMBER		289516	289517	GUARANTEE
NO LOAD LOSS AT 100% VOLTS	AMPS	1.42	1.33	47.5
CONNECTION	KW	47.656	46.32	
NO LOAD LOSS AT 110% VOLTS	AMPS	7.31	6.98	
CONNECTION	KW	72.8	70.757	
LOAD LOSS 75°C AT 117.8 AMPS	VOLTS	25382	25380	
CONNECTION LTC 13	KW	116.852	117.444	134.0
TOTAL LOSS 75°C	KW	164.508	163.764	
RESISTANCE 75°C	HV LTC 13	2.912	2.938	
BETWEEN TERMINALS	LV (X)	.04433	.04473	
MS	LV (Y)	.0443	.04453	
ADJUTORY LOSSES 18 FANS		25.49 KW	25.44 KW	
PER PHASE IMPEDANCE 25 MVA		H - X	7.81%	8.0%
5 MVA		H - Y	7.81%	8.0%

Figura 3-8-a- Ejemplo 6: Resultados de la prueba del transformador, página 1

RECORD OF TRANSFORMER TESTS								
SERIAL NUMBER			289516			289517		GUARANTEE
POSITIVE	H-X LTC 13		9.7%		9.65		9.5	
	H-Y LTC 13		9.67%		9.7		9.5	
	X-Y		18.05%		18.02		18.2	
IMPEDANCE	X-Y 3RD		54.06%					
	HARMONIC							
25 MVA	X-Y 5TH		90.74%					
	HARMONIC							
EAT RUN ON SERIAL NO.			289516			CONNECTION LTC 25		
WINDING RISE BY RESISTANCE								
MVA	TIME	HV	LV(X)	LV(Y)	GUARANTEE	TOP OIL RISE	AMBIENT TEMP.	
0	24 HRS	44.9	47.8	37.5	65°	46.5	31.0	
	24 HRS	42.1	48.2	35.6	65°	41.4	30.1	
5 0 MVA				8 3.3 MVA				
AVERAGE OIL TEMP	6 7.5 °C				5 6 .5°C			
IND. TEMP	HVX	LVX	LVY	HV	LVX	LVY		
IP OVER AVE	8.8	8.8	8.8	12.8	12.8	12.8		
IT SPOT OVER TOP	0	1.0	1.0	0	3.1	3.1		
SULATION TESTS								
PLIED	HV	TO BOTH LV'S AND GROUND 34 kV FOR 1 MIN						
TENTIAL	LV	TO HV, LV(Y) AND GROUND 34 kV FOR 1 MIN.						
STS	LV(Y)	TO HV, LV(X) AND GROUND 34 kV FOR 1 MIN.						
DUCE	479 kV FOR 7200 CYCLES 423 kV FOR 1 HOUR RIV LESS THAN 100 uv							
PULSE TESTS:	HV	850 LIL						
	LV	125 LIL						

CERTIFIED CORRECT _____ DATE 82-10-07

Figura 3-8-b- Ejemplo 6: Resultados de la prueba del transformador, página 2

Tabla 3-2- Información Requerida para Modelar el Transformador en el Ejemplo 6

Artículo	Parámetro del transformador	Símbolo	Valores
General			
1	Clasificaciones ONAN del transformador	AMEU _{EN UNA}	50 MVA
2	Wscore _{encontrando Vo etapas} (primario secundario, ...)	V _H , V _X , V _Y , ... V PAGS, V _S , ... V ₁ , V ₂ , ...	245kV/26kV/26kV
3	Tipo de conexión	-	Transformador
4	Rango de toque	t ₁ , t ₂ , ...	± 30%
5	Número de pasos de toque	-	24
6	Cuerda con grifo regulable	-	Lado primario (alto)
7	Ángulo de fase de los devanados	-1, -2, -3...	0°, 0°
Resultados de la prueba sin pérdida de carga			
8	Prueba de pérdida sin carga MVA	AMEU _{Prueba de NL}	-
9	Pérdida sin carga	PAGS _{Palcos Bajos}	47.656 kilovatios
10	corriente de excitación	y _{0Exc}	1,42 A
11	Toque la configuración para la prueba de pérdida sin carga	T _{Palcos Bajos}	Nominal
Resultados de la prueba de pérdida de carga			
12	Prueba de pérdida de carga MVA	AMEU _{Prueba SC, ...}	@ 117.8A (HX&Y @ 50MVA)
13	Pérdida de carga	PAGS _{CAROLINA DEL SUR, PAGS_{LL, HX, ...}}	116.852 kilovatios
14	Impedancia (voltaje)	y _{0z} , o Z _{HX} , ...	25382V
15	Resistencia reactiva	y _{0X} , o X _{HX} , ...	No reportado
dieciséis	Toque la configuración para la prueba de pérdida de carga	T _{CAROLINA DEL SUR}	nominales (13)
17	Impedancia de secuencia positiva entre devanados de par	HX, HY, XY @MVA	9,7%, 9,67%, 18,05% @ 25MVA
Resultados de la prueba de secuencia cero			
18	Resultados de la prueba de circuito abierto de secuencia cero	Z ₁ , Z ₂	-
19	Resultados de la prueba de cortocircuito de secuencia cero	Z ₃	-
20	Parámetros del modelo T de secuencia cero	Z _{H0} , Z' _{X0} Z _{M0} para el modelo T	-
21	Impedancias de secuencia cero entre devanados de par	Z _{HX 0} , Z _{HY 0} , para el modelo T	7.81%, 7,81% @ 25MVA
22	Configuración de puesta a tierra	Punto neutro de los devanados método de puesta a tierra	Primario Sólidamente conectado a tierra
23	Impedancia de puesta a tierra	Z _{GX} , Z _{GY} , ...	1- reactancia

Tabla 3-3- Ejemplo 6: Parámetros del Modelo Genérico del Transformador

Escribe	Parámetros en Por Unidad	Parámetros en Unidad SI
Fuga de devanados impedancia	$\frac{Z_{H0}}{Z_{H0}}$ PU $\frac{Z_{H0}}{Z_{H0}}$ PU $\frac{Z_{H0}}{Z_{H0}}$ PU	$\frac{Z_{H0}}{Z_{H0}}$ - $\frac{Z_{H0}}{Z_{H0}}$ - $\frac{Z_{H0}}{Z_{H0}}$ -
Prueba de pérdidas de carga equivalente impedancia	$\frac{Z_{H0}}{Z_{H0}}$ % $\frac{Z_{H0}}{Z_{H0}}$ PU $\frac{Z_{H0}}{Z_{H0}}$ PU	$\frac{Z_{H0}}{Z_{H0}}$ - $\frac{Z_{H0}}{Z_{H0}}$ - $\frac{Z_{H0}}{Z_{H0}}$ -
Verificación	PU	-
Rama magnetizante entrada	$y_{H0} = \frac{P_{AGS} \text{ Países Bajos}}{AMEU \text{ Prueba NLT-1000}} - 0.01205 \text{ PU}$	$y_{H0} = \frac{P_{AGS} \text{ Países Bajos}}{AMEU \text{ Prueba NLT-1000}} - 0.01205 \text{ PU}$
Pérdidas sin carga equivalente conductancia	$G_{H0} = \frac{P_{AGS} \text{ Países Bajos}}{AMEU \text{ Prueba NLT-1000}} - 9.53 \text{ mW}$ PU	$G_{H0} = \frac{P_{AGS} \text{ Países Bajos}}{AMEU \text{ Prueba NLT-1000}} - 9.53 \text{ mW}$ PU
Rama magnetizante susceptancia	$b_{H0} = \frac{P_{AGS} \text{ Países Bajos}}{AMEU \text{ Prueba NLT-1000}} - 0.012 \text{ PU}$	$b_{H0} = \frac{P_{AGS} \text{ Países Bajos}}{AMEU \text{ Prueba NLT-1000}} - 0.012 \text{ PU}$
secuencia cero parámetros	$\frac{Z_{H0}}{Z_{H0}}$ PU $\frac{Z_{H0}}{Z_{H0}}$ PU $\frac{Z_{H0}}{Z_{H0}}$ PU	$\frac{Z_{H0}}{Z_{H0}}$ - $\frac{Z_{H0}}{Z_{H0}}$ - $\frac{Z_{H0}}{Z_{H0}}$ -

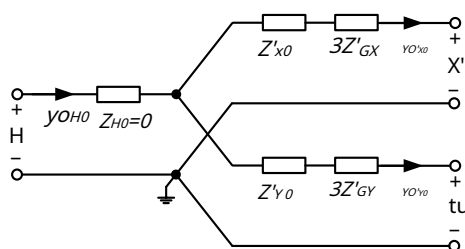


Figura 3-9 - El circuito equivalente de secuencia cero del Ejemplo 6

3.5 Transformadores de tres devanados con primario en estrella, secundario en estrella y terciario en triángulo

La conexión AY es susceptible a terceros armónicos y transitorios de voltaje cuando no está conectada a tierra. Para incorporar la ventaja de un devanado en Y y las ventajas del devanado en delta, se incorpora un tercer devanado, un devanado terciario en delta, en el transformador estrella-estrella de dos devanados. Este transformador Yy-delta no solo atrapa corrientes de falla a tierra y ofrece alta impedancia a terceros armónicos, sino que permite conectar lo siguiente:

- Un banco de capacitores – para corrección de voltaje o factor de potencia
- Reactores: para limitar las corrientes de falla a tierra (puesta a tierra resonante)
- Resistencias: para limitar las corrientes de falla a tierra
- Un transformador de servicio de estación: alimentación de CA para equipos dentro de la subestación
- Un sistema de distribución: para alimentar una ciudad o un cliente industrial

Además de las aplicaciones mencionadas anteriormente, los transformadores conectados en Yy-triángulo también se utilizan como transformadores de estación convertidora. Proporcionan dos sistemas trifásicos idénticos con un desfase de 30°. El transformador alimenta un convertidor disparado por línea de puente completo de 12 pulsos (dos de 6 pulsos).

El diagrama esquemático del transformador, la representación vectorial, el diagrama vectorial y el diagrama vectorial de desplazamiento de fase de un transformador conectado en triángulo Yy se muestran en la figura 3-10.

3.5.1 Transformador Yy-triángulo de tres devanados: modelo genérico de secuencia positiva y negativa

El modelo genérico de un transformador Yy-triángulo trifásico de tres devanados para secuencia positiva y negativa es similar al de un transformador monofásico de tres devanados, como se muestra en la Figura 3-3.

3.5.2 Transformador Yy-delta de tres devanados: procedimiento para determinar los parámetros del modelo genérico

El procedimiento para modelar un transformador Yy-triángulo trifásico con tres devanados en secuencia positiva o negativa es el mismo que el procedimiento del transformador monofásico descrito en la Sección 3.2.4, excepto que se debe determinar la secuencia cero. La siguiente sección describe cómo se modela el circuito equivalente de secuencia cero de un transformador Yy-triángulo de tres devanados.

3.5.3 Transformador Yy-delta de tres devanados: circuito equivalente de secuencia cero

El circuito equivalente de secuencia cero de un transformador conectado en Yyd depende de si los puntos neutros están conectados a tierra o no. Por lo tanto, hay cuatro tipos diferentes de circuitos equivalentes de secuencia cero, como se muestra en la tabla 3-4; sin embargo, algunos de ellos pueden no ser utilizados en la práctica. En la práctica, el punto neutro del lado de baja tensión no está conectado a tierra si el transformador conecta un SVC a la red. Ambos puntos neutros pueden conectarse a tierra si el devanado terciario (tercero) es un devanado enterrado que no alimenta la carga. En condiciones de falla a tierra, la corriente de secuencia cero fluye en el devanado delta. Para limitar esta corriente, a veces el devanado terciario delta se cierra a través de una resistencia.

Tabla 3-4- Circuitos equivalentes de secuencia cero de tres devanados conectados en estrella-estrella-triángulo
Transformadores

	Tipo de conexión	Modelo T	Símbolo
1			Yyd
2			Y-yn-d
3			YN-yd
4			YN-yn-d

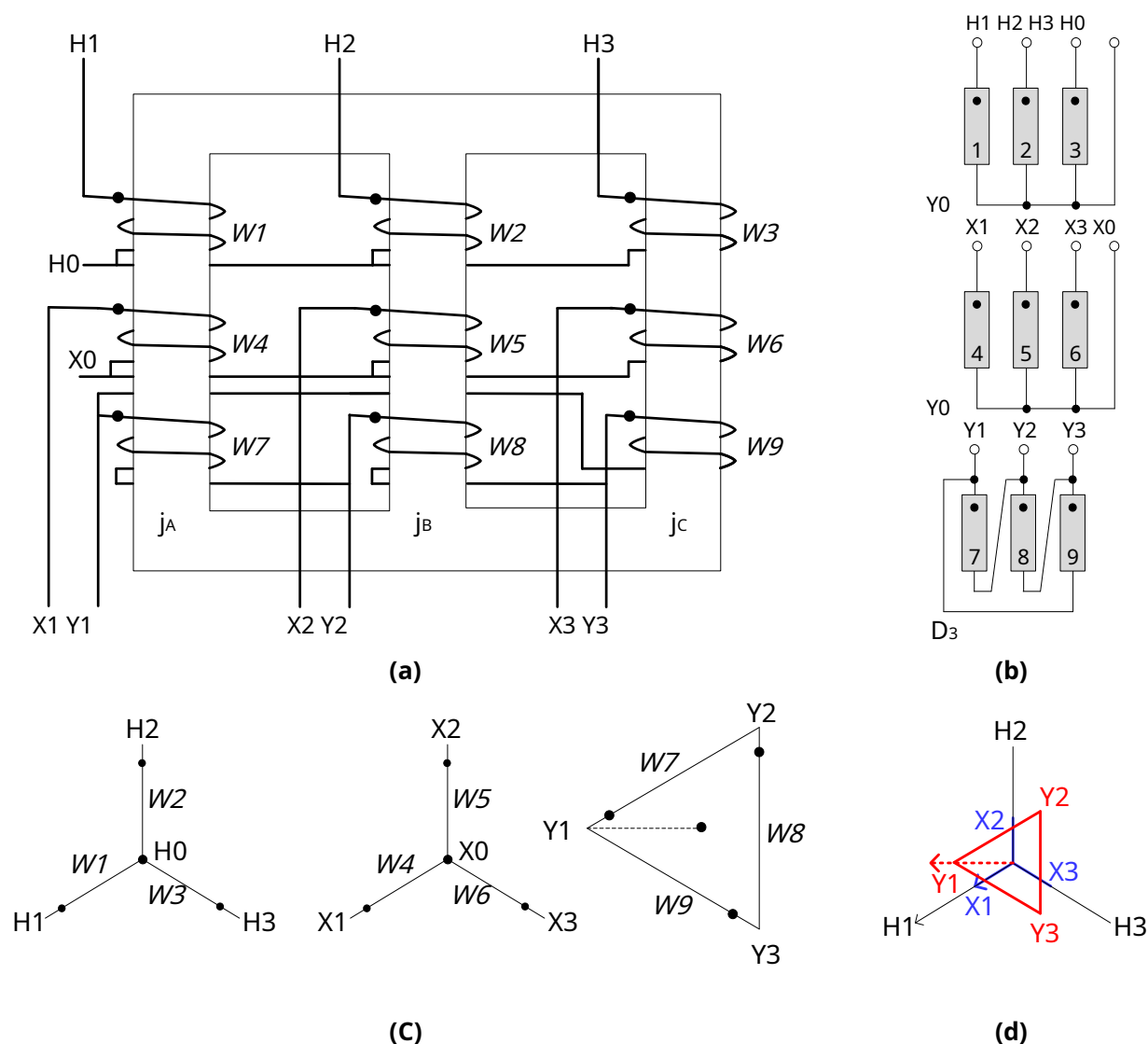


Figura 3-10- Transformador Yy0d6 de tres devanados con primario en estrella, secundario en estrella y delta terciario: a) Diagrama esquemático del transformador, b) Diagrama de conexión del devanado, c) Vector diagrama, d) Diagrama vectorial de desplazamiento de fase

3.5.4 Ejemplo 7: Un transformador práctico conectado YY-Delta de tres devanados

La Figura 3-11 muestra la información de la placa de identificación de un transformador SVC de tres devanados conectado en Yyd de 250/20/20 kV, 150/200/250 MVA. Los puntos neutros de los devanados de alta tensión están sólidamente conectados a tierra. El diagrama esquemático y el diagrama vectorial de este tipo de transformador se muestran en la Figura 3-10. La tensión nominal del primario es de 250 kV y ambos devanados de baja tensión son de 20 kV. La clasificación de MVA del devanado de alto voltaje es la suma de dos clasificaciones de MVA de bajo voltaje en todas las clases de enfriamiento. Este transformador no ha sido equipado con un cambiador de tomas porque la potencia reactiva en el lado de bajo voltaje no está controlada por la amplitud del voltaje. Una parte de la prueba del transformador.

El informe que contiene la información requerida para calcular los parámetros del transformador extraídos del informe de prueba detallado se muestra en la Figura 3-12-a a la Figura 3-12-g. Para determinar los parámetros del modelo genérico del transformador, solo se utilizan los resultados de la prueba de relación de derivación nominal.

El procedimiento de modelado propuesto en la Sección 3.2.4 se aplicaría para obtener el circuito equivalente del modelo T, pero las pérdidas de carga medidas de los devanados no se han corregido en el informe de prueba. La información requerida para modelar el transformador se enumera en la Tabla 3-5. Sin embargo, como se muestra en la Figura 3-12-e, este modelo se ha proporcionado en el informe de prueba para una base de 125 MVA y 60 Hz. Estos resultados se enumeran en la Tabla 3-6. Para obtener los parámetros del circuito equivalente del modelo T en la base ONAN MVA del devanado de alta tensión, los parámetros a 125 MVA se multiplican por la relación de MVA (150/125=1,2) de la siguiente manera:

—
—
—

La rama de magnetización, que se supone que ha sido modelada en el devanado de alto voltaje, se calcula a partir de la prueba sin carga.

@ 250 MVA

— —
— — $\bar{U}$
— —

$$b_{@ONAN\ MVA} = \sqrt{y_{\text{grain}}^2} = 2.4356 \text{ mi-4-}$$

$$B_H = \sqrt{Y_H^2 - \text{GRAMQ}_H^2} = -6.34 \text{ mi-7-}$$

El circuito equivalente de secuencia cero de este transformador se ha dado en el informe de prueba a 125 MVA, como se muestra en la Figura 3-12-f. De manera similar a la utilizada para los parámetros del circuito equivalente de secuencia positiva, la impedancia de secuencia cero también se convierte a la base ONAN MVA. Debido a que el devanado conectado en estrella de bajo voltaje no está conectado a tierra, el circuito equivalente de secuencia cero de este transformador es una impedancia del terminal de alto voltaje y un circuito abierto de los terminales de bajo voltaje.

— - -

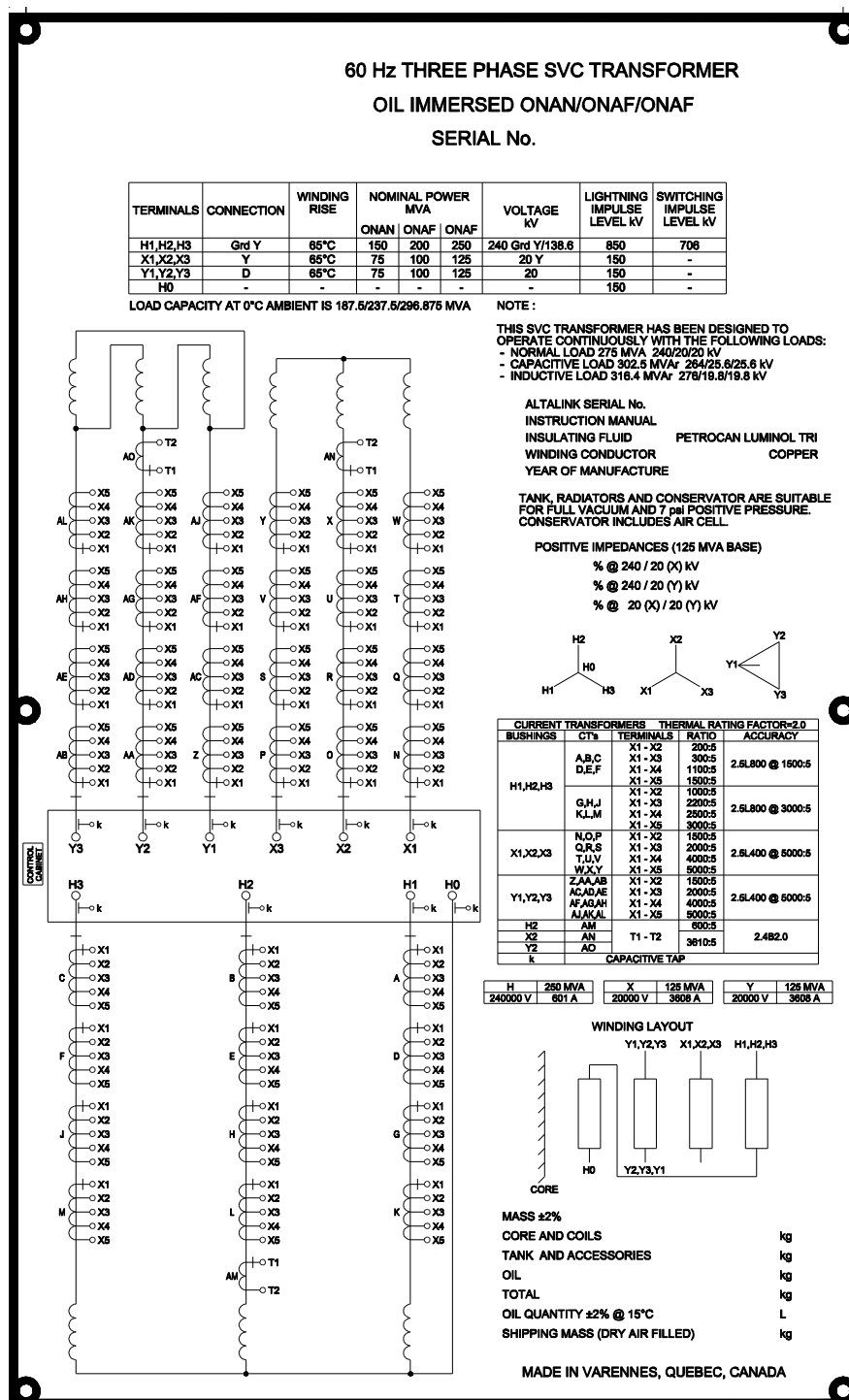


Figura 3-11- Ejemplo 7: Placa de identificación del transformador

TEST REPORT ON THE UNIT SERIAL

2011-10-21

4.0 NO LOAD LOSSES & MAGNETIZING CURRENT

MEASUREMENTS BEFORE DIELECTRICS							
APPLIED VOLTAGE			RMS CURRENT		NO LOAD LOSSES		
% OF RATED VOLTAGE	RMS (kV)	MEAN (kV)	MEASURED (% OF RATED I)	GUARANTEED (% OF RATED I)	MEASURED (kW)	CORRECTED (kW)	GUARANTEED (kW)
80	16.0	16.0	0.020	-	30.5	30.5	-
90	18.0	18.0	0.022	-	38.6	38.6	-
100	20.0	20.0	0.024	-	47.9	47.9	-
105	21.0	21.0	0.024	-	53.1	53.1	-
110	22.0	22.0	0.025	-	58.6	58.6	-
135	26.9	27.0	0.059	-	102.1	102.5	-

I% is based on 250 MVA

MEASUREMENTS AFTER DIELECTRICS							
APPLIED VOLTAGE			RMS CURRENT		NO LOAD LOSSES		
% OF RATED VOLTAGE	RMS (kV)	MEAN (kV)	MEASURED (% OF RATED I)	GUARANTEED (% OF RATED I)	MEASURED (kW)	CORRECTED (kW)	GUARANTEED (kW)
80	16.0	16.0	0.020	-	30.4	30.5	-
90	18.0	18.0	0.022	-	38.6	38.6	-
100	19.9	20.0	0.024	0.030	47.5	47.6	67.0
105	21.0	21.1	0.025	-	53.1	53.2	-
110	22.0	22.1	0.025	-	58.7	58.9	-
135	26.5	26.9	0.048	-	92.9	94.3	-

I% is based on 250 MVA

Figura 3-12-a- Ejemplo 7: Resultados de la prueba del transformador, página 1

TEST REPORT ON THE UNIT SERIAL

2011- 10-21

5.0 LOAD LOSSES, IMPEDANCE

LOAD LOSSES CORRECTED AT 85°C, 250 MVA H / X +Y								
WINDINGS				MEAN	MEAN WINDING	LOAD LOSSES		
kV	TC POS	kV	kV	CURRENT (A)	TEMPERATURE °C	MEASURED (kW)	CORRECTED (kW)	GUARANTEED (kW)
240	-	20	20	601.9	21.1	855.8	1007.4	1190

LOAD LOSSES CORRECTED AT 85°C, 125 MVA H / X								
WINDINGS				MEAN	MEAN WINDING	LOAD LOSSES		
kV	TC POS	kV	TC POS	CURRENT (A)	TEMPERATURE °C	MEASURED (kW)	CORRECTED (kW)	GUARANTEED (kW)
240	-	20	-	300.9	20.7	319.5	-	-

LOAD LOSSES CORRECTED AT 85°C, 125 MVA H / Y								
WINDINGS				MEAN	MEAN WINDING	LOAD LOSSES		
kV	TC POS	kV	TC POS	CURRENT (A)	TEMPERATURE °C	MEASURED (kW)	CORRECTED (kW)	GUARANTEED (kW)
240	-	21.4	-	301.4	20.7	337.4	-	-

LOAD LOSSES CORRECTED AT 85°C, 125 MVA X / Y								
WINDINGS				MEAN	MEAN WINDING	LOAD LOSSES		
kV	TC POS	kV	TC POS	CURRENT (A)	TEMPERATURE °C	MEASURED (kW)	CORRECTED (kW)	GUARANTEED (kW)
20	-	20	-	499.4	20.7	8.8	-	-

Figura 3-12-b- Ejemplo 7: Resultados de la prueba del transformador, página 2

TEST REPORT ON THE UNIT SERIAL

2011-10-21

IMPEDANCE H / X + Y						
WINDINGS				MEASURED	IMPEDANCE (BASE 250 MVA)	
kV	TC POS	kV	kV	VOLTAGE (kV)	MEASURED (%)	GUARANTEED (%)
240	-	20	20	37.7	15.7	-

IMPEDANCE H / X + Y								
WINDINGS				FREQUENCY	MEASURED	MEASURED	IMPEDANCE (BASE 250 MVA)	
kV	TC POS	kV	kV	(Hz)	CURRENT (A)	VOLTAGE (kV)	MEASURED (%)	GUARANTEED (%)
240	-	20	20	180	1.11	0.21	46.93	-
240	-	20	20	300	0.67	0.21	78.21	-
240	-	20	20	420	0.48	0.21	109.55	-
240	-	20	20	540	0.37	0.21	141.01	-
240	-	20	20	660	0.30	0.21	172.58	-
240	-	20	20	780	0.26	0.21	204.47	-

IMPEDANCE H / X						
WINDINGS				MEASURED	IMPEDANCE (BASE 125 MVA)	
kV	TC POS	kV	TC POS	VOLTAGE (kV)	MEASURED (%)	GUARANTEED (%)
240	-	20	-	23.3	9.7	9.5

IMPEDANCE H / X									
WINDINGS				FREQUENCY	MEASURED	MEASURED	IMPEDANCE (BASE 125 MVA)		
kV	TC POS	kV	TC POS	(Hz)	CURRENT (A)	VOLTAGE (kV)	MEASURED (%)	R (Ω)	X (Ω)
240	-	20	-	60	2.69	0.21	9.71	2.02	44.68
240	-	20	-	180	0.90	0.21	29.09	3.02	134.00
240	-	20	-	300	0.54	0.21	48.49	4.75	223.37
240	-	20	-	420	0.38	0.21	67.96	7.24	313.08
240	-	20	-	540	0.30	0.21	87.53	10.47	403.20
240	-	20	-	660	0.24	0.21	107.27	14.50	494.10
240	-	20	-	780	0.20	0.21	127.20	19.33	585.80

Figura 3-12-c- Ejemplo 7: Resultados de la prueba del transformador, página 3

TEST REPORT ON THE UNIT SERIAL

2011-10-21

IMPEDANCE H/Y						
WINDINGS				MEASURED	IMPEDANCE (BASE 125 MVA)	
kV	TC POS	kV	TC POS	VOLTAGE (kV)	MEASURED (%)	GUARANTEED (%)
240	-	20	-	22.9	9.5	9.5

IMPEDANCE H/Y									
WINDINGS				FREQUENCY	MEASURED	MEASURED	IMPEDANCE (BASE 125 MVA)		
kV	TC POS	kV	TC POS	(Hz)	CURRENT (A)	VOLTAGE (kV)	MEASURED (%)	R (Ω)	X (Ω)
240	-	20	-	60	2.74	0.21	9.52	2.09	43.83
240	-	20	-	180	0.92	0.21	28.51	3.19	131.34
240	-	20	-	300	0.55	0.21	47.49	4.97	218.79
240	-	20	-	420	0.39	0.21	66.53	7.48	306.50
240	-	20	-	540	0.30	0.21	85.66	10.75	394.57
240	-	20	-	660	0.25	0.21	104.88	14.73	483.07
240	-	20	-	780	0.21	0.21	124.27	19.53	572.31

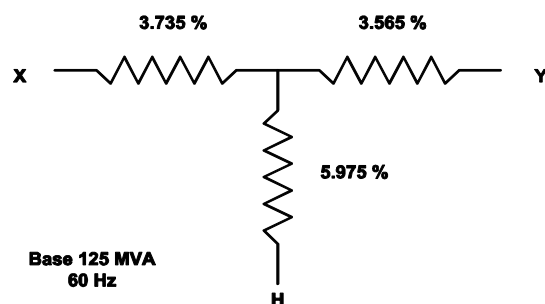
IMPEDANCE X/Y						
WINDINGS				MEASURED	IMPEDANCE (BASE 125 MVA)	
kV	TC POS	kV	TC POS	VOLTAGE (kV)	MEASURED (%)	GUARANTEED (%)
20	-	20	-	0.2	7.3	6.8

IMPEDANCE X/Y									
WINDINGS				FREQUENCY	MEASURED	MEASURED	IMPEDANCE (BASE 125 MVA)		
kV	TC POS	kV	TC POS	(Hz)	CURRENT (A)	VOLTAGE (kV)	MEASURED (%)	R (Ω)	X (Ω)
20	-	20	-	60	20.32	0.01	7.43	0.02	0.24
20	-	20	-	180	13.85	0.01	22.19	0.03	0.71
20	-	20	-	300	8.34	0.01	36.92	0.04	1.18
20	-	20	-	420	5.97	0.01	51.62	0.06	1.65
20	-	20	-	540	4.64	0.01	66.31	0.09	2.12
20	-	20	-	660	3.80	0.01	80.98	0.12	2.59
20	-	20	-	780	3.22	0.01	95.64	0.15	3.06

Figura 3-12-d- Ejemplo 7: Resultados de la prueba del transformador, página 4

TEST REPORT ON THE UNIT SERIAL

2011-10-21



The equivalent "T" network impedances at 300Hz are $Z_h=29.85\%$, $Z_x=18.55\%$, $Z_y=17.55\%$. The calculated equivalent impedance for the 5th harmonic is $Z_{eq}=38.87\%$ (Minimum 37.4% as specified in ABB Facts 1JNR100017-542)

Figura 3-12-e- Ejemplo 7: Resultados de la prueba del transformador, página 5

TEST REPORT ON THE UNIT SERIAL

2011-10-21

6.0 ZERO SEQUENCE IMPEDANCE

ZERO SEQUENCE IMPEDANCE							
VOLTAGE APPLIED	TERMINAL SHORT CIRCUITED	VOLTAGE (kV)	CURRENT (A)	Z (%) (BASE 125 MVA)	R (Ω)	X (Ω)	POSITION DETC
H1, H2, H3	X1, X2, X3, Y2, H0, GND	6.29	500.50	8.18	2.81	37.6	-
H1, H2, H3	Y2, H0, GND	6.27	499.70	8.17	2.81	37.5	-

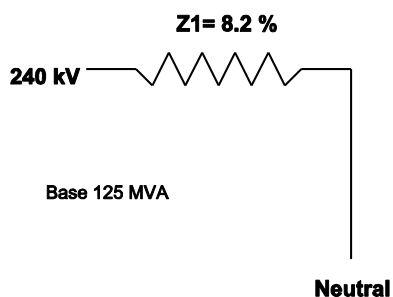


Figura 3-12-f- Ejemplo 7: Resultados de la prueba del transformador, página 6

TEST REPORT ON THE UNIT SERIAL

2011-10-21

7.0 X TO R RATIO & VOLTAGE REGULATION

X TO R RATIO			
CONNECTION	X % (250 MVA)	R% (85°C)	X/R
H / (X+Y)	15.695	0.403	38.949

VOLTAGE REGULATION CALCULATED H/(X+Y)			
MVA	POWER FACTOR LAGGING (%)		
	100	90	80
250	1.622	8.108	10.428
200	1.105	6.350	8.421
150	0.683	4.658	6.101

Figura 3-12-g- Ejemplo 7: Resultados de la prueba del transformador, página 7

Tabla 3-5-Información requerida para modelar el transformador en el ejemplo 7

Artículo	Parámetro del transformador	Símbolo	Valores			
General						
			H	X	Y	
1	Clasificaciones ONAN del transformador	AMEUEN UNA	150	75	75	
2	Voltajes de bobinado (primario secundario, ...)	V _H , V _X ,...(kV) V PAGS, V _S ,...(kV) V ₁ , V ₂ , ...(kV)	240 Grado Y	20	20	
3	Tipo de conexión	-	Y	Y	Delta	
4	Rango de toque	t ₁ , t ₂ , ...	-	-	-	
5	Número de pasos de toque	-	-	-	-	
6	Cuerda con grifo regulable	-	-	-	-	
7	Ángulo de fase de los devanados	-1, -2, ...	0°	0°	30°	
Resultados de prueba sin pérdida de carga (entre pares de devanados)						
8	Prueba de pérdida sin carga MVA	AMEUPrueba de NL	250 MVA			
9	Pérdida sin carga	PAGSPalcos Bajos	47,6 kilovatios			
10	corriente de excitación	y _{0Exc} *	0,024 %			
11	Toque la configuración para la prueba de pérdida de NL	t _{Palcos Bajos}	-			
Resultados de la prueba de pérdida de carga						
	Entre Par de Devanados		HX	HY	XY	HX&Y @ Carga completa
12	Prueba de pérdida de carga MVA	AMEUPrueba SC,	125	125	125	250
13	Pérdidas de carga	PAGSLL(kW)	319.5*	337.4*	8.8*	1007.4
14	Corriente de prueba media	A	300.9	301.4	499.4	601.9
15	Voltaje de prueba	kV	23.3	22,9	0.2	37.7
dieciséis	Impedancia	y _{oz} %	9,7%	9,5%	7,3%	15,7%
17	Resistencia reactiva	y _{ox} %	-	-	-	-
18	Resistencia	y _{or} %	-	-	-	-
Resultados de la prueba de secuencia cero						
			Cortocircuito		Circuito abierto	
19	Prueba AMEU	AMEUPrueba SC,	125		125	
20	Voltaje de prueba (Desde el lado H)	kV	6.29		6.27	
21	Impedancia	y _{oz} %	8,18%		8,17%	
22	Resistencia reactiva	-	37.6		37.5	
	Resistencia	-	2.81		2.81	

* Estos valores no son valores corregidos a 85°C; por lo tanto, no se pueden utilizar para los cálculos de modelado

Tabla 3-6 - Ejemplo 7: Parámetros del Modelo Genérico del Transformador

Escribe	Parámetros en Por Unidad	Parámetros en Unidades SI ¹
Fuga de devanados impedancia	% @ 125 MVA % @ 125 MVA % @125 MVA	Verificación: 35.938 - Para prueba de pérdidas a plena carga:
Rama magnetizante entrada	AMEU PU @ EN UNA	$\bar{U}_0$ - $\bar{U}_0$
Pérdidas sin carga equivalente conductancia	@ONAN MVA pu@ONÁN MVA	$\frac{PAGS_c}{V_{jefe}^2} - \frac{PAGS_{\text{Poles Bajos}}}{V_{\text{Clasificación H}}^2} - 8.263 \text{ mi-7}\bar{U}$ $\frac{PAGS_{\text{Poles Bajos}}}{V_k \text{ clasificado}^2} - 1.19 \text{ mi-4}\bar{U}$
Rama magnetizante susceptancia	PU	$B_H - Y_2 \sqrt{\frac{H - GRAMO_H}{H - GRAMO_H}}^2 - -6.34 \text{ mi-7}\bar{U}$
Secuencia cero parámetros	PU	-

3.6 Transformadores de tres devanados con primario en triángulo, secundario en estrella y terciario en estrella

En aplicaciones prácticas, los devanados del lado de baja tensión deben conectarse a tierra a través de una resistencia o reactancia para limitar las corrientes de falla a tierra. Este tipo de conexión se suele utilizar en transformadores de doble secundario, lo que significa que ambos devanados de baja tensión son idénticos. Como puede verse en la información de la placa de identificación del Ejemplo 8 en la Sección 3.6.4, tienen las mismas clasificaciones.

3.6.1 Transformador Dyy de tres devanados: modelo genérico de secuencia positiva y negativa

El modelo genérico de un transformador Dyy trifásico de tres devanados para secuencia positiva y negativa es similar al de un transformador monofásico de tres devanados, como se muestra en la Figura 3-3. Las tres impedancias de fuga se obtienen a partir de tres mediciones de prueba de pérdida de carga a través de la ecuación dada en la Tabla 3-1.

3.6.2 Transformador Dyy de tres devanados: procedimiento para determinar los parámetros del modelo genérico

El procedimiento para modelar un transformador Dyy trifásico de tres devanados en secuencia positiva o negativa es el mismo que el procedimiento del transformador monofásico descrito en la Sección 3.2.4, excepto que se debe determinar la secuencia cero. La siguiente sección describe cómo se modela el circuito equivalente de secuencia cero de un transformador Dyy de tres devanados.

En la práctica, las tres impedancias de fuga de secuencia positiva obtenidas de tres pruebas de pérdidas de carga entre el par de devanados se informan directamente en los informes de prueba.

3.6.3 Transformador Dyy de tres devanados: circuito equivalente de secuencia cero

El circuito equivalente homopolar de un transformador conectado en Dyy depende de si los puntos neutros se han puesto a tierra o no. Se supone que ambos puntos neutros de baja tensión se han puesto a tierra; por lo tanto, el circuito equivalente de secuencia cero es como se muestra en la figura 3-13.

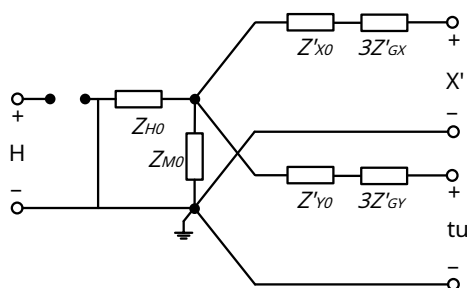
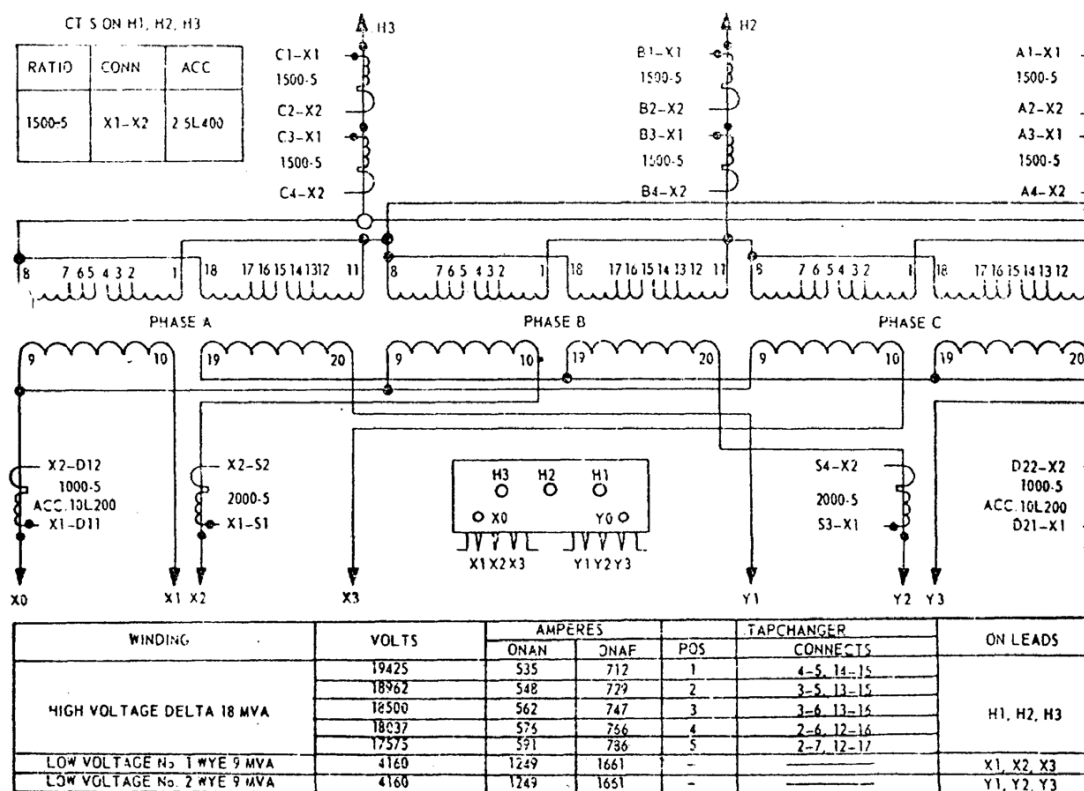


Figura 3-13- Circuito equivalente homopolar de un transformador conectado en Dyy puesto a tierra

3.6.4 Ejemplo 8: Un transformador Dyy práctico de tres devanados

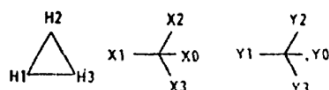
La Figura 3-14 muestra la información de la placa de identificación de un transformador conectado Dy1y1 de tres devanados de 18.5/2.4/2.4 kV, 18/24 MVA. Los informes de prueba para este transformador se muestran en la Figura 3-15. La información requerida para modelar el transformador se extrae del informe de prueba y se enumera en la Tabla 3-7. La tabla 3-8 muestra el cálculo de las impedancias del circuito equivalente del modelo T. Ambos puntos neutros se han puesto a tierra sólidamente (las impedancias de tierra prácticas no están disponibles; por lo tanto, impedancia = 0).

18/24 MVA 65°C RISE 18500 HV 4160Y/2400 LV#1 4160Y/2400 LV#2	THREE PHASE 60 CYCLE TRANSFORMER TYPE ONAN/ONAF	IMP % HV TO LV#1 _____ HV TO LV#2 _____ AT 9 MVA LV#1 TO LV#2 _____ GAL OIL _____ MFG SERIAL _____ CUST SERIAL _____ INST BOOK _____
BASIC IMPULSE LEVEL: HV 150KV, LV#1 & LV#2 95 KV.		



OIL MUST BE MAINTAINED AT THE PROPER LEVEL. DO NOT OPERATE NO LOAD TAPCHANGER WITH TRANSFORMER ENERGIZED.
AMPERE RATING GIVEN IS CURRENT IN OUTLET LEADS GENERAL WIRING DIAGRAM:
DO NOT ENERGIZE TRANSFORMER WITH RADIATOR VALVES CLOSED
TANK WITHSTANDS PRESSURE 5 PSI POSITIVE OR 14.7 PSI NEGATIVE FULL VACUUM

CORE AND WINDINGS _____ LB
TANK AND FITTINGS _____ LB
INSULATING LIQUID _____ LB
TOTAL _____ LB



BUILT _____

Figura 3-14- Ejemplo 8: Información de la placa de identificación del transformador

Purchaser: Test APRIL 1973 Purchaser's Order No. 60 G.O. 3-S-7248

ONAN/ONAF Phase 3 Cy. 60 Insulating Fluid OIL Polarity SURT

Winding H.V. Winding L.V.#1 Winding L.V.#2

Kva 18000/21000 Kva 9000/12000 Kva 9000/12000

Voltage 18500 DELTA Voltage 4160 WYE Voltage 4160 WYE

RESISTANCES, EXCITING CURRENT, LOSSES AND IMPEDANCE - Based on normal rating, unless otherwise stated. Losses and regulation are based on wattmeter measurements. For three-phase transformers the resistances are the sum of the three phases in series. Pos. #1

SERIAL NO.	RESISTANCE IN OHMS AT 75°C			% EXCITE CURRENT AT 100% RATED VOLTAGE	NO LOAD LOSS WATTS AT 100% RATED VOLTAGE	18.5 Kv		18.5 Kv		18.5 Kv	
	WINDINGS					TO 4.16 Kv	TO 4.16 Kv	TO 4.16 Kv	TO 4.16 Kv	TO 4.16 Kv	TO 4.16 Kv
	H.V.	LV#1	LV #2			18000 Kva	21000 Kva	9000 Kva	12000 Kva	9000 Kva	12000 Kva
A-3-S-7248	0.359	0.0108	0.0108	0.69	16500	80000	6.7	143800	8.9	*LV#1 & LV#2	
						Total Loss 16500	% Imp 75°C 6.7	Total Loss 143800	% Imp 75°C 8.9		
AVERAGE					16500	96500	6.7	140200	8.9		
GUARANTEE					18000	108000	6.5	178000			
REGULATION AT 75°C						100% PF	% PF	80% PF	% PF		

TEMPERATURE RISES - Average rise in degrees C., corrected to instant of shutdown, of transformer.

Serial No. A-3-S-7248 with windings connected and loaded as follows:

HV Winding 17.575 Kv 591 Amp.: LV#1 Winding 4.16 Kv 1249 Arr

LV#2 Winding 4.16 Kv 1249 Amp. until constant temperature rise was reached.

	RISE OF WINDINGS BY RESISTANCE				TOP FLUID RISE	AMBIENT TEMP.		RISE	WATER GALLONS PER MIN.	POUNDS PRESSURE
	H.V.	L.V.#1	L.V.#2	GUARANTEE		INGOING WATER	IDLER OR ROOM			
ONAN	51	59.0	47.8	65	49.3					
ONAF	54.9	60.3	55.8	65	45.6					

INSULATION TESTS	WINDING	VOLT RATING	TEST VOLTAGE APPLIED IN Kv	DURATION OF TEST IN SECONDS
APPLIED POTENTIAL TESTS (Voltage applied between each winding and all other windings connected to core and ground.)	H.V.	18500	50	60
	L.V.#1	4160	26	60
	L.V.#2	4160	26	60

INDUCED POTENTIAL TEST Two times rated voltage across full winding; Line terminal to ground; at 180 cycles per second for 7200 cycle

REMARKS NAMEPLATE #206P454
 % IMPEDANCE BETWEEN H.V.-L.V.#1 = 6.45
 H.V.-L.V.#2 = 6.50
 L.V.#1 - L.V.#2 = 12.78 } based on 9 MVA

I hereby certify that this is a true report based on factory tests made in accordance with the latest Transformer Test Code C57.2 of the American Standards Association and that each transformer withstood the above insulation tests.

Signed _____ Date May 22, 1973 Approved _____

Page _____ of _____ Pages

Figura 3-15- Ejemplo 8: Resultados de la prueba del transformador

Tabla 3-7- Información Requerida para Modelar el Transformador del Ejemplo 8

Artículo	Parámetro del transformador	Símbolo	Valores
General			
1	Clasificaciones ONAN del transformador	AMEU ^{EN UNA}	18 MVA
2	Voltajes de bobinado (primario secundario, ...)	V _H , V _X , V _Y , ... V PAGS, V _S , ... V ₁ , V ₂ , ...	18,5 kV/2,4 kV/2,4 kV
3	Tipo de conexión	-	dyy
4	Rango de toque	t ₁ , t ₂ , ...	± 30%
5	Número de pasos de toque	-	5 (OCT)
6	Cuerda con grifo regulable	-	Lado primario (alto)
7	Ángulo de fase de los devanados	-1, -2, -3...	30°, 30°
Resultados de la prueba sin pérdida de carga			
8	Prueba de pérdida sin carga MVA	AMEU ^{Prueba de NL}	-
9	Pérdida sin carga	PAGS ^{Pruebas Bajos}	16,5 kilovatios
10	corriente de excitación	%YO _{Exc} ^a	0,69 A
11	Toque la configuración para la prueba de pérdida sin carga	Dratos Bajos	Nominal
Resultados de la prueba de pérdida de carga			
12	Prueba de pérdida de carga MVA	AMEU ^{Prueba SC, ...}	(H-X+Y @ 18MVA)
13	Pérdida de carga	PAGS ^{CAROLINA DEL SUR, PAGS_L, HX, ...}	80 kilovatios
14	Impedancia (voltaje)	y _{OZ} , o Z _{HX} , ...	6,7%
15	Resistencia reactiva	y _{OX} , o X _{HX} , ...	No reportado
dieciséis	Toque la configuración para la prueba de pérdida de carga	ECAROLINA DEL SUR	nominales (13)
17	Impedancia de secuencia positiva entre devanados de par	HX, HY, XY @MVA	6,45%, 6,50%, 12,78% @ 9MVA
Resultados de la prueba de secuencia cero			
18	Resultados de la prueba de circuito abierto de secuencia cero	Z ₁ , Z ₂	-
19	Resultados de la prueba de cortocircuito de secuencia cero	Z ₃	-
20	Parámetros del modelo T de secuencia cero	Z _{H0} , Z' _{X0} Z _{M0} para el modelo T	-
21	Impedancias de secuencia cero entre devanados de par	Z _{HX 0} , Z _{HY 0} , para el modelo T	-
22	Configuración de puesta a tierra	Punto neutro de los devanados método de puesta a tierra	sólidamente conectado a tierra
23	Impedancia de puesta a tierra	Z _{GX} , Z _{GY} , ...	0 - reactancia

Tabla 3-8- Ejemplo 8: Parámetros del Modelo Genérico del Transformador

Escribe	Parámetros en Por Unidad	Parámetros en Unidades SI ₁
Fuga de devanados impedancia	$\frac{P_{NL}}{MVANL_{Test-1000}} @ 18MVA$	$\frac{P_{NL}}{2} = 19.014 -$ $\frac{P_{NL}}{2} = 1.2473 -$ Verificación: De la prueba de pérdidas a plena carga:
Rama magnetizante entrada	$y - \% y_{Exc} / 100 = 0.0069 PU$	$y_H - \frac{y_o}{COV} = -3.63 mi-4 \angle 0^\circ$
Pérdidas sin carga conductancia equivalente	$\frac{P_{NL}}{MVANL_{Test-1000}} = 0.00092 PU$	$\frac{P_{NL}}{2} = 4.821 mi-5 \angle 0^\circ$ Clasificación VH
Rama magnetizante susceptancia	$b - y_2 \sqrt{gramo^2} = -0.0068 PU$	$BH - Y_2 \sqrt{H-GH}^2 = -3.6 mi-4 \angle 0^\circ$
Secuencia cero parámetros (Basado en suposiciones)		

3.7 Transformadores de tres devanados con primario en triángulo, secundario en estrella y terciario en triángulo

El devanado terciario en este tipo de conexión no está previsto para suministrar una cantidad considerable de carga; podría usarse para una pequeña carga local, como la iluminación de una subestación. En la práctica, si el valor nominal en VA del devanado terciario conectado en delta es significativamente menor que el valor nominal en VA de los otros devanados, no se puede considerar como un solo devanado en el modelo. Incluso en la práctica, los ingenieros prácticos no lo reconocen como un transformador de tres devanados. Sin embargo, la corriente de secuencia cero puede fluir a través de este devanado. Por lo tanto, el devanado terciario debe soportar la corriente de falla de secuencia cero si uno de los otros devanados es una conexión Y puesta a tierra. Por ejemplo, la Figura 3-16 muestra la información de la placa de identificación de un transformador conectado Dyd. Es un transformador de distribución de 5,76 MVA 20 kV/900 V. Este transformador no tiene un informe de resultados de prueba, pero las impedancias se proporcionan en la placa de identificación del transformador. Estos parámetros se pueden utilizar para obtener el circuito equivalente de secuencia positiva. El circuito equivalente homopolar de este transformador depende de si el punto neutro del devanado secundario está conectado a tierra o no. Si se ha conectado a tierra, el circuito equivalente de secuencia cero es solo una impedancia desde la terminal secundaria y es un circuito abierto desde las otras terminales (consulte la línea 24 en la Tabla 1-2). Dado que los resultados de la prueba de secuencia cero no están disponibles, el transformador puede considerarse como un transformador de dos devanados con conexión Delta-estrella (Consulte la Sección 2.7) El circuito equivalente homopolar de este transformador depende de si el punto neutro del devanado secundario está conectado a tierra o no. Si se ha conectado a tierra, el circuito equivalente de secuencia cero es solo una impedancia desde la terminal secundaria y es un circuito abierto desde las otras terminales (consulte la línea 24 en la Tabla 1-2). Dado que los resultados de la prueba de secuencia cero no están disponibles, el transformador puede considerarse como un transformador de dos devanados con conexión Delta-estrella (Consulte la Sección 2.7) El circuito equivalente homopolar de este transformador depende de si el punto neutro del devanado secundario está conectado a tierra o no. Si se ha conectado a tierra, el circuito equivalente de secuencia cero es solo una impedancia desde la terminal secundaria y es un circuito abierto desde las otras terminales (consulte la línea 24 en la Tabla 1-2). Dado que los resultados de la prueba de secuencia cero no están disponibles, el transformador puede considerarse como un transformador de dos devanados con conexión Delta-estrella (Consulte la Sección 2.7)

5760 KVA	THREE PHASE	IMP % HV-LV HV-TV LV-TV
65°C RISE	60 HERTZ	ONAN 14.20 27.10 10.66
20000 HV	TRANSFORMER	GAL OIL 1575
900Y/520 LV	TYPE ONAN	MFG SERIAL A-3-5-4581
415 TV, 1KVA		CUST SERIAL
		INST BOOK CT-8322
BASIC IMPULSE LEVEL: HV 150 KV, LV 45 KV, TV 45KV		

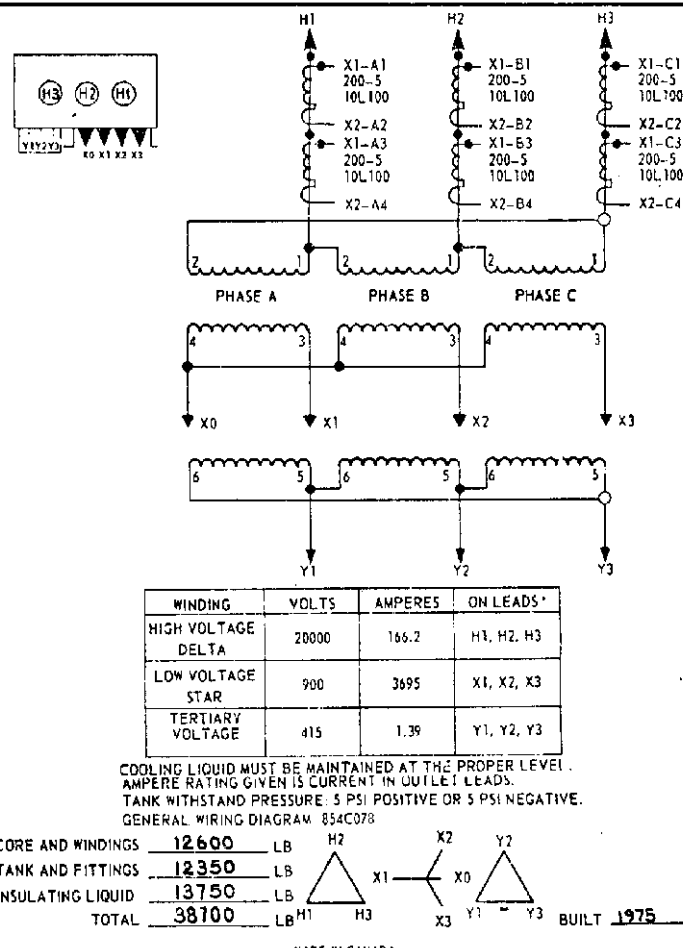


Figura 3-16- Placa de identificación del transformador, sin resultados de prueba para este transformador

3.8 Autotransformadores de Tres Devanados: Autotransformadores con Devanado Terciario (E-estrella con Delta Terciario)

Los autotransformadores de potencia suelen tener un devanado terciario conectado en delta para reducir la tensión del tercer armónico y permitir la transformación de cargas trifásicas desequilibradas. La figura 3-17 muestra el diagrama esquemático del transformador, la representación vectorial, el diagrama vectorial y el diagrama vectorial de desplazamiento de fase de un autotransformador con un devanado terciario conectado en delta.

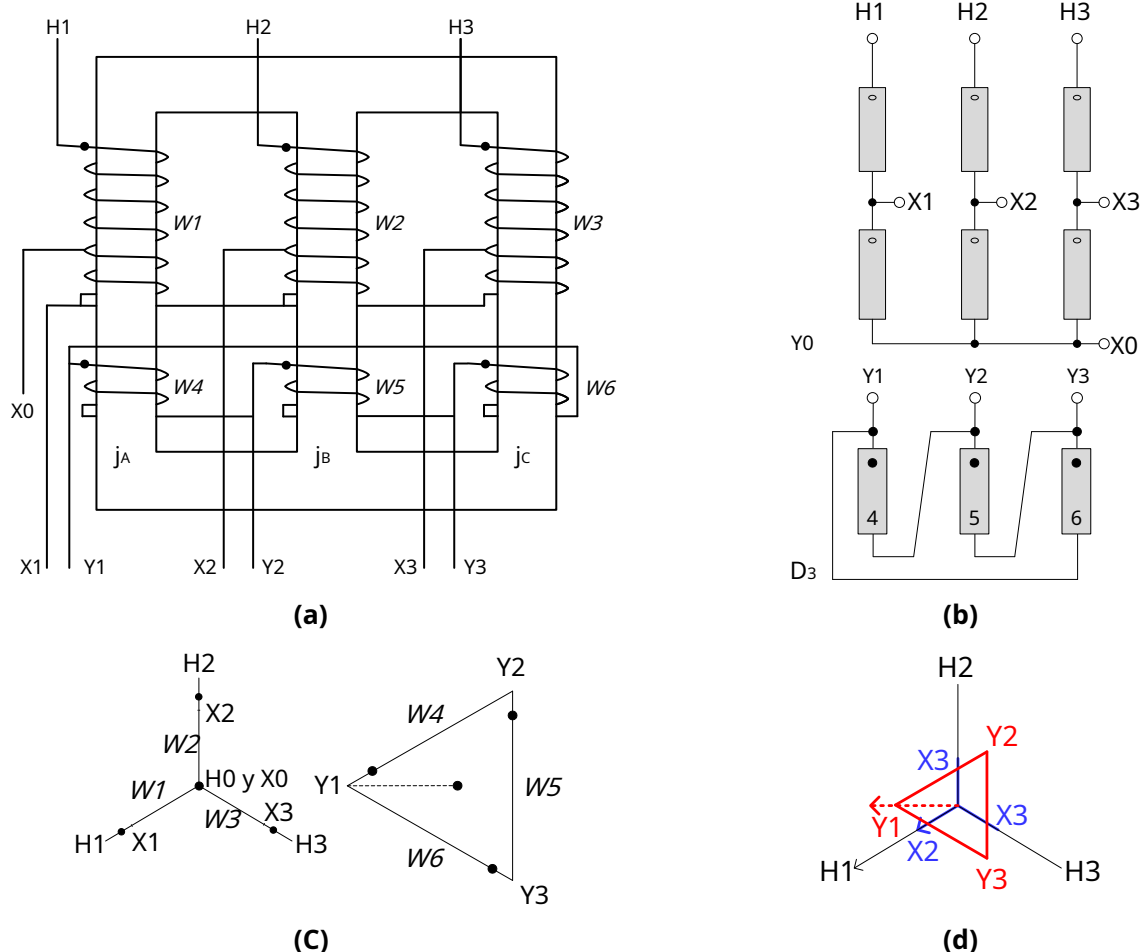


Figura 3-17- Autotransformador con terciario delta: a) Diagrama esquemático del transformador, b) Diagrama de conexión del devanado, c) Diagrama vectorial, d) Diagrama vectorial de desplazamiento de fase

El devanado terciario a veces alimenta la estación con cargas auxiliares o equipos de mejora del factor de potencia. Si no se requiere cargar el devanado terciario, no se deben sacar los terminales del devanado. Sin embargo, se puede sacar una "esquina" del delta para que se pueda conectar a tierra si esto proporcionará una ruta de corriente a tierra durante las fallas a tierra. Otra alternativa es sacar los "extremos" de dos devanados y hacer la esquina del delta fuera del tanque. Esta disposición permite medir la resistencia del delta durante el mantenimiento [10].

3.8.1 Autotransformador con Devanado Terciario Conectado en Delta: Modelo Genérico de Secuencia Positiva y Negativa

El modelo genérico de un autotransformador con devanado terciario conectado en delta para secuencia positiva y negativa es similar al de un transformador monofásico de tres devanados, como se muestra en la Figura 3-3.

3.8.2 Autotransformador con devanado terciario conectado en triángulo: procedimiento para determinar los parámetros del modelo genérico

El procedimiento para modelar un autotransformador con un devanado terciario conectado en delta en secuencia positiva o negativa es el mismo que el procedimiento del transformador monofásico descrito en la Sección 3.2.4, excepto que se debe determinar la secuencia cero. La siguiente sección describe cómo se modela el circuito equivalente de secuencia cero de un autotransformador con devanado terciario conectado en delta.

3.8.3 Autotransformador con devanado terciario conectado en triángulo: circuito equivalente homopolar

El circuito equivalente de secuencia cero de un autotransformador se describe en la Sección 2.8.3. El punto neutro de los autotransformadores suele estar conectado a tierra sin impedancia de conexión a tierra.

El circuito equivalente de secuencia cero de un autotransformador de tres devanados, como se muestra en la Figura 3-18, es similar al circuito equivalente de secuencia cero de un transformador de tres devanados conectado a tierra conectado en Yyd, excepto por el efecto de la impedancia de puesta a tierra del punto neutro en los parámetros. Como se describe en la Sección 2.8.3, si el punto neutro está puesto a tierra a través de una impedancia de puesta a tierra, esta impedancia aparece como una impedancia $3Z_{HT}$ en el lado de alta tensión de una conexión automática

y como una impedancia negativa $-3Z_{HT}$ en el lado de baja tensión de la autoconexión. los

la impedancia de puesta a tierra también aparece como una impedancia de $3Z_{HT}$ en la serie con devanado terciario cero-secuencia de impedancia. Cuando el neutro no está conectado a tierra, $3Z_{HT}$ y las impedancias de los

La estrella equivalente también se vuelve infinita porque aparentemente no hay caminos para las corrientes de secuencia cero entre los devanados, aunque existe un circuito físico y se puede obtener un equilibrio de amperios-vueltas. El modelo de secuencia cero de un autotransformador de tres devanados también es similar a su modelo de secuencia positiva. Las explicaciones y la ecuación del modelo de secuencia positiva también son válidas para el modelo de secuencia cero.

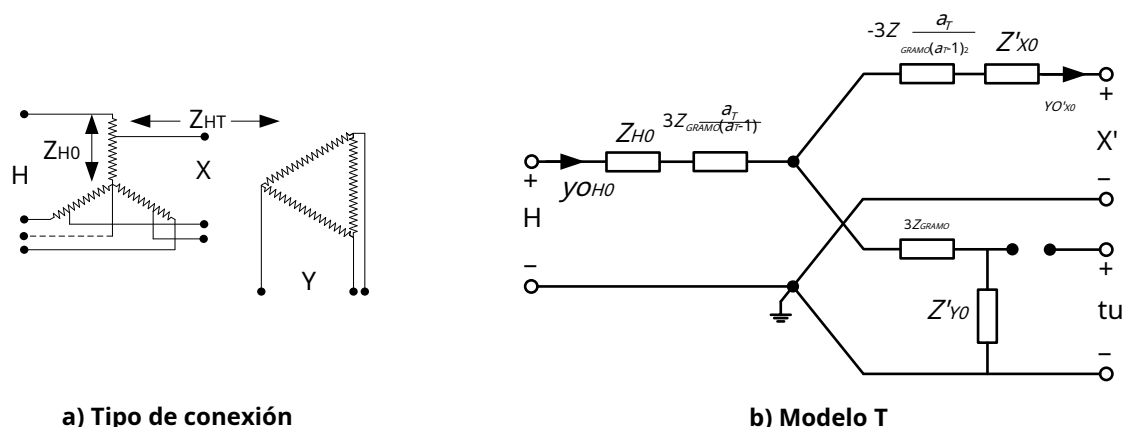


Figura 3-18- Circuitos equivalentes de secuencia cero de un autotransformador con conexión delta terciario

3.8.4 Ejemplo 9: Un Autotransformador Práctico de Tres Devanados, (Autotransformador Conectado Yy con Devanado Terciario en Delta)

La Figura 3-19 muestra la información de la placa de identificación de un autotransformador de tres devanados de 132/72 GRD/4.16 kV, 18.750/25 MVA con devanado terciario conectado en delta. El punto neutro del autotransformador está sólidamente conectado a tierra. El diagrama esquemático y el diagrama vectorial de este tipo de transformador se muestran en la Figura 3-17. La tensión nominal del primario es de 132 kV. Tiene dos cambiadores de tomas bajo carga de 5 pasos en el terminal de punto medio. La Figura 3-20 muestra el informe de prueba del transformador. El devanado terciario no puede cargarse simultáneamente con devanados de baja tensión autoconectados. Por lo tanto, la prueba de pérdidas a plena carga se ha realizado entre terminales de autotransformadores en voltajes nominales mientras que las terminales de los devanados terciarios están en circuito abierto. La información requerida para determinar los parámetros del modelo genérico extraídos del informe de prueba se muestra en la Tabla 3-9.



RECORD OF TRANSFORMER TESTS					
Rating 18750 KVA OUTPUT-55C-ONS-3-60-132/72 KV GRD.Y-4160					
Customer					
r. Notice		S.O.		Reg. No.	
Serial Numbers				Guarantee	
NO-LOAD LOSSES		Volts		4160	
Connection		Amps.		10.1	
13200-(4160)		K.W.		21.55	
		Temp. °C.		75	
LOAD LOSSES		Volts		3532 = 4.91%	
Connection		Amps.		150	
13200-(72000)		K.W.		48.46	
		TOTAL LOSS AT 75C		70.01	
RESISTANCE		H.V. Conn. 132 KV		2.615	
between terminals		L.V. Conn.		2.125	
at 75° C		Tertiary			
EFFICIENCY		5/4 Load		IMPEDANCE H.V. TO T.V. 11.9 % AT 18750 KVA	
Based On		4/4 Load			
		3/4 Load		IMPEDANCE L.V. TO T.V. 5.4 % AT 18750 KVA	
		2/4 Load			
		1/4 Load			
LL LOAD		100% P.F.		ZERO SEQUENCE IMPEDANCE	
REGULATION at		% P.F.			
				X-T 5.21%	
HEAT RUN		ONS		X-H//T 2.20%	
% Load		100		H-T 10.00%	
Gals. Water per Minute				H-X//T 4.25%	
Hours Run		50			
TEMPERATURE		Idle Oil		25.1	
°C		Water In			
		Water Out			
OIL RISE BY THERMOMETER		39.9			
RISE BY R.M.		H.V. Coils		41.1	
		L.V. Coils		42.7	
		Tertiary			
				55°C	
				55°C	
INSULATION TEST					
H.V. to L.V., Tertiary and Core		34000		Volts 1 Minutes	
L.V. to Tertiary and Core				Volts Minutes	
Tertiary to Core		19000		Volts 1 Minutes	
Induced Voltage 230 KV AT H.V. TERM. Times Normal		7200 CYC.		Minutes	
Date Reported 18 JUNE 64		Certified Correct			
		Approved By			
ON 240					

Figura 3-20- Ejemplo 9: Resultados de la prueba del autotransformador de tres devanados

Tabla 3-9- Información Requerida para Modelar el Transformador del Ejemplo 9

Artículo	Parámetro del transformador	Símbolo	Valores
General			
1	Clasificaciones ONAN del transformador	AMEUEN UNA	18,75 MVA
2	Voltajes de bobinado (primario secundario, ...)	$V_H, V_X, \dots$ $V_{PAGS}, V_S, \dots$ $V_1, V_2, \dots$	132 kV/72 kV/4,16 kV
3	Tipo de conexión	-	Delta+automático
4	Rango de toque	$t_1, t_2, \dots$	$\pm 50\%$
5	Número de pasos de toque	-	10
6	Cuerda con grifo regulable	-	Punto medio automático
7	Ángulo de fase de los devanados	-1, -2, ...	0°, 30°
Resultados de la prueba sin pérdidas de carga			
8	Prueba de pérdidas sin carga MVA	AMEUPrueba de NL	18,75 MVA
9	Pérdidas sin carga	PAGSPaíses Bajos	21,55 kilovatios
10	corriente de excitación	y_{OExc}^*	10.1A Desde Terciario
11	Toque la configuración para la prueba de pérdida sin carga	Drives Bajos	Nominal
Resultados de la prueba de pérdidas de carga			
12	Prueba de pérdida de carga MVA (H a X)	AMEUPrueba SC, ...	18,75 MVA
13	Pérdida de carga	PAGSCAROLINA DEL SUR, PAGSL, HL, ...	48,46 kilovatios
14	impedancia o Voltaje aplicado	$y_{oz}, o Z_{HX}, \dots$ $V_{Prueba}(Fase)$	(Máx. 5,21 % a 151,8 kV) 3532 (=4,91 %)
15	Resistencia reactiva	$y_{OX}, o X_{HX}, \dots$	No reportado
dieciséis	Toque la configuración para la prueba de pérdida de carga	TCAROLINA DEL SUR	Nominal
17	Impedancia de secuencia positiva entre devanados de par	HX, HY, XY @MVA	4,91%, 11,9%, 5,4% @ 18,75MVA
Resultados de la prueba de secuencia cero			
18	Resultados de la prueba de circuito abierto de secuencia cero	Z_1, Z_2	-
19	Resultados de la prueba de cortocircuito de secuencia cero	$XY, XH Y$ $HY, HX Y$	5,21%, 5,20% 10,00%, 4,25% (supuesto @ 18.75MVA)
20	Parámetros del modelo T de secuencia cero	$Z_{H0}, Z'_{X0} Z_{M0}$ para el modelo T	-
21	Configuración de puesta a tierra	sólidamente conectado a tierra	0 ohmios
22	Impedancia de puesta a tierra	$Z_{GH}, Z_{GX}, \dots$	-

Tabla 3-10- Ejemplo 9: Parámetros del Modelo Genérico del Transformador

Escribe	Parámetros en Por Unidad	Parámetros en Unidades SI ¹
Prueba de pérdidas de carga equivalente impedancia	$\frac{\frac{P_{load}}{S_{base}}}{\frac{V_{load}^2}{V_{base}^2}}$ PU	Verificación: (En el informe es 4.91%) entonces
Fuga de devanados impedancia		
Rama magnetizante entrada	$\frac{P_{magnetizing}}{S_{base}}$ PU	$\frac{P_{magnetizing}}{S_{base}}$
Pérdidas sin carga equivalente conductancia	$\frac{P_{no-load}}{S_{base}}$ PU	$\frac{P_{no-load}}{S_{base}}$
Rama magnetizante susceptancia	$b - y_2 \sqrt{\text{gramo}_2} - 0.00662 \text{ PU}$	$B_H - Y_2 \sqrt{\frac{1}{H - GRAMO_H}}^2 - 7.124 \text{ mi-6U}$
secuencia cero parámetros	Verificación: @ primario	

4 Determinación de los parámetros de baja frecuencia de transformadores de cuatro devanados

Los transformadores de devanados múltiples con más de dos devanados acoplados al mismo núcleo se utilizan en sistemas de distribución y energía para una variedad de propósitos. En algunos casos, como la interconexión de tres o más circuitos con diferentes voltajes o el aislamiento de dos o más circuitos secundarios, un transformador de devanados múltiples puede ser menos costoso y más eficiente que varios transformadores de dos devanados. El uso de transformadores de devanados múltiples se analiza en las Secciones 1.11 y 3.1. Los transformadores de cuatro devanados se utilizan solo como transformadores rectificadores o (a veces) en sistemas SVC o Statcom.

Un transformador de cuatro devanados acoplado al mismo núcleo es un tipo especial de transformador de devanados múltiples. No se usa comúnmente debido a la interdependencia de la regulación de voltaje de cada devanado con la carga en los otros devanados. A veces se prefiere un transformador de cuatro devanados a dos transformadores individuales. El devanado cuaternario (cuarto) generalmente desempeña el papel de un devanado terciario conectado en triángulo cuando está conectado en triángulo. También podría alimentar algunas cargas auxiliares en la subestación.

La figura 4-1 muestra el diagrama esquemático de un transformador de cuatro devanados enrollado alrededor de un núcleo. En los transformadores trifásicos, cuatro devanados de cada fase están enrollados alrededor de la misma pata. En los transformadores de devanados múltiples no es común etiquetar un devanado como primario, secundario, etc., pero dicho etiquetado ayuda a distinguir entre los devanados. La clasificación de MVA de un devanado de alto voltaje suele ser más alta que la clasificación de MVA de otros devanados; por lo tanto, convencionalmente se le llama primario. Los devanados secundario y terciario (tercero) generalmente tienen la misma clasificación de MVA, que puede ser la mitad de la clasificación de MVA del devanado primario. Por lo tanto, en la práctica, los devanados primario y secundario pueden conocerse, respectivamente, como primer secundario y segundo secundario. En esta guía,

Para un transformador de cuatro devanados las condiciones ideales son:

$$P_1 = P_2 = P_3 = P_4$$

La ecuación anterior significa que la potencia neta en un transformador ideal de cuatro devanados es cero.

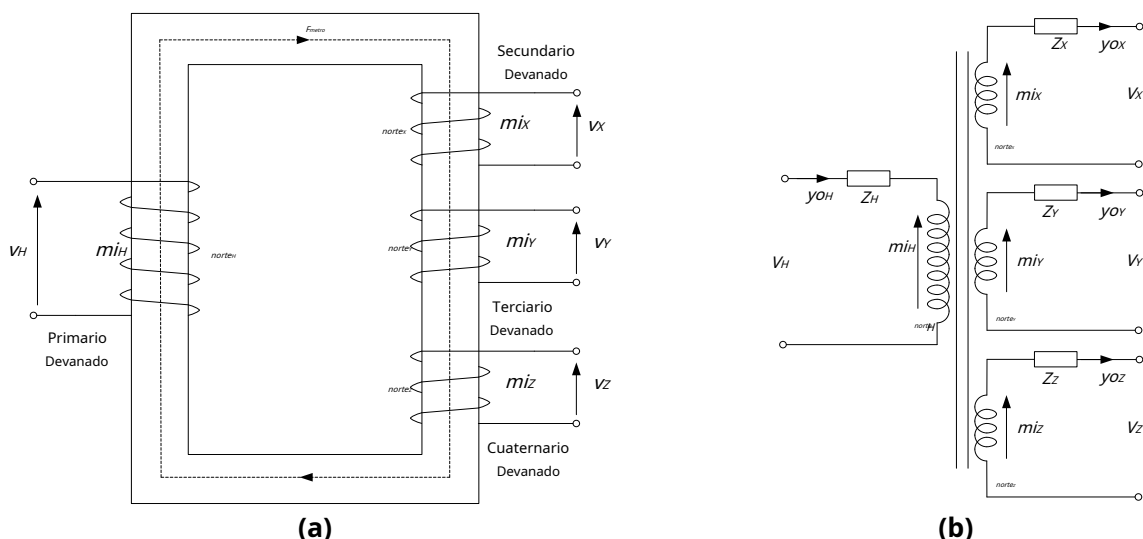


Figura 4-1- Diagramas esquemáticos de un transformador monofásico con cuatro devanados: a) Diagrama de devanados, b) Diagrama eléctrico

4.1 El circuito equivalente para un transformador de cuatro devanados

El circuito equivalente para un transformador de cuatro devanados es más complicado que el de un transformador de tres devanados e involucra un circuito complejo de seis impedancias diferentes. En los últimos años, se han propuesto varios enfoques de modelado para caracterizar el comportamiento de los devanados de transformadores y su dependencia de los efectos de frecuencia y geometría. En esta guía, solo se describe un modelo, el circuito equivalente del modelo π .

4.1.1 Circuito equivalente de secuencia positiva para un transformador de cuatro devanados

Un transformador de devanado N se puede modelar en operaciones de baja frecuencia (modelo no transitorio) como un circuito de elementos lineales de bucle N acoplado electromagnéticamente a todos los demás bucles. Debido al modelado de baja frecuencia, se desprecian las capacidades de los devanados. El circuito equivalente del modelo T de un transformador de múltiples devanados con N devanados se muestra en la Figura 3-2. Cuando hay más de tres devanados (circuitos), los transformadores no pueden, en general, ser representados por un circuito puro equivalente en estrella o malla. El circuito equivalente debe tener enlaces de impedancia independientes. Por lo tanto, el circuito equivalente del modelo T no se considera para transformadores de cuatro devanados. El circuito equivalente del modelo π de un transformador de cuatro devanados se muestra en la Figura 4-2-a y la Figura 4-2-b con y sin magnetización, respectivamente. El circuito equivalente aproximado se puede obtener si se desprecia la rama magnetizante. Este modelo, conocido como modelo de voladizo extendido (ECM), se muestra en la Figura 4-2-b [15]. El circuito equivalente presentado en la figura 4-2-a es un modelo sobredeterminado que se usa solo en casos especiales.

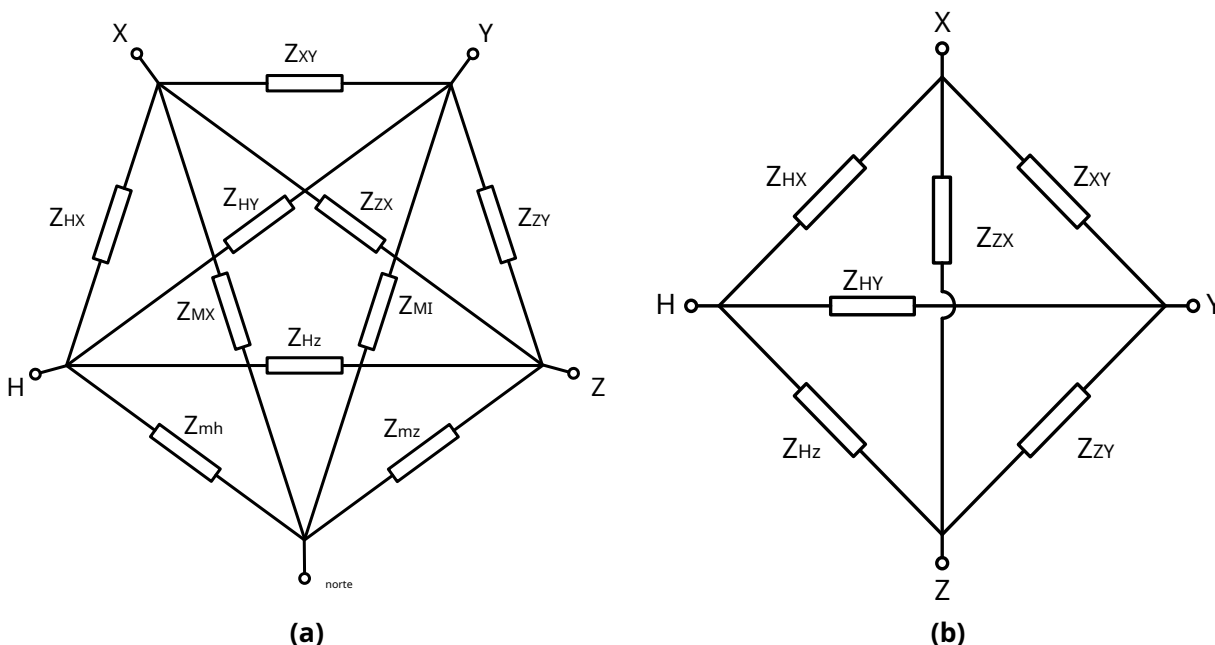


Figura 4-2- El circuito equivalente modelo π de una fase de un transformador de cuatro devanados: a) Con rama magnetizadora, b) Sin rama magnetizadora (Modelo voladizo extendido)

Como se mencionó en la Sección 3, los parámetros del circuito equivalente de los transformadores de múltiples devanados se pueden extraer de las mediciones de prueba de cortocircuito entre diferentes pares de devanados. En la práctica, las impedancias medidas entre todos los pares de devanados se informan con base en la clasificación de MVA más baja de los dos devanados porque la prueba de cortocircuito se realiza en la clasificación de MVA a plena carga del devanado. Se debe realizar la prueba de pérdidas a plena carga de un transformador y los resultados se deben informar en el informe resumido de la prueba. Si el valor nominal de MVA del primario es la suma de los valores nominales de MVA del secundario y del terciario y si es igual al valor nominal de MVA de ONAN del transformador, en los devanados secundario y terciario los terminales se cortocircuitan mientras el devanado primario está excitado para fluir la corriente nominal en los tres devanados. En este caso, se debe realizar otra prueba de cortocircuito con base en la clasificación de MVA del devanado cuaternario. La Tabla 4-1 enumera ocho pruebas de pérdidas de carga, incluidas seis pruebas entre un par de devanados y dos pruebas de pérdidas de carga completa: una del devanado primario y otra del devanado auxiliar.

Sin embargo, no se tiene en cuenta el efecto de la corriente magnetizante para simplificar el modelo, sino que se puede considerar solo en uno de los terminales del devanado. Por lo general, se considera en el devanado (primario) de alto voltaje y la prueba de pérdidas sin carga asociada se realiza desde el lado de alto voltaje de acuerdo con los estándares de prueba.

El modelo de voladizo extendido que se muestra en la Figura 4-2-b es un modelo más matemático. Sin embargo, este modelo tiene seis impedancias independientes y parece ser un modelo simple y razonable, pero calcular impedancias a partir de mediciones de prueba no es fácil. Algunas impedancias también pueden parecer negativas, que es la principal desventaja de este modelo. La impedancia negativa no se puede explicar en la práctica. Por lo tanto, se ha sugerido otro circuito equivalente para transformadores de cuatro devanados, uno que tiene la ventaja de estar libre de elementos negativos. Este

circuito equivalente tiene ocho elementos, de los cuales sólo seis elementos son significativamente diferentes. Este modelo se muestra en la Figura 4-3.

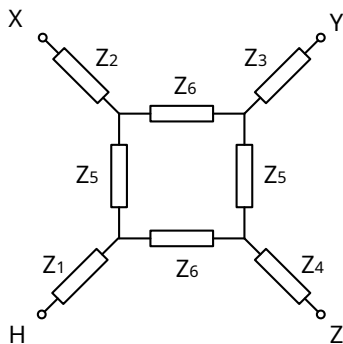


Figura 4-3- Circuito equivalente para transformadores de cuatro devanados

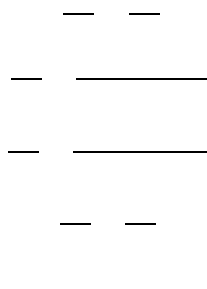
Tabla 4-1- Lista de Pruebas de Pérdidas de Carga para un Transformador de Cuatro Devanados con Equivalente Impedancia (según el circuito equivalente que se muestra en la Figura 4-3)

	Tipo de Carga Prueba de Pérdidas	@MVA Devanado	Medido Impedancia	Impedancia equivalente De acuerdo aFigura 4-3	Estado de los devanados			
					H	X	Y	Z
1 2 3 4 5 6	entre par de devanado	X			T	S	O	O
		Y			T	O	S	O
		Z			T	O	O	S
		Y			O	T	S	O
		Z	*		O	S	O	T
		Z	*		O	O	S	T
7	Carga completa desde H a X e Y	H		(definido a continuación)	T	S	S	O
8	Carga completa desde Z a X e Y	Z	*	(definido ser bajo)	O	S	S	T

T: Emocionado por la prueba S: Cortocircuitado
O: circuito abierto

* Estos deben convertirse al lado de alto voltaje

La Tabla 4-1 muestra seis pruebas de pérdidas de carga realizadas entre seis pares de devanados y dos pruebas de pérdidas de carga completa, una realizada desde el devanado de alto voltaje en la clasificación de MVA del transformador y otra desde el devanado auxiliar en la clasificación de MVA del devanado auxiliar. Las seis impedancias independientes que se muestran en la figura 4-3 se pueden obtener resolviendo las siguientes seis ecuaciones lineales:



en el cual Z_1 , Z_2 y Z_m son impedancias convertidas al lado de alto voltaje. Por lo tanto, la
Las impedancias del circuito equivalente vienen dadas por:



en el cual :

$$Z_1 = R_1 + jX_1$$

Se puede encontrar otra solución, que viene dada por:

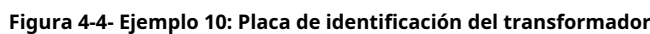


4.1.2 El circuito equivalente de secuencia cero para un transformador de cuatro devanados

El circuito equivalente de secuencia cero de un transformador de cuatro devanados depende del tipo de conexión de los devanados y de la puesta a tierra de los puntos neutros de las conexiones en estrella. En general, los conceptos básicos son similares a los enumerados en la Tabla 1-2 para otros transformadores. Debido a la gran cantidad de tipos de conexión, los circuitos equivalentes de secuencia cero de todos los tipos de conexión posibles de transformadores de cuatro devanados no se presentan en esta sección; sin embargo, los circuitos equivalentes de secuencia cero se presentarán como un ejemplo práctico.

4.2 Ejemplo 10, Transformadores prácticos de cuatro devanados con primario en triángulo, secundario en triángulo, terciario en estrella y cuaternario en estrella

La Figura 4-4 muestra la información de la placa de identificación de un transformador conectado en Ddyy de cuatro devanados de 138/4.7/4.7/13.8 kV, 15 MVA. Cabe señalar que este transformador es un transformador rectificador y que es un caso especial. Los valores nominales del devanado de alta tensión son 15 MVA/138 kV. Los valores nominales de los devanados secundario en triángulo y terciario en estrella son de 7,5 MVA/4,7 kV y suministran una carga de rectificador, y el "cuaternario" de 13,8 kV suministra los servicios de CA locales. Estos circuitos tendrían que ser modelados por separado. Los resultados de la prueba de dos páginas se muestran en la Figura 5-5-a y la Figura 5-5-b. La información requerida para el modelado extraída del informe de prueba se enumera en la Tabla 4-2. El circuito equivalente de secuencia positiva que se muestra en la figura 4-3 se calcula a partir de las fórmulas dadas. Las seis impedancias independientes se dan a continuación a 15 MVA/138 kV. El punto neutro del devanado auxiliar está conectado a tierra. Por lo tanto, la corriente de secuencia cero solo puede fluir en el conjunto de devanados auxiliares y los otros conjuntos de devanados están en circuito abierto para la corriente de secuencia cero, como se muestra en la Figura 4-6.



CUSTOMER :		
RATING :	15 MVA	VOLTAGE 138 KV-4.7KV-4.7KV-13.8KV
REQ No:		CUSTOMER No..
EN No :		SERIAL No....

NO LOAD LOSS AND % EXCITING CURRENT @ 15 MVA

KV APPLIED		Before Ins. Tests				Final Test	
% ER	KV	Loss/KW	Guar.	% I _{ex}	Guar.	Loss/KW	% I _{ex}
80	11.04	11.672		0.102		11.527	0.104
90	12.42	15.211		0.122		15.021	0.121
100	13.80	19.917	22.500	0.204	--	20.333	0.184
105	14.49	23.975		0.323		24.457	0.329
110	15.18	28.256		0.908	--	30.228	0.860

Load Loss

R.A.	MVA	Loss @ Meas. Temp			Loss @ Rated Temp.		
		Wdg.	Meas	Temp.	Calc.	Temp.	Guar.
3	15	H-X&Y	40.15	24.3	45.58	75	48.00
5	15	H-X&Y	41.16	24.3	46.78	75	N/A
1	15	H-X&Y	39.21	24.3	44.47	75	N/A

Figura 4-5-a- Ejemplo 10: Resultados de la prueba del transformador, página 1

 CUSTOMER :
 RATING : 15 MVA VOLTAGE 138 KV-4.7KV-4.7KV-13.8KV
 REQ No: CUSTOMER No..
 EN No : SERIAL No....

⌘ IMPEDANCE

Wdg.	R.A.	MVA	Meas	%IX	%IR	%Iz	Temp.
H-X&Y	3	15	10.37	10.367	0.268	10.371	75.0
H - X	3	7.5	9.33	9.326	0.277	9.330	75.0
H - Y	3	7.5	9.46	9.456	0.269	9.460	75.0
x - Y	3	7.5	16.92	16.909	0.616	16.922	75.0
H - Z	3	5	2.62	2.617	0.132	2.621	75.0
Z-X&Y	3	5	0.74	0.730	0.121	0.744	75.0
Z - X	3	5	3.58	3.573	0.216	3.581	75.0
Z - Y	3	5	3.57	3.564	0.214	3.571	75.0

HEAT RUN :

	MVA	Avg Oil	Top Oil	** Wdg Rise @ Max.Amps			
		Rise *	Rise *	HV	LV (X)	LV (Y)	LV (Z)
ONAN	15	31.4	37.7	34.6	41.9	51.0	33.4
ONAF	N/A						

* TOTAL LOSSES INJECTED INCLUDING EFFECTS OF HARMONICS = 92.9 KW.

** INCLUDING EFFECTS OF HARMONICS

NOISE LEVEL : NOT REQUIRED

Figura 4-5-b- Ejemplo 10: Resultados de la prueba del transformador, página 2

Tabla 4-2- Información requerida para modelar el transformador de cuatro devanados del ejemplo 10

Artículo	Transformador Parámetro	Símbolo	Valores					
General								
			H	X	Y	Z		
1	Transformador ONAN Calificaciones	AMEU _{EN UNA}	15	7.5	7.5	5		
2	Voltajes de bobinado (primario secundario, ...)	V _H , V _X ,...(kV) V PAGS ₁ , V _S ,...(kV) V 1, V ₂ , ...(kV)	138	4.7	4.7	13.8		
3	Tipo de conexión	-	Delta	Delta	Y	Y		
4	Rango de toque	t ₁ , t ₂ , ...	-	-	-	-		
5	Número de pasos de toque	-	-	-	-	-		
6	Bobinado con un grifo ajustable	-	-	-	-	-		
7	Ángulo de fase de los devanados	-1, -2, ...	0°	0°	30°	30°		
Resultados de prueba sin pérdida de carga (entre pares de devanados)								
8	Prueba de pérdida sin carga MVA	AMEU _{Prueba de NL}	15 MVA					
9	Pérdida sin carga	PAGS _{Pruebas Bajos}	19.917 kilovatios					
10	corriente de excitación	y _{0Exc}	0,204 %					
11	Toque la configuración para la prueba de pérdida sin carga	t _{Pruebas Bajos}	No _{terminal}					
Resultados de la prueba de pérdida de carga								
	Entre Par de Devanados		HX	HY	Hz	XY	ZX	ZY
12	Prueba de pérdida de carga MVA	AMEU _{CAROLINA DEL SUR} Prueba _y	7.5	7.5	5	7.5	5	5
13	Impedancia	y _{0z} %	9.33	9.46	2.621	16.922	3.581	3.571
14	Resistencia reactiva	y _{0x} %	9.326	9.456	2.617	16.909	3.573	3.564
15	Resistencia	y _{0r} %	0.277	0.269	0.132	0.616	0.216	0.214
	a plena carga		HX&Y			ZX&Y		
dieciséis	Prueba de pérdida de carga MVA	AMEU _{CAROLINA DEL SUR} Prueba _y	15			5		
17	Impedancia	y _{0z} %	10.371			0.744		
18	Resistencia reactiva	y _{0x} %	10.367			0.730		
19	Resistencia	y _{0r} %	0.268			0.121		
20	Toque la configuración para la prueba de pérdida sin carga	t _{Pruebas Bajos}	Nominal					
Resultados de la prueba de secuencia cero								
La información de secuencia cero no se ha proporcionado en el informe de prueba.								

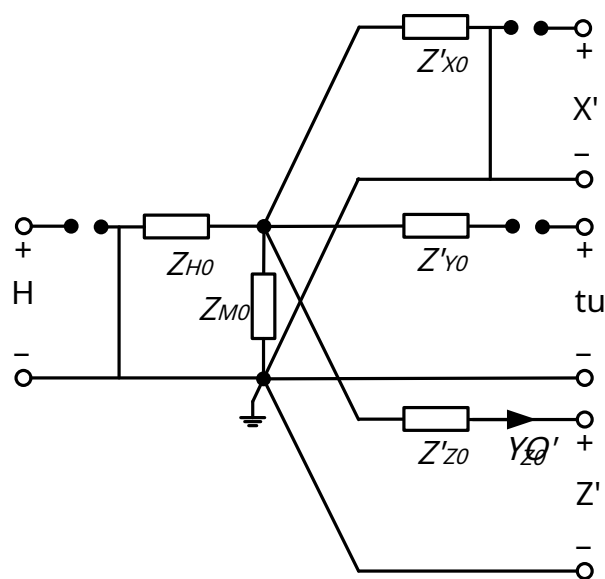


Figura 4-6- El circuito equivalente homopolar del Ejemplo 10

5 transformadores de cambio de fase

5.1 Introducción

Los transformadores de cambio de fase (PST) se pueden utilizar para controlar el flujo de energía activa en una red de transmisión de energía compleja de manera eficiente. Se utilizan para mejorar la estabilidad transitoria de los sistemas de potencia. Pueden ajustar los voltajes y corrientes de entrada en un ángulo usando un cambiador de tomas y operar agregando un $\pm$ Componente de voltaje de 90° al voltaje de entrada. Existen otros métodos para introducir el efecto de un voltaje en cuadratura, como un enlace HVDC; sin embargo, a menos que el tiempo de respuesta sea muy importante, dicho enlace sería más costoso que los transformadores de cambio de fase.

Para transformadores de cambio de fase trifásicos, el voltaje en cuadratura se puede derivar interconectando secciones de devanados de otras fases. Esto se puede lograr de varias maneras, dando lugar a un gran número de configuraciones. En esta guía, solo se considerarán algunas configuraciones comunes. La capacidad de cambio de fase se puede combinar con el control de magnitud de voltaje en el mismo transformador, lo que da como resultado una unidad más compleja que involucra dos juegos de cambiadores de tomas. Esto no se discutirá en esta guía de modelado.

El uso de transformadores de cambio de fase se puede ilustrar considerando una línea de transmisión que transporta una corriente de carga normal en una red interconectada. Un PST puede controlar el flujo de energía a lo largo de la línea de transmisión entre los buses finales de dos líneas. A modo de ejemplo, la opción de utilizar un PST en una red interconectada se finalizó tras compararla con otras opciones como el uso de un enlace HVDC o el uso de condensadores en serie. Como se muestra en la Figura 5-1, una corriente de carga normal determinada por la impedancia de la línea fluye a lo largo de la línea sin operación PST, lo que significa:

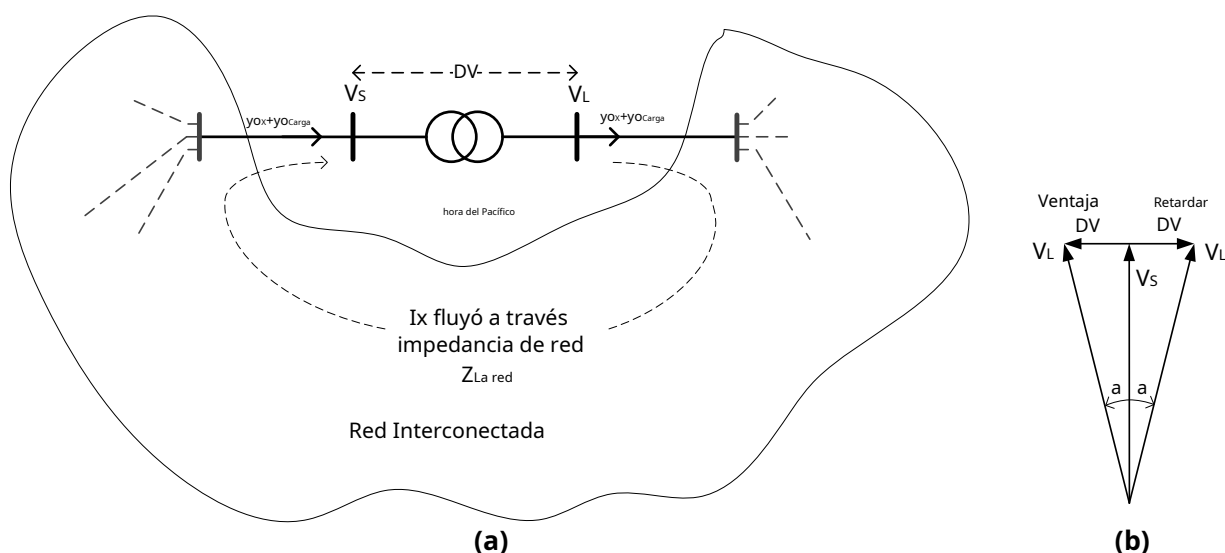


Figura 5-1- Una red interconectada equipada con un transformador desfasador:
a) Red, b) Diagrama vectorial de modos de avance y retardo

El PST proporciona un cambio de fase controlado (avance o retardo) a través de un cambiador de tomas adecuado entre los terminales primario (fuente) y secundario (carga), como se muestra en la Figura 5-1-b. En el modo de avance de fase, el vector de voltaje en la salida del PST se adelanta al vector de voltaje de entrada agregando un voltaje de cuadratura adelantado al voltaje de la fuente. En el modo de retardo de fase, se agrega un voltaje de cuadratura atrasado al voltaje de la fuente para que el vector de voltaje en la salida del PST se retrase con respecto al voltaje de entrada. En ambos casos, una corriente circulante superpuesta a la corriente de carga fluirá alrededor del sistema. Esta corriente circulante es causada por un valor distinto de cero proporcionado por el PST. De este modo:

Dado que la impedancia de la red es en gran parte inductiva, el voltaje tendrá que estar aproximadamente en cuadratura con la corriente circulante. Debido al voltaje en cuadratura, los transformadores de cambio de fase también se denominan transformadores elevadores en cuadratura.

5.2 Configuraciones típicas de transformadores de cambio de fase

Los transformadores de cambio de fase se pueden construir con muchas configuraciones de devanado diferentes, según el voltaje nominal, la potencia de salida y la cantidad de cambio de fase requerida. La cantidad de cambio de fase requerida afecta directamente la clasificación y el tamaño del PST. Actualmente, en la práctica, existen dos tipos de diseños de PST: de un solo núcleo y de dos núcleos. El diseño de un solo núcleo se usa para cambios de fase pequeños y para clasificaciones de voltaje y MVA más bajas. El diseño de dos núcleos se usa normalmente para la transferencia de energía a granel con transformadores de cambio de fase con clasificaciones grandes. Consta de dos transformadores, uno asociado a los terminales de línea y otro asociado al cambiador de tomas.

El PST de diseño de un solo núcleo se puede construir con un devanado de excitación conectado en delta y un devanado de derivación y un OLTC con un interruptor inversor, como se muestra en la Figura 5-2. En esta configuración, que se denomina conexión delta asimétrica, los devanados de regulación están enrollados en la misma rama central que el devanado de excitación. El cambio de fase entre las terminales de la fuente (S) y la carga (L) se logra conectando el devanado regulador, como se muestra en la Figura 5-2. Su voltaje está en fase con el del devanado de excitación entre los otros dos terminales de fase. Las magnitudes de voltaje de los terminales S y L son iguales en condiciones sin carga. Los diagramas vectoriales muestran el avance de cambio de fase obtenido para el voltaje terminal de carga con respecto al voltaje terminal fuente. Normalmente, este cambio de fase se puede variar durante la operación en pasos definidos por el cambiador de tomas OLTC. El retardo de fase se puede lograr, al igual que el avance de fase, si se cambia el interruptor de inversión.

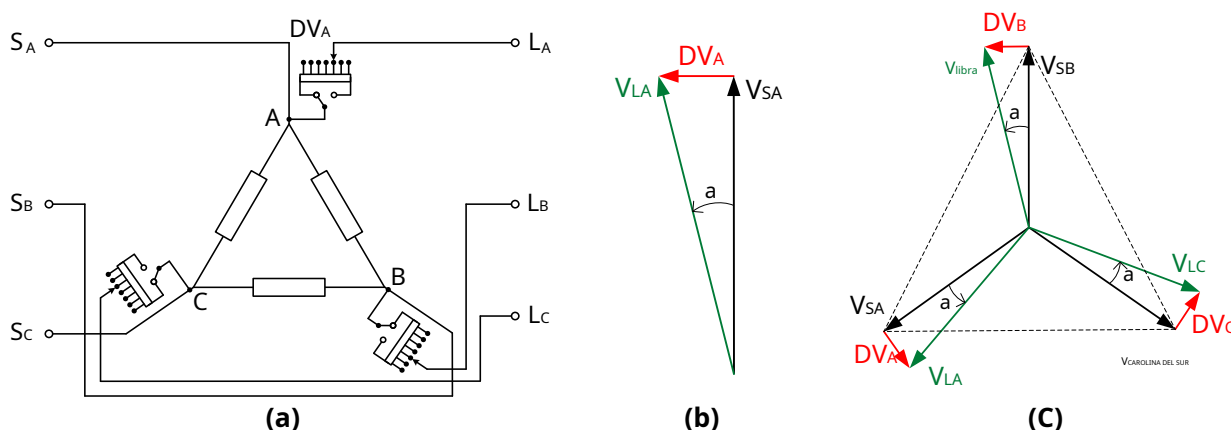


Figura 5-2- Configuración delta asimétrica PST: a) Diagrama esquemático, b) Monofásico diagrama vectorial, c) Diagrama vectorial trifásico

La configuración conectada en delta también se puede construir con dos devanados de derivación y un OLTC en cada fase sin un interruptor inversor, como se muestra en la Figura 5-3. Bajo la condición sin carga, las magnitudes de voltaje en la fuente y en las terminales de carga son iguales. Esta configuración se conoce como conexión delta estándar. El principal problema con el diseño de un solo núcleo es que el cambiador de tomas funciona con voltaje de línea y, por lo tanto, es costoso.

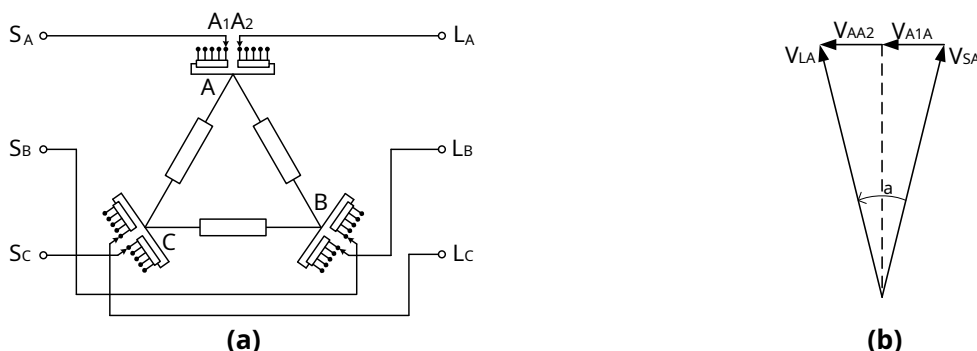


Figura 5-3- Configuración delta simétrica PST: a) Diagrama esquemático, b) Monofásico diagrama vectorial

La configuración de PST de un solo núcleo que se muestra en la Figura 5-4 tiene un OLTC con regulación lineal y sin interruptor inversor; este tipo se conoce como PST delta-hexagonal. En esta configuración, el devanado de regulación está enrollado en la misma rama central que el devanado de excitación principal. El devanado regulador de la Fase A se encuentra entre las Fases B y C, y produce un desfase (retardo), como se muestra en la figura.

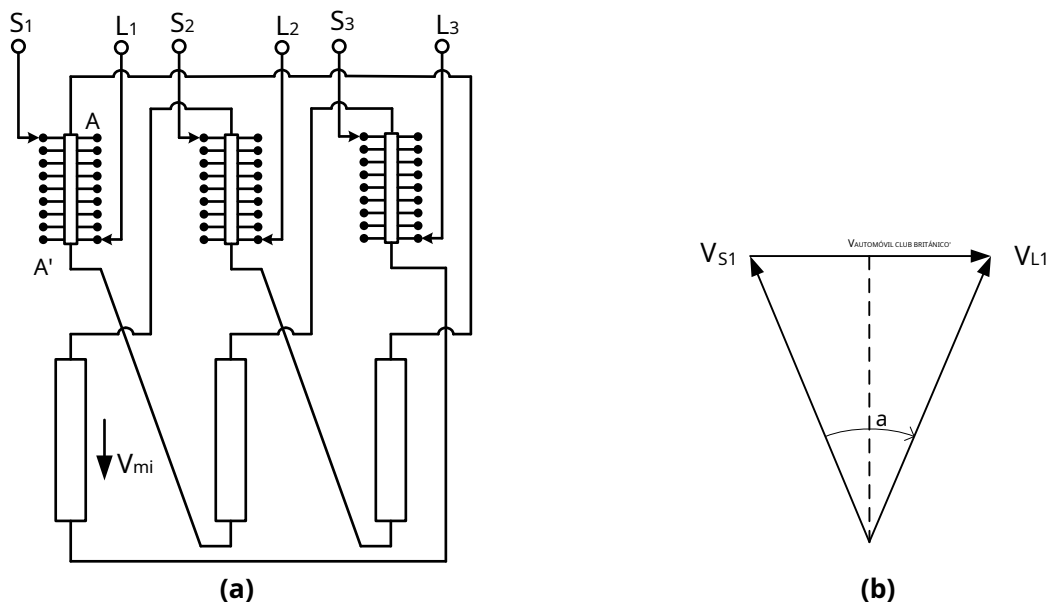


Figura 5-4- Configuración Delta-Hexagonal PST: a) Diagrama esquemático, b) Monofásico diagrama vectorial

Las dos configuraciones del PST de diseño de un solo núcleo discutidas anteriormente son casos de regulación de final de línea. El cambiador de tomas y el devanado de regulación (tomas) están directamente expuestos a perturbaciones del sistema (sobretensiones y corrientes de cortocircuito); por lo tanto, el costo del OLTC aumenta. Es posible que sea necesario conectar impedancias adicionales a los terminales del lado de la carga para proteger el cambiador de tomas de las corrientes de cortocircuito porque no hay impedancia del transformador presente en un ángulo de fase de cero. En el caso de un OLTC con interruptor inversor, durante la operación del interruptor, el devanado de toma se desconecta momentáneamente del devanado principal. Su potencial está determinado por los potenciales de los devanados adyacentes y las capacidades (entre devanados y entre devanados y tierra). Esto provoca un alto voltaje de recuperación a través de los contactos del cambiador de tomas.

El diseño de dos núcleos se usa normalmente para clasificaciones de PST grandes y una gama más amplia de cambios de ángulo de fase. Como se muestra en la Figura 5-5, el PST de dos núcleos consta básicamente de la unidad en serie y la unidad de excitación con las mismas clasificaciones de MVA en tanques separados para clasificaciones más grandes y voltajes más altos o en el mismo tanque para clasificaciones más pequeñas y voltajes más bajos. El devanado de la unidad en serie entre la fuente y los terminales de carga en cada fase se divide en dos mitades. El devanado principal de la unidad de excitación está conectado al punto de conexión de estos dos devanados divididos. La ventaja de esta disposición es que el devanado de derivación en la unidad de excitación y el devanado aa' en la unidad en serie se pueden diseñar de forma independiente, mientras que los devanados 'AA' y 'BB' forman parte de la red de alta tensión. El nivel de voltaje del devanado del grifo y el '

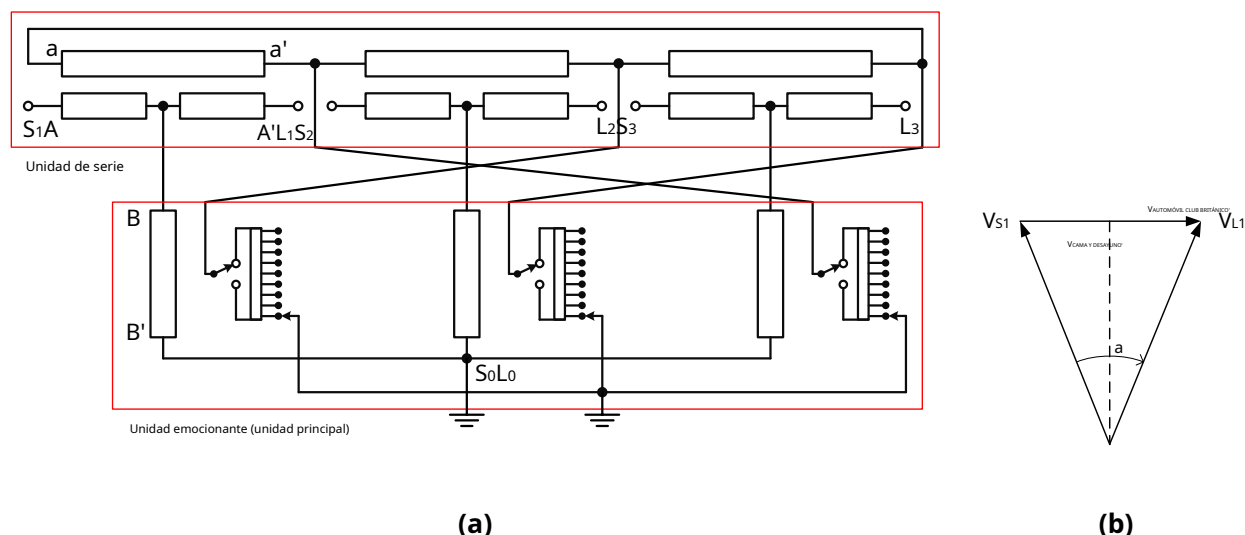


Figura 5-5- Configuración de dos núcleos de un PST: a) Diagrama esquemático, b) Vector monofásico diagrama

5.3 Circuito equivalente de transformador de cambio de fase

La derivación del circuito equivalente para un PST es más compleja que la derivación del circuito equivalente para un transformador normal. Sin embargo, los principios básicos discutidos en las primeras secciones son válidos para el modelado de PST.

Se pueden hacer algunas suposiciones para simplificar el modelo PST:

- La corriente de excitación puede despreciarse, ya que es muy baja en transformadores que utilizan diseños modernos.
- Las fases individuales se pueden modelar en términos de sus impedancias de fuga.
- Los pasos del ángulo de fase pueden no ser iguales en diferentes posiciones de derivación; sin embargo, para el flujo de potencia y los estudios de estabilidad transitoria se suele suponer el mismo tamaño de paso.
- Se elige la interconexión adecuada para producir un cambio de fase positivo en una configuración de derivación positiva.
- Los circuitos de secuencia negativa tienen el cambio de fase opuesto en relación con los circuitos de secuencia positiva porque intercambiar dos fases en sistemas trifásicos es equivalente a ingresar un conjunto de voltajes de secuencia negativa. Por lo tanto, al intercambiar dos fases se produce un cambio de fase negativo en una configuración de derivación positiva.
- Debido a las diferencias en las bases por unidad para las cantidades de entrada y devanado, las cantidades por unidad no son tan convenientes en este análisis. La mayor parte del cálculo descrito aquí se lleva a cabo en términos de impedancias en ohmios. Sin embargo, se expresará la impedancia equivalente por unidad basada en la clasificación de MVA de los devanados, que se supone que es constante.
- Dado que las cantidades de salida se giran en sentido contrario a las agujas del reloj en un diagrama vectorial en relación con las cantidades de entrada en un cambio de fase positivo, los voltajes y corrientes de salida se adelantan a los voltajes y corrientes de entrada.

- Los circuitos de secuencia cero tienen cambios de fase cero. Las cantidades de secuencia cero también están todas en fase entre sí.

5.3.1 Transformador de desplazamiento de fase delta estándar

El diagrama de conexión de la figura 5-6 muestra que los devanados con derivaciones están en el mismo núcleo que los devanados paralelos correspondientes en el delta. Los grifos están colocados simétricamente con respecto al punto de contacto en el vértice delta. Esto significa que , y así sucesivamente, para otras fases. También asegura que no haya cambios en la magnitud del voltaje actual o sin carga desde la entrada hasta la salida. Cada fase consta de un devanado paralelo (y opuesto) y dos devanados de derivación con impedancias , y , respectivamente.

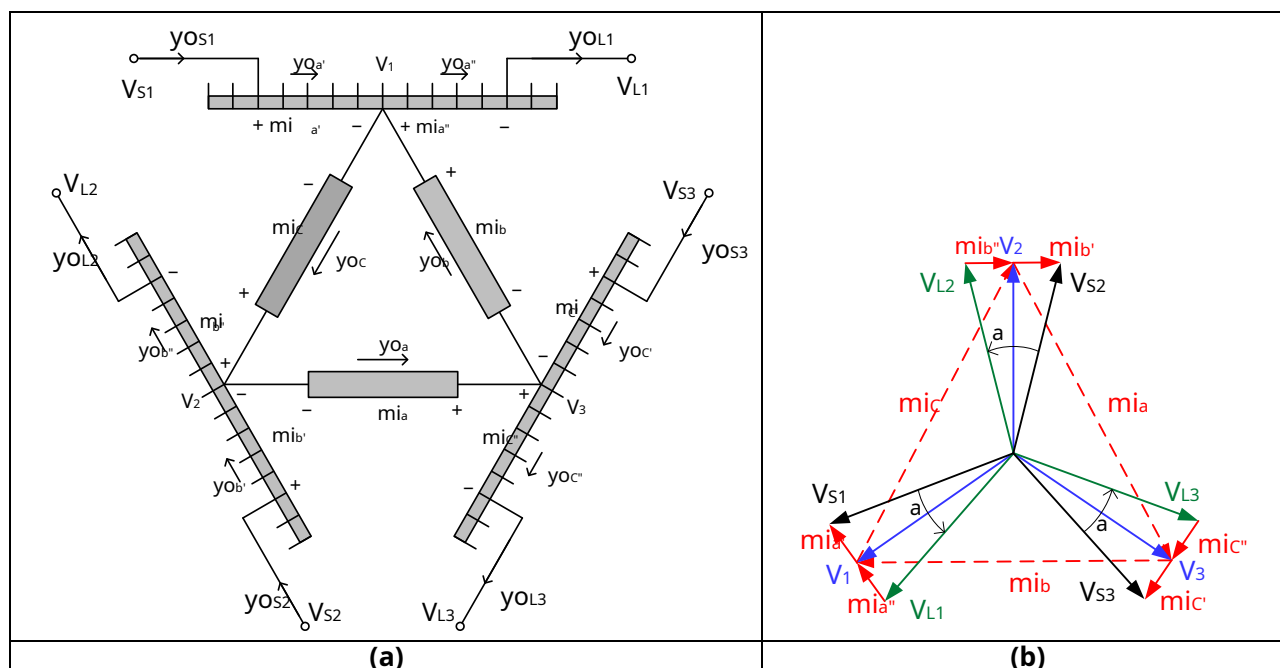


Figura 5-6- Diagrama esquemático de un transformador desfaseador delta estándar: a) Circuito diagrama, b) Diagrama vectorial

5.3.2 Circuito equivalente de secuencia positiva del transformador de desplazamiento de fase delta estándar

Como se muestra en la Figura 5-6-b, los voltajes , y designan el voltaje del fasor en los vértices de conexión delta. Dependiendo de la posición de toma, la cantidad de cambio de fase se da como:

$$\frac{V_L}{V_S} = \frac{m}{m'}$$

donde m es la relación de vueltas y se define como la relación entre las vueltas de uno de los devanados delta y las vueltas de uno de los devanados de derivación.

— —

Ambos devanados de derivación deben tener el mismo número de vueltas. También se puede demostrar que:

en el cual se da como:

—

En términos de un transformador de dos devanados, se da como:

—

Tenga en cuenta que el depende de la relación de vueltas, y con , , así que:

En este caso, la entrada se conecta directamente a la salida y evita las bobinas.

también se puede expresar en términos por unidad. Debido a que la entrada MVA y la base de voltaje son diferente al MVA de entrada y la base de tensión de los devanados, se debe especificar qué base MVA y base de tensión se utilizan. Si se toman las bases terminales son la potencia terminal por fase y la base de tensión de fase. Por lo tanto, la base de corriente nominal de entrada y la base de impedancia se pueden dar como:

—

en el cual es la base de potencia nominal de entrada (clasificación MVA), y es el voltaje nominal de entrada base. Debido a que la relación de transformación es 1:1 en términos de magnitud, los valores base de salida son los mismos que los valores base de entrada. Se supone que la clasificación de MVA de entrada es la base de potencia común para la entrada y para todos los devanados. Por lo tanto, la base de impedancia de dos devanados está relacionada con la base de impedancia de entrada y también con la base de voltaje y la base de voltaje de devanado de la siguiente manera:

— — —
— — —

en el cual y y Y son las bases de impedancia del devanado delta y la derivación bobinados, respectivamente. Por lo tanto en términos por unidad se da como:

$$\frac{V_L}{V_S} = \frac{Y}{y}$$

De acuerdo con las ecuaciones anteriores, el circuito equivalente de secuencia positiva de un transformador de cambio de fase estándar conectado en delta es como se muestra en la Figura 5-7.

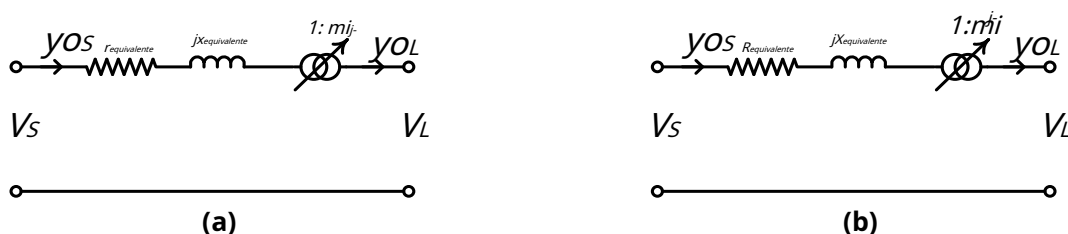


Figura 5-7- El circuito equivalente de secuencia positiva de un transformador desfasador:
a) En pu, b) En valores reales

5.3.3 Circuito equivalente de secuencia negativa de un transformador de desplazamiento de fase delta estándar

El circuito equivalente de secuencia negativa de un transformador de desplazamiento de fase delta estándar se obtiene cambiando a sin cambios del circuito equivalente de secuencia positiva.

5.3.4 Circuito equivalente de secuencia cero del transformador de desplazamiento de fase delta estándar

El circuito equivalente de secuencia cero de un transformador de cambio de fase delta estándar se puede derivar de la figura 5-6 con todos los vectores de voltaje y corriente tomados como secuencia cero. El cambio de fase entre las corrientes de entrada y salida de secuencia cero siempre es cero. El circuito equivalente de secuencia cero de este tipo de PST es solo una impedancia en serie, como se muestra en la figura 5-8.



Figura 5-8- El circuito equivalente homopolar de un transformador desfasador: a) En pu, b) En valores reales

En condiciones de secuencia cero, la impedancia de secuencia cero puede estar dada por:

Y en términos de impedancias de dos devanados, _____ puede ser dado por:

La impedancia de secuencia cero equivalente por unidad viene dada por:

5.3.5 Transformador de desplazamiento de fase de dos núcleos

El diagrama de conexión de un transformador de cambio de fase de dos núcleos se muestra en la Figura 5-9. Las bobinas de entrada y salida son parte de una unidad en serie y están unidas a la unidad excitadora en su punto medio. La unidad en serie utiliza un modelo de tres devanados; mientras que la unidad excitadora utiliza un modelo de dos devanados.

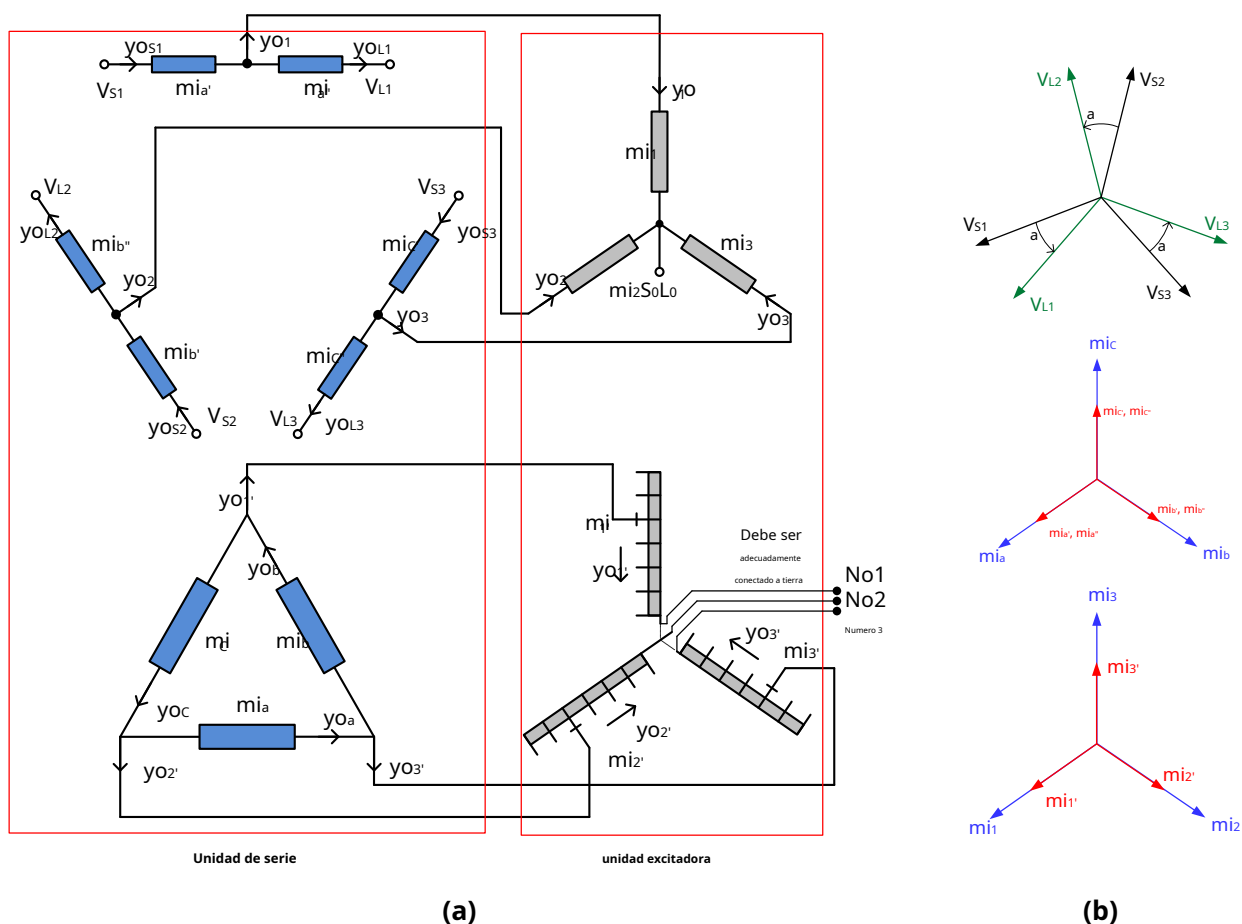


Figura 5-9- Diagrama esquemático de un transformador desfasador de dos núcleos:

a) Diagrama de circuito, b) Diagramas vectoriales

5.3.6 Circuito equivalente de secuencia positiva de un transformador de desplazamiento de fase de dos núcleos

Dependiendo de la posición de toma, la cantidad de cambio de fase se da como:

$$\frac{V_{L1}}{V_{L2}} = \frac{V_{S1}}{V_{S2}}$$

en el que , la relación de espiras de la unidad en serie se define como la relación entre las espiras del devanado delta y las espiras en la primera o la segunda mitad del devanado de entrada-salida. Además, la relación de espiras de la unidad excitadora se define como la relación de espiras en el devanado conectado en estrella conectado al punto medio del devanado de entrada-salida a las espiras en el devanado derivado. La relación de vueltas de la unidad excitadora dependerá de la posición del grifo.

$$\frac{V_{L1}}{V_{L2}} = \frac{V_{S1}}{V_{S2}}$$

La ecuación entre la entrada y la salida de un transformador desfasador es la siguiente:

en el cual _____ para un transformador de desplazamiento de fase de dos núcleos se da como:

En términos de transformador de dos devanados. _____ se da como:

El circuito equivalente de secuencia positiva de un transformador de cambio de fase de dos núcleos es similar al de un transformador de cambio de fase delta estándar, como se muestra en la figura 5-7. Del mismo modo, depende en la excitante relación de espiras del transformador, , y con _____, así que:

En términos por unidad, la base de potencia se supone constante para todos los devanados y entradas. Las definiciones de base de impedancia para todos los devanados, excepto el devanador del cambiador de tomas, son las siguientes:

En el cual, _____, _____, y _____ son las bases de impedancia de los devanados delta, los devanados de entrada-salida y los devanados del excitador, respectivamente. Por lo tanto, se _____ en términos por unidad da como:

El circuito de secuencia negativa tiene la misma impedancia equivalente, pero tiene un cambio de ángulo de fase en la dirección opuesta a la del circuito de secuencia positiva.

La impedancia en serie equivalente del PST que se muestra en la Figura 5-7 es una función de la posición de toma del PST. En consecuencia, varía con el ángulo de cambio de fase. Por lo tanto, el modelado preciso de un PST requiere una tabla que muestre la impedancia equivalente en cada posición de toma y una tabla de impedancia. Esta tabla no es la tabla de corrección de impedancia, pero es similar. El PST es un tipo especial de transformador de potencia, y el fabricante suele proporcionar un informe de prueba completo. Por lo tanto, la impedancia en serie equivalente para todas las posiciones de toma se puede encontrar en el informe de prueba. Incluso si los resultados de la prueba de pérdidas de carga no se informan completamente para todas las posiciones de toma, generalmente se informan para algunas posiciones de toma y la impedancia en serie se puede calcular para esas posiciones de toma. Para el resto de puestos, la impedancia en serie se puede calcular a partir de la interpolación o de métodos simples de ajuste de curvas que se pueden encontrar en programas básicos de ingeniería numérica. Si no es posible definir una impedancia individual para cada posición de toma en el modelo PST, la impedancia equivalente en la posición de toma nominal, que suele ser la posición 17 (), puede ser asumido para todas las condiciones de operación del transformador.

5.3.7 Circuito equivalente de secuencia negativa de un transformador de desplazamiento de fase de dos núcleos

El circuito equivalente de secuencia negativa de un transformador de desplazamiento de fase de dos núcleos se obtiene cambiando a sin cambios del circuito equivalente de secuencia positiva.

5.3.8 Circuito equivalente de secuencia cero del transformador de desplazamiento de fase delta estándar

Un transformador de cambio de fase no puede proporcionar cambio de fase bajo excitación de secuencia cero. Por lo tanto, el cambio de fase entre la entrada de secuencia cero y las corrientes de salida siempre es cero. El circuito equivalente de secuencia cero de un transformador de desplazamiento de fase de dos núcleos se puede derivar de la figura 5-9 tomando todos los vectores de voltaje y corriente como secuencia cero. Como se muestra en la figura 5-8, el circuito equivalente de secuencia cero de un PST es solo una impedancia en serie.

5.4 Ejemplo 11: Transformador de desplazamiento de fase práctico

La Figura 5-10 muestra la información de la placa de identificación de un transformador de cambio de fase de dos núcleos de 260000/GRDY/150111 V, 360/480/600 MVA. Tiene un cambiador de tomas bajo carga de 32 pasos que puede proporcionar un cambio de fase de $\pm 25,1^\circ$ entre la entrada y la salida. La información requerida para el modelado extraída de un informe de prueba de más de doscientas páginas se muestra en la Figura 5-11-a a la Figura 5-11-i. Como se mencionó anteriormente, un transformador PST se modela como una impedancia en serie y como un transformador ideal con una relación de vueltas unitaria y compleja. De manera similar a los transformadores de potencia regulares, también se puede considerar una rama de magnetización constante en un circuito equivalente de PST basado en mediciones de prueba sin carga.



Test Report

Page: 2 of 29

Test result table:

No.	Test item	Guaranteed value	Measuring value	Uncertainty	Result
1	Measurement of phase-angle and voltage ratio (Routine test)	Measured value should be provided	/	/	Provided
2	Measurement of turns ratio (Routine test)	Measured value should be provided	/	/	Provided
3	Measurement of winding resistance (Routine test)	Measured value should be provided	/	/	Provided
4	Measurement of insulation resistance (Routine test)	Measured value should be provided	/	/	Provided
5	Measurement of capacitance and power factor of windings (Routine test)	Measured value should be provided	/	/	Provided
6	Measurement of capacitance and power factor of bushings (Other test)	Measured value should be provided	/	/	Provided
7	Measurement of zero-sequence impedance (Other test)	Measured value should be provided		/	Provided
8	Measurement of short-circuit impedance and load loss (Routine test)	H.V.-L.V. Short-circuit impedance(%): Tap1 $\leq$ 15 Tap17 $\leq$ 10 Tap33 $\leq$ 15 Load loss(kW): Tap1 $<$ 1250 Tap33 $<$ 1250	13.63 8.85 13.64 1200 1203	/	OK

Figura 5-11-a- Ejemplo 11: Resultados de la prueba del transformador

Test Report

Page: 3 of 29

Test result table:

No.	Test item	Guaranteed value	Measuring value	Uncertainty	Result
9	Measurement of no-load loss and current (Routine test)	No-load loss (kW): Tap1 <275 Tap33 <275	239.1 238.0	/	OK
10	Temperature rise test (Design test)	Temperature-rise (K) Top oil: ≤ 65 Average winding: ≤ 65	Series T Exciter T 46.2 47.3 H 49.9 48.7 L 51.7 54.8	/	OK
11	Applied voltage test (Routine test)	S0L0 terminal: 50 kV 60s N01-N02-N03 terminal: 50 kV 60s	50 kV 60s 50 kV 60s	/	OK
12	Lightning impulse test (Routine test)	S and L line terminal FW/CW 950/1050 kV S0L0 neuter terminal FW/--- 150/--- kV No1 No2 No3 neuter terminal FW/--- 150/--- kV	The waves are showed on Appendix A	/	OK
13	Switching impulse test (Routine test)	S and L line terminal 790 kV	The waves are showed on Appendix B	/	OK
14	Induced voltage tests and partial discharge measurement (Routine test)	Test frequency ≥ 50Hz $1.7 \times U_m / \sqrt{3}$ Duration: 72s	100 Hz 270 kV 72s	/	OK
		$1.5 \times U_m / \sqrt{3}$ Duration: 60min Partial discharge (pC): ≤ 500	Partial discharge (pC): Tap1 S.W. 10~15; L.W. 10~15; Tap33 S.W. 7~220; L.W. 9~65;	/	OK
15	Measurement of acoustic sound level (Other test)	Sound level dB (A) at 0.3m: ≤ 72 at 2.0m: ≤ 75	69 68	/	OK

Figura 5-11-b- Ejemplo 11: Resultados de la prueba del transformador

Test Report

Page: 5 of 29

1 . Rated value

Serial No.		Numbers of phases	3
Code of product		Rated frequency	60 Hz
Type of product			
Type of cooling	ONAN /ONAF/ ONAF		
Service conditions	Outdoor		

Rated value	S Terminals	L Terminals
Rated capacity (MVA)	600	600
Rated voltage (V)	260000	260000
Rated current (A)	1332.3	1332.3

Performance parameter (Temp.85 °C)		Guarantee value
No-load loss	at maximum phase-angle	<275 kW
Load loss (based on 600MVA)	at maximum phase-angle	<1250 kW
Short-circuit impedance (based on 600MVA)	at maximum phase-angle	≤15%
	at 0° phase-angle	≤10%
Insulation level	S and L terminals SI/LI/AC 790/950/270 kV SoLo neutral terminal LI/AC 150/50kV N neutral terminal LI/AC 150/50kV	

Figura 5-11-c- Ejemplo 11: Resultados de la prueba del transformador

Test Report

Page: 10 of 29

2.3 Measurement of winding resistance

Test date:

Winding		Measured value Ω (30.7°C)			Calibrated value Ω (85°C)		
		Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Series Trans.	H.V.	S1L1	S2L2	S3L3	S1L1	S2L2	S3L3
	/	0.04543	0.04540	0.04545	0.05473	0.05470	0.05476
	L.V.	GF	EH	GH	GF	EH	GH
	/	0.02537	0.02527	0.02524	0.03056	0.03044	0.03041
Winding		Measured value Ω (30.7°C)			Calibrated value Ω (85°C)		
		Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Exciter Trans.	H.V.	M1-SoLo	M2-SoLo	M3-SoLo	M1-SoLo	M2-SoLo	M3-SoLo
	/	0.2433	0.2441	0.2439	0.2931	0.2941	0.2938
	L.V.	H-No1	G-No2	E-No3	H-No1	G-No2	E-No3
	1	0.011426	0.011384	0.011382	0.01377	0.01371	0.01371
	2	0.010814	0.010760	0.010751	0.01303	0.01296	0.01295
	3	0.010083	0.010035	0.010032	0.01215	0.01209	0.01209
	4	0.009464	0.009414	0.009406	0.01140	0.01134	0.01133
	5	0.008736	0.008690	0.008689	0.01052	0.01047	0.01047
	6	0.008116	0.008071	0.008066	0.009778	0.009724	0.009718
	7	0.007394	0.007344	0.007343	0.008908	0.008848	0.008846
	8	0.006777	0.006724	0.006724	0.008165	0.008101	0.008101
	9	0.006055	0.006004	0.006004	0.007295	0.007233	0.007233
	10	0.005438	0.005379	0.005390	0.006551	0.006480	0.006494
	11	0.004718	0.004664	0.004668	0.005684	0.005619	0.005624
	12	0.004104	0.004045	0.004050	0.004944	0.004873	0.004879
	13	0.003385	0.003328	0.003334	0.004078	0.004009	0.004017
	14	0.002769	0.002712	0.002710	0.003336	0.003267	0.003265
	15	0.002051	0.001991	0.001998	0.002471	0.002399	0.002407
	16	0.001441	0.001377	0.001371	0.001736	0.001659	0.001652
	17	0.0005040	0.0004760	0.0005211	0.000607	0.000573	0.000628
	18	0.001387	0.001326	0.001312	0.001671	0.001598	0.001581

Figura 5-11-d- Ejemplo 11: Resultados de la prueba del transformador

Test Report

Page: 11 of 29

Winding		Measured value Ω (30.7℃)			Calibrated value Ω (85℃)		
		Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Exciter Trans.	19	0.002099	0.002040	0.002024	0.002529	0.002458	0.002438
	20	0.002729	0.002669	0.002648	0.003288	0.003215	0.003190
	21	0.003434	0.003380	0.003361	0.004137	0.004072	0.004049
	22	0.004063	0.004007	0.003987	0.004895	0.004827	0.004803
	23	0.004768	0.004713	0.004697	0.005744	0.005678	0.005659
	24	0.005397	0.005342	0.005326	0.006502	0.006436	0.006417
	25	0.006101	0.006049	0.006033	0.007350	0.007288	0.007268
	26	0.006731	0.006674	0.006671	0.008109	0.008041	0.008037
	27	0.007437	0.007384	0.007379	0.008960	0.008896	0.008890
	28	0.008068	0.008015	0.008010	0.009720	0.009656	0.009650
	29	0.008775	0.008722	0.008723	0.01057	0.01051	0.01051
	30	0.009407	0.009356	0.009354	0.01133	0.01127	0.01127
	31	0.010114	0.010060	0.010071	0.01218	0.01212	0.01213
	32	0.010749	0.010695	0.010703	0.01295	0.01288	0.01289
33	0.011453	0.011404	0.011412	0.01380	0.01374	0.01375	
Test instrument: JYR40D transformer winding resistance meter				No.:		No. of certificate:	
				Accuracy: 0.2%			

Winding		Measured value Ω (27.4°C)			Calibrated value Ω (85°C)		
		Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Series Trans. And Exciter Trans.	L.V.	No1-No2	No2-No3	No3-No1	No1-No2	No2-No3	No3-No1
	1	0.03910	0.03907	0.03915	0.04770	0.04766	0.04776
	2	0.03785	0.03783	0.03790	0.04617	0.04615	0.04624
	3	0.03644	0.03641	0.03649	0.04445	0.04442	0.04452
	4	0.03521	0.03518	0.03525	0.04295	0.04292	0.04300
	5	0.03380	0.03376	0.03383	0.04123	0.04118	0.04127
	6	0.03256	0.03253	0.03260	0.03972	0.03968	0.03977
	7	0.03115	0.03111	0.03118	0.03800	0.03795	0.03804
	8	0.02991	0.02987	0.02995	0.03649	0.03644	0.03654
	9	0.02851	0.02846	0.02854	0.03478	0.03472	0.03482

Figura 5-11-e- Ejemplo 11: Resultados de la prueba del transformador

Test Report

Page: 12 of 29

Winding		Measured value Ω (27.4°C)			Calibrated value Ω (85°C)		
		Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Series Trans. And Exciter Trans.	10	0.02726	0.02723	0.02730	0.03326	0.03322	0.03330
	11	0.02585	0.02582	0.02589	0.03154	0.03150	0.03158
	12	0.02462	0.02459	0.02466	0.03003	0.03000	0.03008
	13	0.02322	0.02318	0.02325	0.02833	0.02828	0.02836
	14	0.02200	0.02195	0.02202	0.02684	0.02678	0.02686
	15	0.02060	0.02054	0.02062	0.02513	0.02506	0.02516
	16	0.01935	0.01932	0.01939	0.02361	0.02357	0.02365
	17	0.01755	0.01758	0.01763	0.02141	0.02145	0.02151
	18	0.01926	0.01920	0.01930	0.02350	0.02342	0.02354
	19	0.02067	0.02063	0.02070	0.02522	0.02517	0.02525
	20	0.02191	0.02186	0.02193	0.02673	0.02667	0.02675
	21	0.02332	0.02327	0.02332	0.02845	0.02839	0.02845
	22	0.02455	0.02450	0.02457	0.02995	0.02989	0.02997
	23	0.02595	0.02590	0.02596	0.03166	0.03160	0.03167
	24	0.02719	0.02714	0.02721	0.03317	0.03311	0.03319
	25	0.02860	0.02854	0.02862	0.03489	0.03482	0.03491
	26	0.02982	0.02979	0.02985	0.03638	0.03634	0.03642
	27	0.03123	0.03120	0.03126	0.03810	0.03806	0.03814
	28	0.03246	0.03243	0.03250	0.03960	0.03956	0.03965
	29	0.03388	0.03383	0.03391	0.04133	0.04127	0.04137
	30	0.03511	0.03507	0.03515	0.04283	0.04278	0.04288
	31	0.03652	0.03648	0.03657	0.04455	0.04450	0.04461
	32	0.03777	0.03772	0.03781	0.04608	0.04602	0.04613
	33	0.03917	0.03913	0.03923	0.04778	0.04774	0.04786
Test instrument: JYR40D transformer winding resistance meter				No.:	No. of certificate:		
				Accuracy: 0.2%			

Figura 5-11-f- Ejemplo 11: Resultados de la prueba del transformador

Test Report

Page: 14 of 29

2.6 Measurement of capacitance and power factor of bushings

Test date:

Air Temp. 31 °C

Type No.	Series No.	Phase	Capacitance (pF)	PF(%)
345F028A	09F0348-03	S1	483.7	0.37
	09F0348-02	S2	484.6	0.36
	09F0348-05	S3	482.1	0.39
	09F0348-04	L1	485.9	0.38
	09F0348-01	L2	485.2	0.39
	09F0348-06	L3	484.4	0.37
035F043A	09F0349-04	S0L0	891.1	0.18
035F043A	09F0349-01	No1	888.8	0.19
	09F0349-03	No2	884.6	0.21
	09F0349-02	No3	888.4	0.20
Test instrument: JYC-II dissipation factor measuring system			No.	No. of certificate:
			Accuracy: capacitance: $\pm (1\% \text{ reading} + 2\text{pF})$ $\tan \delta : \pm (1\% \text{ reading} + 0.04\%)$	

2.7 Measurement of zero-sequence impedance

Test date: 2010.07.26

Oil Temp. 31.0 °C

				On Temp.31.0℃	
Tap	Voltage U _T (V)	Current I _T (A)	Power P _T (W)	Zero-sequence impedance per phase Based on 600MVA	
				R+jX(Ω)	Z _K (%)
01	1168	347.6	9468	0.24+j10.1	8.95
17	1144	340.4	8748	0.23+j10.1	8.95
33	1149	341.7	9444	0.24+j10.1	8.95
Test circuit :Applied voltage between S1-S2-S3 and L1-L2-L3					
Calculating equation:					
$Z_k = \frac{3 \times U_T \div I_T}{U_R \div \sqrt{3} \div I_R} \times 100(\%) \qquad R = \frac{3 \times P_T}{I_T^2} \qquad X = \frac{3 \times U_T}{I_T}$					
Remark: U _R =260000V I _R =1332A					
Test instrument: D6100 wide band power analyzer		No.:		No. of certificate	
		Accuracy: ± 0.5%			

Figura 5-11-g- Ejemplo 11: Resultados de la prueba del transformador

Test Report

Page: 15 of 29

2.8 Measurement of short-circuit impedance and load loss

Test date: 2010.07.26

f = 60 Hz

Test date: 2010.07.20									f = 60 Hz	
Winding S to L	Rated voltage (kV)	Measured Current (A)	Short circuit impedance		Load loss					
			(85℃) Calibrated value (%)	(85℃) Guarantee value (%)	(31.0℃) Measured value (kW)	(85℃) Calibrated value (kW)	(85℃) Guarantee value (kW)			
Based on 600 MVA										
Tap	1	260 / 260	1335	13.63	≤15	1064	1200	<1250		
	5	260 / 260	1350	11.66	/	895.5	1004	/		
	9	260 / 260	1339	10.18	/	751.2	837.7	/		
	13	260 / 260	1339	9.21	/	640.2	709.7	/		
	17	260 / 260	1344	8.85	≤10	561.5	615.2	/		
	21	260 / 260	1340	9.20	/	640.9	710.5	/		
	25	260 / 260	1353	10.16	/	752.8	839.3	/		
	29	260 / 260	1328	11.64	/	894.5	1003	/		
	33	260 / 260	1337	13.64	≤15	1068	1203	<1250		
Test instrument: D6100 wide band power analyzer				No.:		No. of certificate:				
				Accuracy: ± 0.5%						

Figura 5-11-h- Ejemplo 11: Resultados de la prueba del transformador

Test Report

Page: 16 of 29

2.9 Measurement of no-load loss and current

Test date: 2010.07.29

 $f = 60 \text{ Hz}$

Test date: 2010.07.27							
Tap	Applied voltage (kV)	Average-voltage (kV)	rms voltage (kV)	No-load Current Based on 600MVA (Amps) (%)		No-load loss (kW)	
						Calibrated value	Guarantee value
After the dielectric test							
1	1.00Ur	60.60	60.66	2.540	0.044	239.1	<275
	1.10Ur	66.68	67.23	3.833	0.067	335.7	/
5	1.00Ur	46.00	45.83	2.930	0.039	187.1	/
	1.10Ur	50.53	50.16	3.865	0.051	243.4	/
9	1.00Ur	30.89	30.80	4.070	0.036	156.5	/
	1.10Ur	33.97	33.94	5.963	0.053	216.2	/
13	1.00Ur	15.53	15.48	7.845	0.035	136.8	/
	1.10Ur	17.05	17.02	11.45	0.051	191.9	/
17	1.00Ur	3.879	3.851	36.61	0.041	125.1	/
	1.10Ur	4.263	4.200	46.61	0.052	161.4	/
21	1.00Ur	15.47	15.42	8.507	0.038	135.3	/
	1.10Ur	17.06	17.03	12.10	0.054	192.1	/
25	1.00Ur	30.85	30.76	4.310	0.038	155.7	/
	1.10Ur	33.92	33.86	5.920	0.053	213.4	/
29	1.00Ur	45.97	45.82	3.030	0.040	186.2	/
	1.10Ur	50.59	50.34	3.925	0.052	245.5	/
33	1.00Ur	60.52	60.58	2.560	0.045	238.0	<275
	1.10Ur	66.66	67.01	3.599	0.063	333.4	/
110% rated voltage at rated frequency is applied to the test terminals of low-voltage winding, successfully hold for 4 hours, with LTC at 33.							
Test instrument: D6100 wide band power analyzer			No.		No. of certificate:		
			Accuracy: ± 0.5%				

Figura 5-11-i- Ejemplo 11: Resultados de la prueba del transformador, página 9

El circuito equivalente de secuencia positiva PST que se muestra en la Figura 5-7 se calcula a partir de las siguientes fórmulas. En la Figura 5-11-h, Sección 2.8, los resultados de la prueba de pérdidas de carga para 9 posiciones de derivación han sido

previsto. De acuerdo con estas medidas, la impedancia en serie equivalente del transformador para cada posición de derivación se calcula como se muestra en la Tabla 5-1. Para las otras posiciones para las que no se han proporcionado los resultados de las pruebas, las impedancias y reactancias aproximadas se pueden calcular a partir de la interpolación. Para ello, se han obtenido dos ecuaciones polinómicas de cuatro órdenes a partir de los métodos de ajuste de curvas para " " y " " que se muestran en la Figura 5-12 y la Figura 5-13 de la siguiente manera:

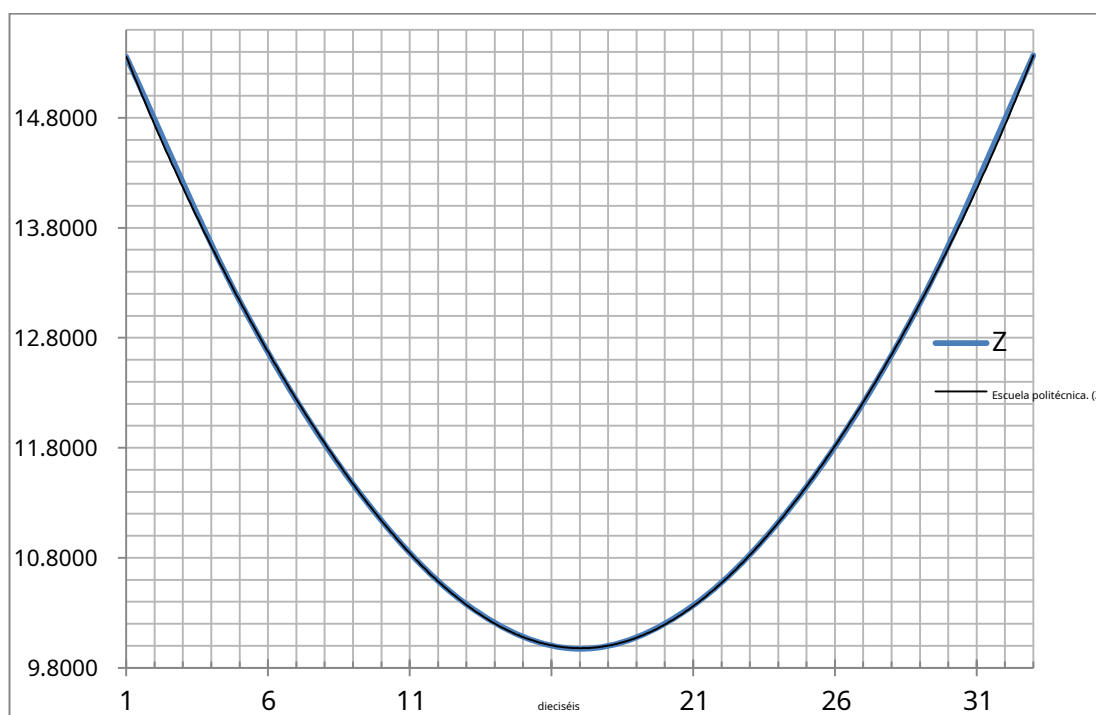


Figura 5-12- Impedancia de la serie PST versus posición de toma

Tabla 5-1- Los parámetros de impedancia de la serie PST calculados a partir de los resultados de la prueba para el
posiciones de toque

Tocar	Iz% ₁ @600 AMEU	PA ₁ S ₁ (kW)	1 YO Prueba	r ₂	z ₃	X ₄	r ₅	z ₆	X ₇	R ₈	Z ₉	X ₁₀
				Pu @600 MVA (Prueba)			PU @360 MVA			-		
1	13.63	1200	1335	0.00200	0.13630	0.13629	0.001200	0.08178	0.08177	0.2253	15.356	15.355
5	11.66	1004	1350	0.00167	0.11660	0.11659	0.001004	0.06996	0.06995	0.1885	13.137	13.136
9	10.18	837.7	1339	0.00140	0.10180	0.10179	0.000838	0.06108	0.06107	0.1573	11.470	11.468
13	9.21	709.7	1339	0.00118	0.09210	0.09209	0.000710	0.05526	0.05526	0.1333	10.377	10.376
17	8.85	615.2	1344	0.00103	0.08850	0.08849	0.000615	0.05310	0.05310	0.1155	9.971	9.9703
21	9.20	710.5	1340	0.00118	0.09200	0.09199	0.000711	0.05520	0.05520	0.1334	10.365	10.364
25	10.16	839.3	1353	0.00140	0.10160	0.10159	0.000839	0.06096	0.06095	0.1576	11.447	11.446
29	11.64	1003	1328	0.00167	0.11640	0.11639	0.001003	0.06984	0.06983	0.1883	13.114	13.113
33	13.64	1203	1337	0.00201	0.13640	0.13639	0.001203	0.08184	0.08183	0.2259	15.368	15.366

- 1: Dado en el informe de prueba,
- 2: suponiendo que _____ después _____
- 3: _____
- 4: _____
- 5: _____
- 6: _____
- 7: _____
- 8: _____ o _____ en el cual _____
- 9: _____
- 10: X _____ o _____

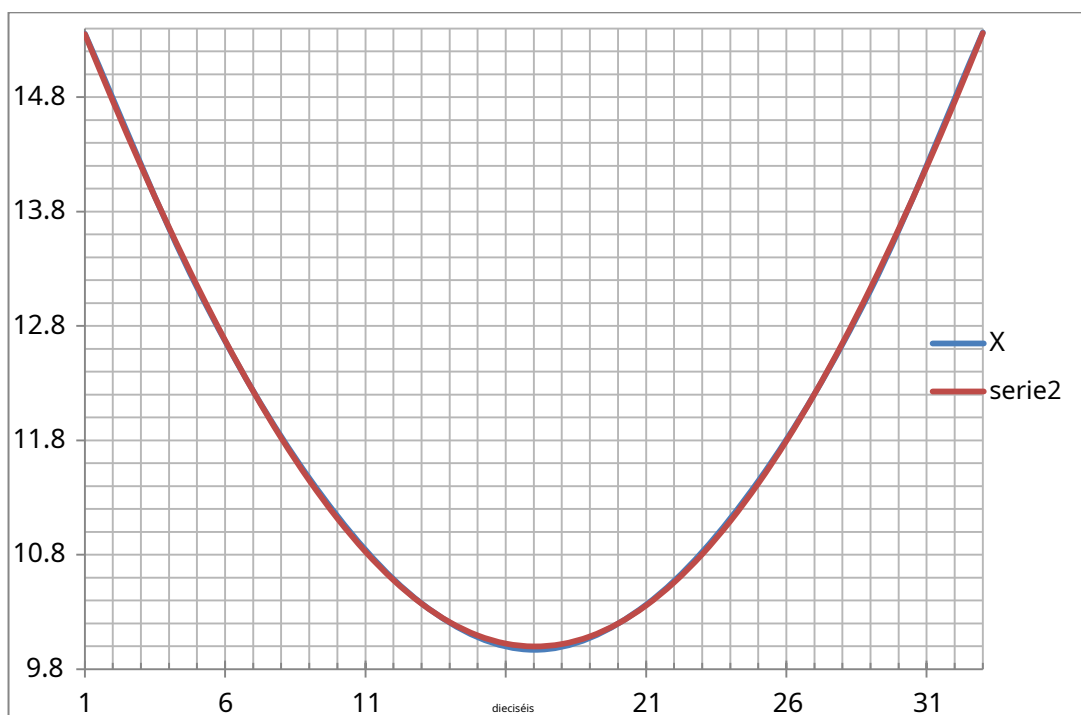


Figura 5-13- La reactancia de la serie PST versus la posición de toma

Los parámetros obtenidos de estas ecuaciones para todas las posiciones de toma se dan en la Tabla 5-2, la tabla de impedancia del transformador de cambio de fase.

Los extremos de los devanados auxiliares, que por lo general salen del transformador como se muestra en la Figura 5-10, están conectados a tierra. Por lo tanto, la corriente de secuencia cero solo puede fluir en el conjunto de devanados auxiliares. Los otros juegos de devanados son de circuito abierto para corriente de secuencia cero, como se muestra en la figura 5-8.

Como se mencionó en la Sección 5.3.8, un transformador de cambio de fase no puede proporcionar cambio de fase bajo excitación de secuencia cero. Por lo tanto, el cambio de fase entre la entrada de secuencia cero y las corrientes de salida siempre es cero. Como se muestra en la figura 5-8, el circuito equivalente de secuencia cero de un PST es solo una impedancia en serie. Esta impedancia ha sido calculada en la Figura 5-11-g, Sección 2.7 del informe de prueba. Es $0.24 + j10.1$.

Tabla 5-2- La tabla de impedancia calculada mediante interpolación para todas las posiciones de toma

Tocar	R [-]	X [-]	Z [-]
1	0.24490	15.35144	15.35339
2	0.23658	14.76326	14.76516
3	0.22789	14.19852	14.20035
4	0.21903	13.66005	13.66181
5	0.21016	13.15052	13.15220
6	0.20144	12.67240	12.67400
7	0.19299	12.22796	12.22948
8	0.18495	11.81927	11.82072
9	0.17743	11.44823	11.44961
10	0.17054	11.11653	11.11784
11	0.16436	10.82568	10.82692
12	0.15900	10.57697	10.57816
13	0.15452	10.37153	10.37268
14	0.15099	10.21028	10.21140
15	0.14846	10.09396	10.09505
dieciséis	0.14698	10.02309	10.02417
17	0.14656	9.99804	9.99911
18	0.14721	10.01893	10.02001
19	0.14893	10.08575	10.08685
20	0.15169	10.19825	10.19938
21	0.15544	10.35601	10.35717
22	0.16015	10.55840	10.55962
23	0.16574	10.80463	10.80590
24	0.17213	11.09368	11.09501
25	0.17926	11.42435	11.42576
26	0.18701	11.79526	11.79675
27	0.19529	12.20483	12.20639
28	0.20400	12.65127	12.65292
29	0.21299	13.13263	13.13436
30	0.22215	13.64673	13.64854
31	0.23132	14.19123	14.19312
32	0.24034	14.76358	14.76554
33	0.24904	15.36104	15.36306

6 Modelo TASMo de Transformadores

6.1 Introducción

TASMo es un modelo de datos que representa los elementos físicos del sistema de transmisión de energía eléctrica. Los datos en TASMo permiten a un analista de sistemas de potencia modelar matemáticamente las características eléctricas de líneas de transmisión, transformadores, máquinas y dispositivos. Esta información se puede utilizar para estudios de sistemas de potencia, como estudios de flujo de carga, estudios de estabilidad y cálculos de cortocircuito. También se puede utilizar para compilar estadísticas sobre el Sistema Eléctrico Interconectado de Alberta (AIES). Puede encontrar más información sobre TASMo en el sitio web de AESO.

La información de TASMo puede ayudar a las empresas a planificar proyectos, identificar oportunidades, evaluar oportunidades y/o competir por proyectos de infraestructura. La conexión a la red de transmisión de energía de Alberta requiere un proceso de conexión que involucra etapas formales y un enfoque cerrado. La AESO supervisa este proceso para garantizar que todos los clientes tengan un acceso abierto y justo. Uno de los documentos requeridos es el Paquete de Actualización de Datos del Proyecto (PDUP). El propósito del PDUP y los formularios de datos complementarios es la estandarización de la presentación de datos de proyectos al Operador del Sistema Eléctrico de Alberta (AESO), lo que mejora los modelos de proyectos publicados en el sitio web de AESO para su uso en estudios de proyectos. Los formularios PDUP están sujetos a cambios en el futuro.

Actualmente, se deben llenar tres formularios PDUP para identificar a los transformadores:

- El formulario Instalaciones y elementos (Figura 6-1), que identifica los elementos que se agregan o modifican
- El formulario Devanados del transformador (Figura 6-2), que identifica los devanados y el aislador del transformador.
- El formulario de impedancia del transformador (Figura 6-3), que identifica las impedancias del transformador

Los datos de los campos en estos tres formularios provienen de varias fuentes, incluida la placa de identificación del transformador y los informes de prueba del transformador, como se discutió en las secciones anteriores. En algunos casos, debido a la falta de información disponible, los datos requeridos se pueden estimar de acuerdo con la Tabla 1-3 en la Sección 1.16. Consulte la Tabla 6-1 y la Tabla 6-2 para obtener información sobre cómo completar el formulario de devanados del transformador y el formulario de impedancias del transformador.

Los parámetros del modelo genérico se han definido con V_{base} y S_{base} igual a la base de tensión del transformador y la base de potencia. Dado que los campos en el formulario Devanados del transformador también se basan en la base de potencia y voltaje del transformador, no se requiere conversión del modelo genérico. Los campos de secuencia positiva y secuencia cero del formulario de impedancia del transformador se basan en el voltaje del sistema y 100 MVA; por lo tanto, es necesario convertir los parámetros del modelo genérico. Para convertir valores del modelo genérico a voltaje del sistema y 100 MVA, use las siguientes ecuaciones:

Donde $V_{\text{genérico}}$ y $S_{\text{genérico}}$ son la base de tensión del transformador y la base de potencia, V_{TASMO} , S_{TASMO} son el voltaje del sistema y 100 MVA, $Z_{\text{genérico}}$ y $Y_{\text{genérico}}$ son los valores de impedancia y admitancia del modelo genérico, y Z_{TASMO} y Y_{TASMO} son los valores de impedancia y admitancia utilizados en el formulario de impedancia del transformador.

Tabla 6-1- Campos de formulario de devanado de transformador

Campo Número	Nombre del campo	Fuente
1	Código de elemento	Este código único para el transformador generalmente contiene el código/nombre de la subestación seguido del identificador del transformador.
2	Número de bobinados	El número de devanados en el transformador.
3	Número de bujes	El número de casquillos en el transformador.
4	Devanado	El código utilizado como referencia cruzada con los bujes y las clasificaciones. Puede ser uno de los siguientes: - P (devanado primario) - S (devanado secundario) - T (casquillo de tensión terciaria)
5	D/A	Indica si el devanado está conectado en una configuración Delta o Wye.
6	TIERRA	Indica si el devanado está puesto a tierra ('Sí') o no puesto a tierra ('No').
7, 8	Puesta a tierra R (Ohm), Conexión a tierra X (Ohm)	La resistencia externa o NGR con la que está conectado a tierra el transformador (expresada en ohmios).
9	Condición de calificación	La condición para la cual la habilitación especificada es válida; es decir, ONAN, ONAF, ONAF2, etc.
10	Calificación (MVA)	La calificación expresada en MVA.
11	¿Instalado? (S/N)	Indica si la calificación es disponible ('Y') o provisional ('N').
12	Cojinete	El identificador de terminación. Puede ser uno de los siguientes: - H (Asociado al devanado primario o barra de alta tensión del transformador) - X (Asociado al devanado secundario o barra de baja tensión del transformador) - Y (Asociado al devanado terciario [energizado o enterrado]) - M (Asociado a la barra de punto medio en el caso de un transformador de tres devanados) - S (Asociado con el devanado del lado de la fuente o el bus de red del transformador regulador de voltaje) - L (Asociado con el devanado del lado de carga o la barra de carga del transformador regulador de voltaje)
13	Autobús	El número del bus al que se conecta el bushing.
14	buje kV	El voltaje nominal del bushing. Puede ser diferente de la tensión nominal del bus al que está conectado.

Campo Número	Nombre del campo	Fuente
15, 16	Toque máximo (pu), toque mínimo (pu)	Los rangos operativos por unidad del transformador al nivel de voltaje para el que está clasificado el aislador.
17	N grifos	El número de cambiadores de tomas en el transformador.
18	toque real	El voltaje de operación nominal por unidad del transformador. Para bushings sin cambiador de tomas el valor será 1.
19	Toque Cambio de estrategia	Este será uno de los siguientes valores: APAGADO, OLTC-M, OLTC-S, OLTC-A, FIJO. - APAGADO indica cambio de toma sin carga. - OLTC-M indica cambio de toma bajo carga (manual-local). - OLTC-S indica cambio de toma bajo carga (supervisión). - OLTC-A indica cambio de toma bajo carga (automático). - Fijo indica grifos fijos.
20	Autobús regulado	El bus remoto destinado a ser controlado por el cambiador de tomas (vacío si no corresponde).
21	buje de control	El casquillo destinado a ser controlado por el cambiador de tomas (vacío si no corresponde).
22, 23	VMAX, VMIN	Para un cambiador de tomas con control de voltaje: el voltaje operativo máximo y mínimo permitido en el bus controlado. Para el cambiador de tomas de cambio de fase: especifique la banda de control como el flujo de energía hacia el aislador. Estos valores deben basarse en el voltaje del sistema y 100 MVA.

Tabla 6-2- Campos de formulario de impedancias de transformador

Campo Número	Nombre del campo	Fuente
1	XFMR	Este es el mismo que el código del elemento en el formulario Devanado del transformador.
2, 3	De autobús, a autobús	Los casquillos de terminación. - H representa el lado alto del primario del transformador. - X representa el lado bajo del secundario del transformador. - Y representa el terciario del transformador. - M representa el bus de punto medio ficticio en el modelado de un transformador de 3 devanados
4	Identificación del circuito	Un identificador de circuito de dos caracteres para el transformador.
5	Base AMEU	La Base MVA asociada con las pérdidas del núcleo y del cobre registradas en los campos 12 al 16.
6, 7	Secuencia positiva y Secuencia cero R, X	Las impedancias real y reactiva de secuencia positiva y secuencia cero para cada ramal en serie en el circuito equivalente expresadas en por unidad sobre una base de 100 MVA y al voltaje nominal del sistema.
8, 9, 10, 11	Secuencia positiva y GFROM de secuencia cero, BFDE, GTO, BTO	Las admitancias a tierra en derivación, real y reactiva, de secuencia positiva y secuencia cero para cada rama de derivación en el circuito equivalente, expresadas en por unidad sobre una base de 100 MVA y al voltaje nominal del sistema.
12	Cortocircuito	Impedancias de cortocircuito expresadas en % de impedancia en una prueba de cortocircuito con pérdida de carga.
13	Pérdida de cobre	Pérdidas de cobre en cortocircuito expresadas en kW en una prueba de cortocircuito.
14	Circuito abierto	Corriente de excitación de circuito abierto expresada en % de corriente de excitación en una prueba de circuito abierto de excitación sin carga.
15	Pérdida de núcleo	Pérdidas en el núcleo en circuito abierto expresadas en kW en una prueba de excitación en circuito abierto sin carga.
dieciséis	Cortocircuito	Impedancias de cortocircuito expresadas en % de impedancia en una prueba de impedancia de secuencia cero.

Power System Modelling: Supplementary Data: Initial Submission Form

Facility

① Facility Code

② Substation Name (if Applicable)

③ Owner

④ Land Location:

⑤ In Service Date:

⑥ Out Service Date:

Elements

⑦ ELEMENT CODE ⑧ Type ⑨ Normally In Service ⑩ Project In: ⑪ Sub Project In: ⑫ Project Out: ⑬ Sub Project Out: ⑭ Element Owner



EMS Package
See Section 7.3

Data submitted in this engineering document represents the electrical system components to a level adequate for powerflow, short-circuit, and dynamic modeling of:

- an operational facility, or
- a project passing gate of the AESO project process, and is subject to change as the project design proceeds and as-built data becomes available.

It is not to be relied upon for construction. APEGA Permit to Practice:

Engineering Stamp Required

Power System Modelling: Supplementary Data: Initial Submission Form

Project

Page

of

Public
R3 - 2012-03-29

Figura 6-1- Formulario de Instalaciones y Elementos

Power System Modelling: Supplementary Data: Initial Submission Form

Transformer Windings

Element Code	Number of Windings	Number of Bushings
Winding	D/Y	GND
Rating Condition	Rating (MVA)	Installed? (Y/N)

Data submitted in this engineering document represents the electrical system components to a level adequate for powerflow, short-circuit, and dynamic modelling of:

- an operational facility, or
- a project passing gate

of the AESO project process, and is subject to change as the project design proceeds and as-built data becomes available.

It is not to be relied upon for construction. APEGA Permit to Practice:

- Transformer Nameplate
- Test Report
- Substation Single Line Diagram
- EMS Package See Section 7.3

Based on Transformer bushing kV and Power Base							Based on System Voltage and 100MVA Base				
Bushing	Bus	Rated kV	Max Tap (pu)	Min Tap (pu)	N Taps	Actual Tap (pu)	Tap Changing Strategy	Regulated Bus	Control Bushing	VMAX (pu)	VMIN (pu)

Power System Modelling: Supplementary Data: Initial Submission Form

Project Page of

Public
R3 - 2012-03-29

Figura 6-2- Formulario Devanados del Transformador

Power System Modelling: Supplementary Data: Initial Submission Form

Transformer Impedance

Date submitted in this engineering document represents the electrical system components to a level adequate for powerflow, short-circuit, and dynamic modeling of:

- an operational facility, or
- a project passing gate ☐

of the AESO project process, and is subject to change as the project design proceeds and as-built data becomes available.

It is not to be relied upon for construction. APEGA Permit to Practice:

Transformer Impedances and Admittances Based on System Voltage and 100MVA Base

	1 XFMR	2 FBS	3 TBS	4 CCT
Positive Sequence				
Zero Sequence				

Based on Test Report

	MVA BASE	SHORT CIRCUIT	COPPER LOSS	OPEN CIRCUIT	CORE LOSS
From 1:					
To 1:					
From 0:					
To 0:					

	XFMR	FBS	TBS	CCT
Positive Sequence				
Zero Sequence				

	MVA BASE	SHORT CIRCUIT	COPPER LOSS	OPEN CIRCUIT	CORE LOSS
From 1:					
To 1:					
From 0:					
To 0:					

	XFMR	FBS	TBS	CCT
Positive Sequence				
Zero Sequence				

	MVA BASE	SHORT CIRCUIT	COPPER LOSS	OPEN CIRCUIT	CORE LOSS
From 1:					
To 1:					
From 0:					
To 0:					

Power System Modelling: Supplementary Data: Initial Submission Form

Project Page of

Public
R3 - 2012-03-29

Figura 6-3- Formulario de impedancia del transformador

6.2 Transformadores de dos devanados

6.2.1 Transformador de dos devanados con primario en estrella y secundario en estrella

Este tipo de transformador requiere que se completen dos formularios de Devanados del transformador y la primera sección del formulario de Impedancia del transformador. Los formularios deben completarse como se muestra en la Tabla 6-3, la Tabla 6-4 y la Tabla 6-5. Los valores de ejemplo provienen del transformador de ejemplo que se encuentra en la Sección 2.4.4. Se han asumido voltajes de barras del sistema de 138 kV y 25 kV para los devanados primario y secundario, respectivamente.

Tabla 6-3- YY Transformador Devanados Forma 1

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Valor de formulario
2	Número de bobinados	Tipo de transformador	2
3	Número de bujes	Tipo de transformador	2
4	Devanado	Datos de devanado primario	PAGS
5	D/A	Tipo de transformador	Y
6	TIERRA	Configuración de puesta a tierra	Y
7	Conexión a tierra R (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
8	Conexión a tierra X (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
9	Condición de calificación	Clasificaciones ONAN del transformador	EN UNA
			ONAF
			ONAF2
10	Calificación (MVA)	Clasificaciones ONAN del transformador	15
			20
			25
11	¿Instalado?	Siempre Y	Y
			Y
			Y
12	Cojinete	Devanado primario tipo transformador	H
14	buje kV	Voltajes de bobinado	138
15	Toque máximo (pu)	Rango de toque	1.1
dieciséis	Toque mínimo	Rango de toque	0.9
17	N grifos	Número de pasos de toque	17

Tabla 6-4- Devanados del transformador YY Forma 2

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Valor de formulario
2	Número de bobinados	Tipo de transformador	2
3	Número de bujes	Tipo de transformador	2
4	Devanado	Datos de devanado secundario	S
5	D/A	Tipo de transformador	Y
6	TIERRA	Configuración de puesta a tierra	Y
7	Conexión a tierra R (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
8	Conexión a tierra X (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
9	Condición de calificación	Clasificaciones ONAN del transformador	EN UNA
			ONAF
			ONAF2
10	Calificación (MVA)	Clasificaciones ONAN del transformador	15
			20
			25
11	¿Instalado?	Siempre Y	Y
			Y
			Y
12	Cojinete	Devanado secundario tipo transformador	X
14	buje kV	Voltajes de bobinado	26.5
15	Toque máximo (pu)	Rango de toque	1
dieciséis	Toque mínimo	Rango de toque	1
17	N grifos	Número de pasos de toque	1

Tabla 6-5- Formulario de impedancia del transformador YY

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Modelo Genérico Valor	Valor de formulario
3	Desde el autobús	buje primario	-	H
4	Al autobús	Buje secundario	-	X
5	Base AMEU	Sin pérdida de carga/Prueba de pérdida de carga MVA	15	15
6	Secuencia positiva R	Pérdidas de carga Resistencia equivalente	0.00278	0.01852
	Secuencia cero R		0.07942	0.52949
7	Secuencia positiva X	Reactancia de fuga de devanados	0.07675	0.51167
	Secuencia cero X		0	0
8	Secuencia positiva GFROM	Conductancia equivalente sin pérdidas de carga	0.00077	0.00012
	GFROM de secuencia cero	_____	0.21931	0.03290
9	Secuencia positiva BFROM	Susceptancia de rama magnetizante	- 0.00090	- 0.00014
	BFROM de secuencia cero	_____	0	0
10	GTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	GTO de secuencia cero	_____	1.92440	0.28869
11	BTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	BTO de secuencia cero	_____	0	0
12	Cortocircuito	Impedancia de prueba de pérdida de carga	7.68	7.68
13	Pérdida de cobre	Pérdida de carga	41.66	41.66
14	Circuito abierto	Corriente de excitación	0.119	0.119
15	Pérdida de núcleo	Pérdida sin carga	11.61	11.61

6.2.2 Transformador de dos devanados con primario en estrella y secundario en triángulo

Este tipo de transformador requiere que se completen dos formularios de Devanados del transformador y la primera sección del formulario de Impedancia del transformador. Los formularios deben ser llenados como se ve en la Tabla 6-6, Tabla 6-7 y Tabla 6-8. Los valores de ejemplo provienen del transformador de ejemplo que se encuentra en la Sección 2.5.4. Se han supuesto tensiones de barras del sistema de 69 kV y 13,8 kV para los devanados primario y secundario, respectivamente.

Tabla 6-6- Devanados de transformador YD Forma 1

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Valor de formulario
2	Número de bobinados	Tipo de transformador	2
3	Número de bujes	Tipo de transformador	2
4	Devanado	Datos de devanado primario	PAGS
5	D/A	Tipo de transformador	Y
6	TIERRA	Configuración de puesta a tierra	Y
7	Conexión a tierra R (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
8	Conexión a tierra X (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0.50
9	Condición de calificación	Clasificaciones ONAN del transformador	EN UNA
			ONAF
			ONAF2
10	Calificación (MVA)	Clasificaciones ONAN del transformador	50
			66
			83
11	¿Instalado?	Siempre Y	Y
			Y
			Y
12	Cojinete	Devanado primario tipo transformador	H
14	buje kV	Voltajes de bobinado	72
15	Toque máximo (pu)	Rango de toque	1.1
dieciséis	Toque mínimo	Rango de toque	0.9
17	N grifos	Número de pasos de toque	17

Tabla 6-7- Devanados de transformador YD Forma 2

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Valor de formulario
2	Número de bobinados	Tipo de transformador	2
3	Número de bujes	Tipo de transformador	2
4	Devanado	Datos de devanado secundario	S
5	D/A	Tipo de transformador	D
6	TIERRA	Configuración de puesta a tierra	norte
7	Conexión a tierra R (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
8	Conexión a tierra X (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
9	Condición de calificación	Clasificaciones ONAN del transformador	EN UNA
			ONAF
			ONAF2
10	Calificación (MVA)	Clasificaciones ONAN del transformador	50
			66
			83
11	¿Instalado?	Siempre Y	Y
			Y
			Y
12	Cojinete	Devanado secundario tipo transformador	X
14	buje kV	Voltajes de bobinado	13.8
15	Toque máximo (pu)	Rango de toque	1
dieciséis	Toque mínimo	Rango de toque	1
17	N grifos	Número de pasos de toque	1

Tabla 6-8- Formulario de impedancia del transformador YD

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Modelo Genérico Valor	Valor de formulario
3	Desde el autobús	buje primario	-	H
4	Al autobús	Buje secundario	-	X
5	Base AMEU	Sin pérdida de carga/Prueba de pérdida de carga MVA	50	50
6	Secuencia positiva R	Pérdidas de carga Resistencia equivalente	0.00192	0.00418
	Secuencia cero R		0	0
7	Secuencia positiva X	Reactancia de fuga de devanados	0.11638	0.25345
	Secuencia cero X		0.11247	0.24493
8	Secuencia positiva GFROM	Conductancia equivalente sin pérdidas de carga	0.000689	0.00032
	GFROM de secuencia cero	No utilizado	-	0
9	Secuencia positiva BFROM	Susceptancia de rama magnetizante	- 0.00058	- 0.00027
	BFROM de secuencia cero	No utilizado	-	0
10	GTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	GTO de secuencia cero	_____	0	0
11	BTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	BTO de secuencia cero	_____	- 207.34	- 95.220
12	Cortocircuito	Impedancia de prueba de pérdida de carga	11.64	11.64
13	Pérdida de cobre	Pérdida de carga	96.014	96.014
14	Circuito abierto	Corriente de excitación	0.09	0.09
15	Pérdida de núcleo	Pérdida sin carga	34.467	34.467

6.2.3 Transformador de dos devanados con triángulo primario triángulo secundario

Este tipo de transformador requiere que se completen dos formularios de Devanados del transformador y la primera sección del formulario de Impedancia del transformador. Los formularios deben completarse como se muestra en la Tabla 6-9, la Tabla 6-10 y la Tabla 6-11. Los valores de ejemplo provienen del transformador de ejemplo que se encuentra en la Sección 2.6.4. Se han supuesto tensiones de barras del sistema de 69 kV y 2,4 kV para los devanados primario y secundario, respectivamente.

Tabla 6-9- Devanados de Transformador DD Forma 1

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Valor de formulario
2	Número de bobinados	Tipo de transformador	2
3	Número de bujes	Tipo de transformador	2
4	Devanado	Datos de devanado primario	PAGS
5	D/A	Tipo de transformador	D
6	TIERRA	Configuración de puesta a tierra	norte
7	Conexión a tierra R (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
8	Conexión a tierra X (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
9	Condición de calificación	Clasificaciones ONAN del transformador	EN UNA
10	Calificación (MVA)	Clasificaciones ONAN del transformador	7.5
11	¿Instalado?	Siempre Y	Y
12	Cojinete	Devanado primario tipo transformador	H
14	buje kV	Voltajes de bobinado	66
15	Toque máximo (pu)	Rango de toque	1.05
dieciséis	Toque mínimo	Rango de toque	0,95
17	N grifos	Número de pasos de toque	5

Tabla 6-10- Devanados de Transformador DD Forma 2

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Valor de formulario
2	Número de bobinados	Tipo de transformador	2
3	Número de bujes	Tipo de transformador	2
4	Devanado	Datos de devanado secundario	S
5	D/A	Tipo de transformador	D
6	TIERRA	Configuración de puesta a tierra	norte
7	Conexión a tierra R (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
8	Conexión a tierra X (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
9	Condición de calificación	Clasificaciones ONAN del transformador	EN UNA
10	Calificación (MVA)	Clasificaciones ONAN del transformador	7.5
11	¿Instalado?	Siempre Y	Y
12	Cojinete	Devanado secundario tipo transformador	X
14	buje kV	Voltajes de bobinado	2.4
15	Toque máximo (pu)	Rango de toque	1
dieciséis	Toque mínimo	Rango de toque	1
17	N grifos	Número de pasos de toque	1

Tabla 6-11- Formulario de impedancia del transformador DD

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Modelo Genérico Valor	Valor de formulario
3	Desde el autobús	buje primario	-	H
4	Al autobús	Buje secundario	-	X
5	Base AMEU	Sin pérdida de carga/Prueba de pérdida de carga MVA	7.5	7.5
6	Secuencia positiva R	Pérdidas de carga Resistencia equivalente	0.00548	0.06687
	Secuencia cero R	No utilizado	-	0
7	Secuencia positiva X	Reactancia de fuga de devanados	0.06920	0.84418
	Secuencia cero X	No utilizado	-	0
8	Secuencia positiva GFROM	Conductancia equivalente sin pérdidas de carga	0.00165	0.00014
	GFROM de secuencia cero	No utilizado	-	0
9	Secuencia positiva BFROM	Susceptancia de rama magnetizante	- 0.00986	- 0.00081
	BFROM de secuencia cero	No utilizado	-	0
10	GTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	GTO de secuencia cero	No utilizado	-	0
11	BTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	BTO de secuencia cero	No utilizado	-	0
12	Cortocircuito	Impedancia de prueba de pérdida de carga	6.93	6.93
13	Pérdida de cobre	Pérdida de carga	41.11	41.11
14	Circuito abierto	Corriente de excitación	1	1
15	Pérdida de núcleo	Pérdida sin carga	12.35	12.35

6.2.4 Transformador de dos devanados con primario en triángulo y secundario en estrella

Este tipo de transformador requiere que se completen dos formularios de Devanados del transformador y la primera sección del formulario de Impedancia del transformador. Los formularios deben completarse como se ve en la Tabla 6-12, la Tabla 6-13 y la Tabla 6-14. Los valores de ejemplo provienen del transformador de ejemplo que se encuentra en la Sección 2.7.4. Se han supuesto tensiones de barras del sistema de 138 kV y 13,8 kV para los devanados primario y secundario, respectivamente.

Tabla 6-12 – Devanados de transformadores DY Forma 1

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Valor de formulario
2	Número de bobinados	Tipo de transformador	2
3	Número de bujes	Tipo de transformador	2
4	Devanado	Datos de devanado primario	PAGS
5	D/A	Tipo de transformador	D
6	TIERRA	Configuración de puesta a tierra	norte
7	Conexión a tierra R (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
8	Conexión a tierra X (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
9	Condición de calificación	Clasificaciones ONAN del transformador	EN UNA
			ONAF
			ONAF2
10	Calificación (MVA)	Clasificaciones ONAN del transformador	20
			26.6
			33.3
11	¿Instalado?	Siempre Y	Y
			Y
			Y
12	Cojinete	Devanado primario tipo transformador	H
14	buje kV	Voltajes de bobinado	138
15	Toque máximo (pu)	Rango de toque	1.1
dieciséis	Toque mínimo	Rango de toque	0.9
17	N grifos	Número de pasos de toque	17

Tabla 6-13- Devanados de Transformador DY Forma 2

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Valor de formulario
2	Número de bobinados	Tipo de transformador	2
3	Número de bujes	Tipo de transformador	2
4	Devanado	Datos de devanado secundario	S
5	D/A	Tipo de transformador	Y
6	TIERRA	Configuración de puesta a tierra	Y
7	Conexión a tierra R (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	40,0
8	Conexión a tierra X (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
9	Condición de calificación	Clasificaciones ONAN del transformador	EN UNA
			ONAF
			ONAF2
10	Calificación (MVA)	Clasificaciones ONAN del transformador	20
			26
			33.3
11	¿Instalado?	Siempre Y	Y
			Y
			Y
12	Cojinete	Devanado secundario tipo transformador	X
14	buje kV	Voltajes de bobinado	13.8
15	Toque máximo (pu)	Rango de toque	1
dieciséis	Toque mínimo	Rango de toque	1
17	N grifos	Número de pasos de toque	1

Tabla 6-14- Formulario de impedancia del transformador DY

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Modelo Genérico Valor	Valor de formulario
3	Desde el autobús	buje primario	-	H
4	Al autobús	Buje secundario	-	X
5	Base AMEU	Sin pérdida de carga/Prueba de pérdida de carga MVA	20	20
6	Secuencia positiva R	Pérdidas de carga Resistencia equivalente	0.00278	0.01388
	Secuencia cero R		0.08640	0.43200
7	Secuencia positiva X	Reactancia de fuga de devanados	0.06855	0.34273
	Secuencia cero X		0	0
8	Secuencia positiva GFROM	Conductancia equivalente sin pérdidas de carga	0.00115	0.00023
	GFROM de secuencia cero	_____	0.23805	0.04761
9	Secuencia positiva BFROM	Susceptancia de rama magnetizante	- 0.00352	- 0.00070
	BFROM de secuencia cero	_____	0	0
10	GTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	GTO de secuencia cero	No utilizado	-	0
11	BTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	BTO de secuencia cero	No utilizado	-	0
12	Cortocircuito	Impedancia de prueba de pérdida de carga	6.8602	6.8602
13	Pérdida de cobre	Pérdida de carga	55.505	55.505
14	Circuito abierto	Corriente de excitación	0.3705	0.3705
15	Pérdida de núcleo	Pérdida sin carga	22.991	22.991

6.2.5 Autotransformador de dos devanados (estrella-estrella)

Este tipo de transformador requiere que se complete un formulario de Devanados del transformador y la primera sección del formulario de Impedancia del transformador. Los formularios deben llenarse como se ve en la Tabla 6-15 y la Tabla 6-16. Los valores de ejemplo provienen del transformador de ejemplo que se encuentra en la Sección 2.8.4. Se han asumido voltajes de barra del sistema de 250 kV y 138 kV para las barras primaria y secundaria, respectivamente.

Tabla 6-15- Formulario de devanados del transformador del autotransformador YY

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Valor de formulario
2	Número de bobinados	Tipo de transformador	2
3	Número de bujes	Tipo de transformador	2
4	Devanado	Datos de devanado primario	PAGS
5	D/A	Tipo de transformador	Y
6	TIERRA	Configuración de puesta a tierra	Y
7	Conexión a tierra R (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
8	Conexión a tierra X (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
9	Condición de calificación	Clasificaciones ONAN del transformador	EN UNA
			ONAF
			ONAF2
10	Calificación (MVA)	Clasificaciones ONAN del transformador	90
			120
			150
11	¿Instalado?	Siempre Y	Y
			Y
			Y
12	Cojinete	Devanado primario tipo transformador	H
			X
14	bujes kV	Voltajes de bobinado	250
			138
15	Toque máximo (pu)	Rango de toque	1.075
			1
dieciséis	Toque mínimo	Rango de toque	0.925
			1
17	N grifos	Número de pasos de toque	18
			1

Tabla 6-16- Formulario de impedancia del transformador del autotransformador YY

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Modelo Genérico Valor	Valor de formulario
3	Desde el autobús	buje primario	-	H
4	Al autobús	Buje secundario	-	X
5	Base AMEU	Sin pérdida de carga/Prueba de pérdida de carga MVA	150	150
6	Secuencia positiva R	Pérdidas de carga Resistencia equivalente	0.00121	0.00146
	Secuencia cero R		8.16387	9.84263
7	Secuencia positiva X	Reactancia de fuga de devanados	0.05081	0.06125
	Secuencia cero X		0	0
8	Secuencia positiva GFROM	Conductancia equivalente sin pérdidas de carga	0.00090	0.00075
	GFROM de secuencia cero	_____	6.24270	5.17795
9	Secuencia positiva BFROM	Susceptancia de rama magnetizante	- 0.002806	- 0.00233
	BFROM de secuencia cero	_____	0	0
10	GTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	GTO de secuencia cero	_____	2.02839	1.68242
11	BTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	BTO de secuencia cero	_____	0	0
12	Cortocircuito	Impedancia de prueba de pérdida de carga	8.47	8.47
13	Pérdida de cobre	Pérdida de carga	302.4	302.4
14	Circuito abierto	Corriente de excitación	0.177	0.177
15	Pérdida de núcleo	Pérdida sin carga	81.33	81.33

6.2.6 Transformador regulador de tensión de dos devanados

Este tipo de transformador requiere que se completen dos formularios de Devanados del transformador y la primera sección del formulario de Impedancia del transformador. Los formularios deben completarse como se muestra en la Tabla 6-17, la Tabla 6-18 y la Tabla 6-19. Los valores de ejemplo provienen del transformador de ejemplo en la Sección 2.4.4. Se han supuesto tensiones de barras del sistema de 3,744 kV y 4,16 kV para los devanados primario y secundario, respectivamente.

Tabla 6-17- Devanados del transformador del regulador de voltaje Forma 1

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Valor de formulario
2	Número de bobinados	Tipo de transformador	2
3	Número de bujes	Tipo de transformador	2
4	Devanado	Datos de devanado primario	PAGS
5	D/A	Tipo de transformador	Y
6	TIERRA	Configuración de puesta a tierra	Y
7	Conexión a tierra R (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
8	Conexión a tierra X (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
9	Condición de calificación	Clasificaciones ONAN del transformador	EN UNA
			ONAF
			ONAF2
10	Calificación (MVA)	Clasificaciones ONAN del transformador	15
			20
			25
11	¿Instalado?	Siempre Y	Y
			Y
			Y
12	Cojinete	Devanado primario tipo transformador	S
14	buje kV	Voltajes de bobinado	4.16
15	Toque máximo (pu)	Rango de toque	1.25
dieciséis	Toque mínimo	Rango de toque	0.75
17	N grifos	Número de pasos de toque	17

Tabla 6-18- Devanados del transformador del regulador de voltaje Forma 2

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Valor de formulario
2	Número de bobinados	Tipo de transformador	2
3	Número de bujes	Tipo de transformador	2
4	Devanado	Datos de devanado secundario	S
5	D/A	Tipo de transformador	Y
6	TIERRA	Configuración de puesta a tierra	Y
7	Conexión a tierra R (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
8	Conexión a tierra X (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
9	Condición de calificación	Clasificaciones ONAN del transformador	EN UNA
			ONAF
			ONAF2
10	Calificación (MVA)	Clasificaciones ONAN del transformador	15
			20
			25
11	¿Instalado?	Siempre Y	Y
			Y
			Y
12	Cojinete	Devanado secundario tipo transformador	L
14	buje kV	Voltajes de bobinado	4.16
15	Toque máximo (pu)	Rango de toque	1
dieciséis	Toque mínimo	Rango de toque	1
17	N grifos	Número de pasos de toque	1

Tabla 6-19- Formulario de impedancia del transformador del regulador de voltaje

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Modelo Genérico Valor	Valor de formulario
3	Desde el autobús	buje primario	-	S
4	Al autobús	Buje secundario	-	L
5	Base AMEU	Sin pérdida de carga/Prueba de pérdida de carga MVA	15	15
6	Secuencia positiva R	Pérdidas de carga Resistencia equivalente	0.00168	0.01383
	Secuencia cero R		0.00171	0.01407
7	Secuencia positiva X	Reactancia de fuga de devanados	0.01482	0.12193
	Secuencia cero X		0.01508	0.12413
8	Secuencia positiva GFROM	Conductancia equivalente sin pérdidas de carga	0.00015	0.00019
	GFROM de secuencia cero	_____	1.33605	0.16233
9	Secuencia positiva BFROM	Susceptancia de rama magnetizante	- 0.00211	- 0.00026
	BFROM de secuencia cero	_____	- 11.7835	- 1.4317
10	GTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	GTO de secuencia cero	_____	0.14853	0.01804
11	BTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	BTO de secuencia cero	_____	- 1.3092	- 0.15908
12	Cortocircuito	Impedancia de prueba de pérdida de carga	7.68	1.4925
13	Pérdida de cobre	Pérdida de carga	41.66	25.197
14	Circuito abierto	Corriente de excitación	0.119	0.212
15	Pérdida de núcleo	Pérdida sin carga	11.61	2.31

6.3 Transformadores de tres devanados

6.3.1 Transformador de tres devanados con primario en estrella, secundario en estrella y terciario en estrella

Este tipo de transformador requiere que se completen tres formularios de devanado del transformador y las tres secciones del formulario de impedancia del transformador. Consulte la Tabla 6-20, la Tabla 6-21, la Tabla 6-22 y la Tabla 6-23. Los valores de ejemplo provienen del transformador de ejemplo que se encuentra en la Sección 3.4.4. Se han asumido voltajes de barras del sistema de 240 kV, 25 kV y 25 kV para los devanados primario, secundario y terciario, respectivamente.

Tabla 6-20- YYY Transformador Devanados Forma 1

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Valor de formulario
2	Número de bobinados	Tipo de transformador	3
3	Número de bujes	Tipo de transformador	4
4	Devanado	Devanado primario	PAGS
5	D/A	Tipo de transformador	Y
6	TIERRA	Configuración de puesta a tierra	Y
7	Conexión a tierra R (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
8	Conexión a tierra X (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
9	Condición de calificación	Clasificaciones ONAN del transformador	EN UNA
			ONAF
			ONAF2
10	Calificación (MVA)	Clasificaciones ONAN del transformador	50
			66.7
			83.3
11	¿Instalado?	Siempre Y	Y
			Y
			Y
12	Cojinete	bujes primario Casquillo intermedio imaginario	H
			METRO
14	bujes kV	Voltajes de bobinado	245
			245
15	Toque máximo (pu)	Rango de toque	1.3
			1
dieciséis	Toque mínimo (pu)	Rango de toque	0.7
			1
17	N grifos	Número de pasos de toque	24
			1

Tabla 6-21- Devanados de Transformador YYY Forma 2

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Valor de formulario
2	Número de bobinados	Tipo de transformador	3
3	Número de bujes	Tipo de transformador	4
4	Devanado	Devanado secundario	S
5	D/A	Tipo de transformador	Y
6	TIERRA	Configuración de puesta a tierra	Y
7	Conexión a tierra R (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
8	Conexión a tierra X (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	1
9	Condición de calificación	Clasificaciones ONAN del transformador	EN UNA
			ONAF
			ONAF2
10	Calificación (MVA)	Clasificaciones ONAN del transformador	25
			33.4
			41.7
11	¿Instalado?	Siempre Y	Y
			Y
			Y
12	Cojinete	Buje secundario	X
14	buje kV	Voltajes de bobinado	26
15	Toque máximo (pu)	Rango de toque	1
dieciséis	Toque mínimo (pu)	Rango de toque	1
17	N grifos	Número de pasos de toque	1

Tabla 6-22- YYY Transformador Devanados Forma 3

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Valor de formulario
2	Número de bobinados	Tipo de transformador	3
3	Número de bujes	Tipo de transformador	4
4	Devanado	Devanado terciario	T
5	D/A	Tipo de transformador	Y
6	TIERRA	Configuración de puesta a tierra	Y
7	Conexión a tierra R (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
8	Conexión a tierra X (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	1
9	Condición de calificación	Clasificaciones ONAN del transformador	EN UNA
			ONAF
			ONAF2
10	Calificación (MVA)	Clasificaciones ONAN del transformador	25
			33.4
			41.7
11	¿Instalado?	Siempre Y	Y
			Y
			Y
12	Cojinete	buje terciario	Y
14	buje kV	Voltajes de bobinado	26
15	Toque máximo (pu)	Rango de toque	1
dieciséis	Toque mínimo (pu)	Rango de toque	1
17	N grifos	Número de pasos de toque	1

Tabla 6-23- Formulario de impedancia del transformador YYY

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Modelo Genérico Valor	Valor de formulario
3	Desde el autobús	buje primario	-	H
4	Al autobús	Casquillo intermedio imaginario	-	METRO
5	Base AMEU	Sin pérdida de carga/Prueba de pérdida de carga MVA	50	50
6	Secuencia positiva R	Equivalente de dos devanados Resistencias	0	0
	Secuencia cero R	R_{H0}	0	0
7	Secuencia positiva X	Reactancias de fuga de dos devanados	0.01320	0.02751
	Secuencia cero X	X_{H0}	0	0
8	Secuencia positiva GFROM	Conductancia equivalente sin pérdidas de carga	0.00095	0.00046
	GFROM de secuencia cero	No utilizado	-	0
9	Secuencia positiva BFROM	Susceptancia de rama magnetizante	- 0.01201	- 0.00576
	BFROM de secuencia cero	No utilizado	-	0
10	GTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	GTO de secuencia cero	No utilizado	-	0
11	BTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	BTO de secuencia cero	No utilizado	-	0
12	Cortocircuito	Impedancia de prueba de pérdida de carga	10.36	10.36
13	Pérdida de cobre	Pérdida de carga	116.852	116.852
14	Circuito abierto	Corriente de excitación	1.205	1.205
15	Pérdida de núcleo	Pérdida sin carga	47.656	47.656
Segundo Devanado	Desde el autobús	Buje secundario	-	X
	Al autobús	Casquillo intermedio imaginario	-	METRO
	Base AMEU	Sin pérdida de carga/Prueba de pérdida de carga MVA	50	50
	Secuencia positiva R	Equivalente de dos devanados Resistencias	0	0
	Secuencia cero R	R_{X0}	0.15620	0.32555
	Secuencia positiva X	Reactancias de fuga de dos devanados	0.18080	0.37682
	Secuencia cero X	X_{X0}	0	0
	Secuencia positiva GFROM	No utilizado	-	0
	GFROM de secuencia cero	No utilizado	-	0
	Secuencia positiva BFROM	No utilizado	-	0
	BFROM de secuencia cero	No utilizado	-	0
	GTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	GTO de secuencia cero	No utilizado	-	0
	BTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	BTO de secuencia cero	No utilizado	-	0
	Cortocircuito	Impedancia de prueba de pérdida de carga	10.36	10.36

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Modelo Genérico Valor	Valor de formulario
	Pérdida de cobre	Pérdida de carga	116.852	116.852
	Circuito abierto	Corriente de excitación	0.01205	0.01205
	Pérdida de núcleo	Pérdida sin carga	47.656	47.656
De Autobús Al autobús	Desde el autobús	buje terciario	-	Y
	Al autobús	Casquillo intermedio imaginario	-	METRO
	Base AMEU	Sin pérdida de carga/Prueba de pérdida de carga MVA	50	50
	Secuencia positiva R	Equivalente de dos devanados Resistencias	0	0
	Secuencia cero R	R_{Y0}	0.15620	0.32555
	Secuencia positiva X	Reactancias de fuga de dos devanados	0.18020	0.37557
	Secuencia cero X	X_{Y0}	0	0
	Secuencia positiva GFROM	No utilizado	-	0
	GFROM de secuencia cero	No utilizado	-	0
	Secuencia positiva BFROM	No utilizado	-	0
	BFROM de secuencia cero	No utilizado	-	0
	GTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	GTO de secuencia cero	No utilizado	-	0
	BTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	BTO de secuencia cero	No utilizado	-	0
	Cortocircuito	Impedancia de prueba de pérdida de carga	10.36	10.36
	Pérdida de cobre	Pérdida de carga	116.852	116.852
	Circuito abierto	Corriente de excitación	0.01205	0.01205
	Pérdida de núcleo	Pérdida sin carga	47.656	47.656

6.3.2 Transformador de tres devanados con primario en estrella, secundario en estrella y terciario en triángulo

Este tipo de transformador requiere que se completen tres formularios de devanado del transformador y las tres secciones del formulario de impedancia del transformador. Consulte la Tabla 6-24, la Tabla 6-25, la Tabla 6-26 y la Tabla 6-27. Los valores de ejemplo provienen del transformador de ejemplo que se encuentra en la Sección 3.5.4. Se han asumido voltajes de barras del sistema de 240 kV, 20 kV y 20 kV para los devanados primario, secundario y terciario, respectivamente.

Tabla 6-24- Devanados de Transformador YYD Forma 1

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Valor de formulario
2	Número de bobinados	Tipo de transformador	3
3	Número de bujes	Tipo de transformador	4
4	Devanado	Devanado primario	PAGS
5	D/A	Tipo de transformador	Y
6	TIERRA	Configuración de puesta a tierra	Y
7	Conexión a tierra R (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
8	Conexión a tierra X (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
9	Condición de calificación	Clasificaciones ONAN del transformador	EN UNA
			ONAF
			ONAF2
10	Calificación (MVA)	Clasificaciones ONAN del transformador	150
			200
			250
11	¿Instalado?	Siempre Y	Y
			Y
			Y
12	Cojinete	Casquillo primario/casquillo medio imaginario	H
			METRO
14	bujes kV	Voltajes de bobinado	240
			240
15	Toque máximo (pu)	Rango de toque	1
			1
dieciséis	Toque mínimo (pu)	Rango de toque	1
			1
17	N grifos	Número de pasos de toque	1
			1

Tabla 6-25- Devanados de Transformador YYD Forma 2

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Valor de ejemplo
2	Número de bobinados	Tipo de transformador	3
3	Número de bujes	Tipo de transformador	4
4	Devanado	Devanado secundario	S
5	D/A	Tipo de transformador	Y
6	TIERRA	Configuración de puesta a tierra	Y
7	Conexión a tierra R (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
8	Conexión a tierra X (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
9	Condición de calificación	Clasificaciones ONAN del transformador	EN UNA
			ONAF
			ONAF2
10	Calificación (MVA)	Clasificaciones ONAN del transformador	75
			100
			125
11	¿Instalado?	Siempre Y	Y
			Y
			Y
12	Cojinete	Buje secundario	X
14	buje kV	Voltajes de bobinado	20
15	Toque máximo (pu)	Rango de toque	1
dieciséis	Toque mínimo (pu)	Rango de toque	1
17	N grifos	Número de pasos de toque	1

Tabla 6-26- Devanados de Transformador YYD Forma 3

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Valor de ejemplo
2	Número de bobinados	Tipo de transformador	3
3	Número de bujes	Tipo de transformador	4
4	Devanado	Devanado terciario	T
5	D/A	Tipo de transformador	D
6	TIERRA	Configuración de puesta a tierra	norte
7	Conexión a tierra R (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
8	Conexión a tierra X (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
9	Condición de calificación	Clasificaciones ONAN del transformador	EN UNA
			ONAF
			ONAF2
10	Calificación (MVA)	Clasificaciones ONAN del transformador	75
			100
			125
11	¿Instalado?	Siempre Y	Y
			Y
			Y
12	Cojinete	buje terciario	Y
14	buje kV	Voltajes de bobinado	20
15	Toque máximo (pu)	Rango de toque	1
dieciséis	Toque mínimo (pu)	Rango de toque	1
17	N grifos	Número de pasos de toque	1

Tabla 6-27- Formulario de impedancia del transformador YYD

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Modelo Genérico Valor	Valor de formulario
3	Desde el autobús	buje primario	-	H
4	Al autobús	Casquillo intermedio imaginario	-	METRO
5	Base AMEU	Sin pérdida de carga/Prueba de pérdida de carga MVA	250	250
6	Secuencia positiva R	Pérdidas de carga Resistencia equivalente	0	0
	Secuencia cero R	R_{H0}	0.09840	0.0656
7	Secuencia positiva X	Reactancia de fuga de devanados	0.07170	0.0478
	Secuencia cero X	X_{H0}	0	0
8	Secuencia positiva GFROM	Conductancia equivalente sin pérdidas de carga	0.00032	0.000476
	GFROM de secuencia cero	No utilizado	-	0
9	Secuencia positiva BFROM	Susceptancia de rama magnetizante	- 0.00024	- 0.000365
	BFROM de secuencia cero	No utilizado	-	0
10	GTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	GTO de secuencia cero	No utilizado	-	0
11	BTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	BTO de secuencia cero	No utilizado	-	0
12	Cortocircuito	Impedancia de prueba de pérdida de carga	9.7	9.7
13	Pérdida de cobre	Pérdida de carga	319.5	319.5
14	Circuito abierto	Corriente de excitación	0.024	0.024
15	Pérdida de núcleo	Pérdida sin carga	47.6	47.6
Segundo Devanado	Desde el autobús	Buje secundario	-	X
	Al autobús	Casquillo intermedio imaginario	-	METRO
	Base AMEU	Sin pérdida de carga/Prueba de pérdida de carga MVA	250	250
	Secuencia positiva R	Pérdidas de carga Resistencia equivalente	0	0
	Secuencia cero R	R_{X0}	0	0
	Secuencia positiva X	Reactancia de fuga de devanados	0.11448	0.02988
	Secuencia cero X	X_{X0}	0	0
	Secuencia positiva GFROM	No utilizado	-	0
	GFROM de secuencia cero	No utilizado	-	0
	Secuencia positiva BFROM	No utilizado	-	0
	BFROM de secuencia cero	No utilizado	-	0
	GTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	GTO de secuencia cero	No utilizado	-	0
	BTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	BTO de secuencia cero	No utilizado	-	0
	Cortocircuito	Impedancia de prueba de pérdida de carga	9.5	9.5
	Pérdida de cobre	Pérdida de carga	337.4	337.4
	Circuito abierto	Corriente de excitación	0.024	0.024

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Modelo Genérico Valor	Valor de formulario
	Pérdida de núcleo	Pérdida sin carga	47.6	47.6
Tercero Devanado	Desde el autobús	buje terciario	-	Y
	Al autobús	Casquillo intermedio imaginario	-	METRO
	Base AMEU	Sin pérdida de carga/Prueba de pérdida de carga MVA	250	250
	Secuencia positiva R	Pérdidas de carga Resistencia equivalente	0	0
	Secuencia cero R	R_{Y0}	0	0
	Secuencia positiva X	Reactancia de fuga de devanados	0.04278	0.02852
	Secuencia cero X	X_{Y0}	0	0
	Secuencia positiva GFROM	No utilizado	-	0
	GFROM de secuencia cero	No utilizado	-	0
	Secuencia positiva BFROM	No utilizado	-	0
	BFROM de secuencia cero	No utilizado	-	0
	GTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	GTO de secuencia cero	No utilizado	-	0
	BTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	BTO de secuencia cero	No utilizado	-	0
	Cortocircuito	Impedancia de prueba de pérdida de carga	7.3	7.3
	Pérdida de cobre	Pérdida de carga	8.8	8.8
	Circuito abierto	Corriente de excitación	0.024	0.024
	Pérdida de núcleo	Pérdida sin carga	47.6	47.6

6.3.3 Transformador de tres devanados con primario en triángulo, secundario en estrella y terciario en estrella

Este tipo de transformador requiere que se completen tres formularios de devanado del transformador y las tres secciones del formulario de impedancia del transformador. Consulte la Tabla 6-28, la Tabla 6-29, la Tabla 6-30 y la Tabla 6-31. Los valores de ejemplo provienen del transformador de ejemplo que se encuentra en la Sección 3.6.4. Se han asumido voltajes de barras del sistema de 18,5 kV, 2,4 kV y 2,4 kV para los devanados primario, secundario y terciario, respectivamente.

Tabla 6-28- Devanados de Transformador DYY Forma 1

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Valor de formulario
2	Número de bobinados	Tipo de transformador	3
3	Número de bujes	Tipo de transformador	4
4	Devanado	Devanado primario	PAGS
5	D/A	Tipo de transformador	D
6	TIERRA	Configuración de puesta a tierra	norte
7	Conexión a tierra R (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
8	Conexión a tierra X (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
9	Condición de calificación	Clasificaciones ONAN del transformador	EN UNA
			ONAF
10	Calificación (MVA)	Clasificaciones ONAN del transformador	18
			24
11	¿Instalado?	Siempre Y	Y
			Y
12	Cojinete	Casquillo primario/casquillo medio imaginario	H
			METRO
14	bujes kV	Voltajes de bobinado	18.5
			18.5
15	Toque máximo (pu)	Rango de toque	1.3
			1
dieciséis	Toque mínimo (pu)	Rango de toque	0.7
			1
17	N grifos	Número de pasos de toque	5
			1

Tabla 6-29- Devanados de Transformador DYY Forma 2

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Valor de formulario
2	Número de bobinados	Tipo de transformador	3
3	Número de bujes	Tipo de transformador	4
4	Devanado	Devanado secundario	S
5	D/A	Tipo de transformador	Y
6	TIERRA	Configuración de puesta a tierra	Y
7	Conexión a tierra R (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
8	Conexión a tierra X (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
9	Condición de calificación	Clasificaciones ONAN del transformador	EN UNA
			ONAF
10	Calificación (MVA)	Clasificaciones ONAN del transformador	9
			12
11	¿Instalado?	Siempre Y	Y
			Y
12	Cojinete	Buje secundario	X
14	buje kV	Voltajes de bobinado	2.4
15	Toque máximo (pu)	Rango de toque	1
dieciséis	Toque mínimo (pu)	Rango de toque	1
17	N grifos	Número de pasos de toque	1

Tabla 6-30- Devanados de Transformador DYY Forma 3

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Valor de ejemplo
2	Número de bobinados	Tipo de transformador	3
3	Número de bujes	Tipo de transformador	4
4	Devanado	Devanado terciario	T
5	D/A	Tipo de transformador	Y
6	TIERRA	Configuración de puesta a tierra	Y
7	Conexión a tierra R (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
8	Conexión a tierra X (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
9	Condición de calificación	Clasificaciones ONAN del transformador	EN UNA
			ONAF
10	Calificación (MVA)	Clasificaciones ONAN del transformador	9
			12
11	¿Instalado?	Siempre Y	Y
			Y
12	Cojinete	buje terciario	Y
14	buje kV	Voltajes de bobinado	2.4
15	Toque máximo (pu)	Rango de toque	1
dieciséis	Toque mínimo (pu)	Rango de toque	1
17	N grifos	Número de pasos de toque	1

Tabla 6-31- Formulario de impedancia del transformador DYY

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Modelo Genérico Valor	Valor de formulario
3	Desde el autobús	buje primario	-	H
4	Al autobús	Casquillo intermedio imaginario	-	METRO
5	Base AMEU	Sin pérdida de carga/Prueba de pérdida de carga MVA	18	18
6	Secuencia positiva R	Pérdidas de carga Resistencia equivalente	0	0
	Secuencia cero R	R_{H0}	0	0
7	Secuencia positiva X	Reactancia de fuga de devanados	0.00170	0.009444
	Secuencia cero X	X_{H0}	0.00145	0.008028
8	Secuencia positiva GFROM	Conductancia equivalente sin pérdidas de carga	0.00092	0.000165
	GFROM de secuencia cero	No utilizado	-	0
9	Secuencia positiva BFROM	Susceptancia de rama magnetizante	- 0.00684	- 0.001231
	BFROM de secuencia cero	No utilizado	-	0
10	GTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	GTO de secuencia cero	No utilizado	-	0
11	BTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	BTO de secuencia cero	No utilizado	-	0
12	Cortocircuito	Impedancia de prueba de pérdida de carga	6.7	6.7
13	Pérdida de cobre	Pérdida de carga	80	80
14	Circuito abierto	Corriente de excitación	0,69	0,69
15	Pérdida de núcleo	Pérdida sin carga	16.5	16.5
Segundo Devanado	Desde el autobús	Buje secundario	-	X
	Al autobús	Casquillo intermedio imaginario	-	METRO
	Base AMEU	Sin pérdida de carga/Prueba de pérdida de carga MVA	18	18
	Secuencia positiva R	Pérdidas de carga Resistencia equivalente	0	0
	Secuencia cero R	R_{X0}	0	0
	Secuencia positiva X	Reactancia de fuga de devanados	0.12730	0.70722
	Secuencia cero X	X_{X0}	0.11457	0.63650
	Secuencia positiva GFROM	No utilizado	-	0
	GFROM de secuencia cero	No utilizado	-	0
	Secuencia positiva BFROM	No utilizado	-	0
	BFROM de secuencia cero	No utilizado	-	0
	GTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	GTO de secuencia cero	No utilizado	-	0
	BTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	BTO de secuencia cero	No utilizado	-	0
	Cortocircuito	Impedancia de prueba de pérdida de carga	6.7	6.7
	Pérdida de cobre	Pérdida de carga	80	80
	Circuito abierto	Corriente de excitación	0,69	0,69

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Modelo Genérico Valor	Valor de formulario
	Pérdida de núcleo	Pérdida sin carga	16.5	16.5
Tercero Devanado	Desde el autobús	buje terciario	-	Y
	Al autobús	Casquillo intermedio imaginario	-	METRO
	Base AMEU	Sin pérdida de carga/Prueba de pérdida de carga MVA	18	18
	Secuencia positiva R	Pérdidas de carga Resistencia equivalente	0	0
	Secuencia cero R	R_{Y0}	0	0
	Secuencia positiva X	Reactancia de fuga de devanados	0.12830	0.71278
	Secuencia cero X	X_{Y0}	0.11547	0.64150
	Secuencia positiva GFROM	No utilizado	-	0
	GFROM de secuencia cero	No utilizado	-	0
	Secuencia positiva BFROM	No utilizado	-	0
	BFROM de secuencia cero	No utilizado	-	0
	GTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	GTO de secuencia cero	No utilizado	-	0
	BTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	BTO de secuencia cero	No utilizado	-	0
	Cortocircuito	Impedancia de prueba de pérdida de carga	6.7	6.7
	Pérdida de cobre	Pérdida de carga	80	80
	Circuito abierto	Corriente de excitación	0,69	0,69
	Pérdida de núcleo	Pérdida sin carga	16.5	16.5

6.3.4 Autotransformador de Tres Devanados: Autotransformador con Devanado Terciario (Estrella-Estrella con Terciario Delta)

Este transformador requiere que se completen dos formularios de devanado del transformador y las tres secciones del formulario de impedancia del transformador. Consulte la Tabla 6-32, la Tabla 6-33 y la Tabla 6-34. Los valores de ejemplo provienen del transformador de ejemplo que se encuentra en la Sección 3.8.4. Se han supuesto voltajes de barra del sistema de 132 kV, 69 kV y 4,16 kV para las barras primaria, secundaria y terciaria, respectivamente.

Tabla 6-32- Devanados de transformador de autotransformador YYD Forma 1

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Valor de ejemplo
2	Número de bobinados	Tipo de transformador	2
3	Número de bujes	Tipo de transformador	3
4	Devanado	Devanado primario	PAGS
5	D/A	Tipo de transformador	Y
6	TIERRA	Configuración de puesta a tierra	Y
7	Conexión a tierra R (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
8	Conexión a tierra X (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
9	Condición de calificación	Clasificaciones ONAN del transformador	EN UNA
10	Calificación (MVA)	Clasificaciones ONAN del transformador	18.75
11	¿Instalado?	Siempre Y	Y
12	Cojinete	buje primario	H
		Buje secundario	X
14	buje kV	Voltajes de bobinado	132
			72
15	Toque máximo (pu)	Rango de toque	1
			1.5
dieciséis	Toque mínimo (pu)	Rango de toque	1
			0.5
17	N grifos	Número de pasos de toque	1
			10

Tabla 6-33- Devanados de transformador de autotransformador YYD Forma 2

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Valor de ejemplo
2	Número de bobinados	Tipo de transformador	2
3	Número de bujes	Tipo de transformador	3
4	Devanado	Devanado terciario	T
5	D/A	Tipo de transformador	D
6	TIERRA	Configuración de puesta a tierra	norte
7	Conexión a tierra R (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
8	Conexión a tierra X (Ohm)	Impedancia de puesta a tierra	0
9	Condición de calificación	Clasificaciones ONAN del transformador	EN UNA
10	Calificación (MVA)	Clasificaciones ONAN del transformador	5.37
11	¿Instalado?	Siempre Y	Y
12	Cojinete	buje terciario	Y
14	buje kV	Voltajes de bobinado	4.16
15	Toque máximo (pu)	Rango de toque	1
dieciséis	Toque mínimo (pu)	Rango de toque	1
17	N grifos	Número de pasos de toque	1

Tabla 6-34- Formulario de impedancia del transformador del autotransformador YYD

Campo Número	Nombre del campo	Fuente de modelo genérico	Modelo Genérico Valor	Valor de formulario
3	Desde el autobús	buje primario	-	H
4	Al autobús	Buje secundario	-	X
5	Base AMEU	Sin pérdida de carga/Prueba de pérdida de carga MVA	18.75	18.75
6	Secuencia positiva R	Pérdidas de carga Resistencia equivalente	0.00129	0.00689
	Secuencia cero R	R_{H0}	0.09684	0.51647
7	Secuencia positiva X	Reactancia de fuga de devanados	0.05702	0.30409
	Secuencia cero X	X_{H0}	0	0
8	Secuencia positiva GFROM	Conductancia equivalente sin pérdidas de carga	0.00115	0.00216
	GFROM de secuencia cero	No utilizado	-	0
9	Secuencia positiva BFROM	Susceptancia de rama magnetizante	- 0.00371	- 0.00695
	BFROM de secuencia cero	No utilizado	-	0
10	GTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	GTO de secuencia cero	No utilizado	-	0
11	BTO de secuencia positiva	No utilizado	-	0
	BTO de secuencia cero	No utilizado	-	0
12	Cortocircuito	Impedancia de prueba de pérdida de carga	4.91	4.91
13	Pérdida de cobre	Pérdida de carga	48.46	48.46
14	Circuito abierto	Corriente de excitación	0.388	0.388
15	Pérdida de núcleo	Pérdida sin carga	21.55	21.55

7. Referencias

- [1] Máquinas eléctricas y accionamientos, Slemon, Gordon R.,
- [2] Principios y aplicaciones de los transformadores de potencia, John J. Winders, Jr. PPL Electric Utilities Allentown, Pensilvania, Marcel Dekker Inc. 2002.
- [3] The J & P Transformer Book Duodécima edición UNA TECNOLOGÍA PRÁCTICA DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA Martin J. Heathcote, CEng, FIEE, Newnws 1998.
- [4] Manual práctico de transformadores Irving M. Gottlieb RE., Newnes 1998.
- [5] Determinación de parámetros de transitorios de sistemas de potencia, editado por Juan A. Martinez-Velasco, Taylor & Francis Group, 2010.
- [6] Ingeniería de transformadores de energía eléctrica, editado por James H. Harlow, por CRC Press LLC, 2004.
- [7] Diseño y práctica de ingeniería de transformadores SVKulkarni SAKhaparde Instituto Indio de Tecnología, Bombay Mumbai, India, Marcel Dekker Inc. 2004.
- [8] Análisis de sistemas de energía con fallas, Paul M. Anderson, IEEE Press Power Systems, Engineering Series, 1995.
- [9] Manual de diseño de transformadores e inductores, tercera edición, revisada y ampliada CORONEL WM. T. MCLYMAN Kg Magnetics, Inc. Idyllwild, California, EE. UU. 2004.
- [10] Principios de diseño de transformadores con aplicaciones a transformadores de potencia en forma de núcleo, segunda edición, Robert M. Del Vecchio, Taylor & Francis Group, 2010.
- [11] Principios y aplicaciones de relés de protección, tercera edición, J. Lewis Blackburn Thomas J. Domin, Taylor & Francis Group 2006.
- [12] Presentación de red de secuencia de transformadores en sistema trifásico, por Olle I. Elgerd, , Moloney Electric Company, St. Louis, MO, EE. UU., marzo de 1956
- [13] Cambiadores de tomas bajo carga para transformadores de potencia: principios de funcionamiento, aplicaciones y selección, Axel Kramer, Publicaciones MR, 2000
- [14] Modelado de sistemas de potencia y análisis de fallas: teoría y práctica, por Nasser D. Tleis, publicación Newnes, 2008
- [15] Corrientes de cortocircuito, Jurgen Schlabbach, IET Power and Energy Series 51, 2008

Apéndice A. Modelo de transformadores PSS/E V33

El modelado de transformadores de potencia en el análisis de estado estable de redes eléctricas es importante porque los datos incorrectos para la impedancia de fuga del devanado de secuencia positiva, la admitancia de magnetización, las relaciones de giro fuera de nominal, el número de posiciones de derivación, el rango de derivación o la banda de control de voltaje de un transformador puede dar lugar a resultados incorrectos en la verificación de los esquemas de control de tensión y potencia reactiva, la evaluación de las pérdidas de transmisión y/o la evaluación de la confiabilidad del sistema. El principal objetivo de esta guía es ayudar a los usuarios a ingresar los datos del transformador eléctrico para el modelo de secuencia positiva de la red eléctrica y minimizar la inexactitud de los modelos.

El circuito equivalente del transformador en PSS®E es el mismo que se muestra en la Figura 1-4 en la Sección 1. La reactancia de magnetización normalmente es muy grande en relación con las reactancias de fuga. Por lo general, es 2000 veces mayor (en ohmios) que la reactancia de fuga primaria. Por lo tanto, la rama de magnetización puede considerarse comúnmente como un circuito abierto e ignorarse en los análisis del sistema de potencia.

Internamente, PSS®E representa un transformador de dos devanados con el modelo de circuito equivalente que se muestra en la Figura A-1

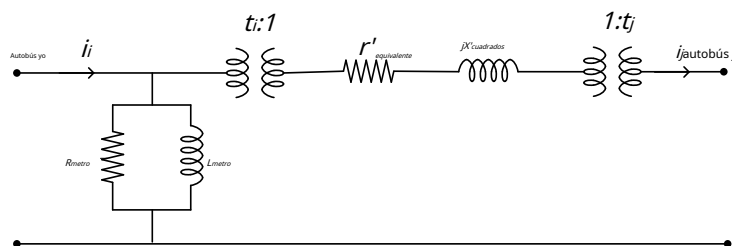


Figura A-1- Modelo de transformador de dos devanados en PSS®E

Este modelo permite la representación de la admitancia de magnetización, que a menudo se desprecia en el lado i (devanado 1) del transformador. La entrada de datos para este modelo no requiere cálculo para obtener la impedancia de fuga equivalente, la admitancia de rama magnetizante, las derivaciones efectivas, el escalón de derivación y los límites de derivación. La flexibilidad de datos también permite al usuario especificar la impedancia de fuga equivalente por unidad en la base de MVA del sistema y la base de voltaje del devanado (o derivación nominal) o en la base de MVA del devanado del transformador y la base de voltaje del devanado (o derivación nominal), o especificar los devanados pérdida a plena carga en vatios y la magnitud de impedancia de fuga (o voltaje de impedancia) por unidad en una base de MVA de devanado y una base de voltaje de devanado. El usuario puede elegir ingresar la posición de toma especificando voltajes en kV o en por unidad en el bus.

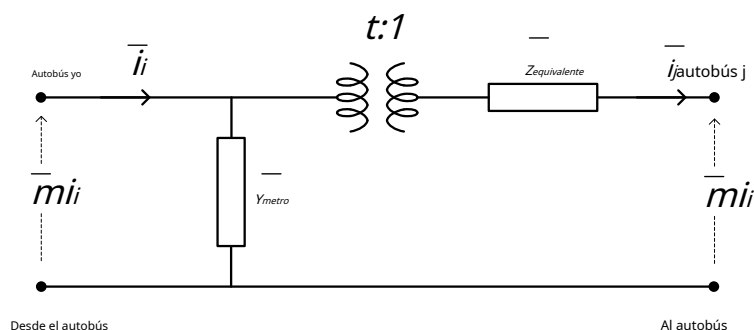


Figura A-2- Circuito equivalente del modelo de transformador de dos devanados estándar PSS@E

Para los cálculos de secuencia cero, el modelo utilizado depende de la conexión entre los devanados en el transformador y si los devanados tienen un camino a tierra. Consulte la Figura 1-2 en la Sección 1 para obtener una lista de diferentes circuitos equivalentes de secuencia cero para transformadores de dos y tres devanados. En los datos de secuencia cero del PSSE, un código de conexión identifica el circuito equivalente utilizado por el transformador. Consulte el manual de PSSE para obtener detalles sobre los diferentes códigos de conexión.

Los transformadores de tres devanados se tratan como tres transformadores de dos devanados conectados entre sí en una barra común de "punto de estrella". Este bus de punto de estrella se maneja internamente en PSS@E y no es visible para el usuario.

El software PSS@E utiliza dos archivos de datos basados en texto para leer los datos del sistema.

- Un archivo .raw que define todos los elementos del sistema.
- Un archivo .seq que define los datos de secuencia para los elementos.

El archivo .seq depende del archivo .raw para la información del sistema y requiere que el archivo .raw se cargue primero. Tanto el archivo .raw como el archivo .seq se dividen en diferentes secciones que representan los diferentes elementos del sistema. El archivo .raw también tiene un encabezado de tres líneas que identifica la información del sistema y, para las versiones más recientes, la versión del archivo de datos sin procesar.

En el archivo .raw, un transformador de dos devanados se representa con las siguientes líneas de datos (consulte la Tabla A-7-1 para ver las definiciones):

- I,J,K,CKT,CW,CM,MAG1,MAG2,NMETR,'NOMBRE',STAT,O1,F1,O2,F2,O3,F3,O4,F4,VEGCR P
- R1-2,X1-2,SBASE1-2
- WINDV1,NOMV1,ANG1,RATA1,RATB1,RATC1,COD1,CONT1,RMA1,RMI1,VMA1,VMI1,N TP1,TAB1,CR1,CX1,CNXA1
- VIENTO2,NOMV2

Un transformador de tres devanados se representa con las siguientes líneas de datos (consulte la Tabla A-7-1 para ver las definiciones):

- I,J,K,CKT,CW,CM,MAG1,MAG2,NMETR,'NOMBRE',STAT,O1,F1,O2,F2,O3,F3,O4,F4,VEGCR P
- R1-2,X1-2,SBASE1-2, R2-3,X2-3,SBASE2-3, R3-1,X3-1,SBASE3-1,VMSTAR,ANSTAR
- WINDV1,NOMV1,ANG1,RATA1,RATB1,RATC1,COD1,CONT1,RMA1,RMI1,VMA1,VMI1,N TP1,TAB1,CR1,CX1,CNXA1

- WINDV2, NOMV2, ANG2, RATA2, RATB2, RATC2, COD2, CONT2, RMA2, RMI2, VMA2, VMI2, N
TP2, TAB2, CR2, CX2, CNXA2
- WINDV2, NOMV2, ANG2, RATA2, RATB2, RATC2, COD2, CONT2, RMA2, RMI2, VMA2, VMI2, N
TP2, TAB2, CR2, CX2, CNXA2

En el archivo .seq, un transformador de dos devanados se representa con la siguiente línea de datos (consulte la Tabla A-7-2 para ver las definiciones):

- I,J,K,ICKT,CZ0,CZG,CC,RG1,XG1,R01,X01,RG2,XG2,R02,X02,RNUTRL,XNUTRL

Un transformador de tres devanados se representa con la siguiente línea de datos (consulte la Tabla A-7-2 para ver las definiciones):

- I,J,K,ICKT,CZ0,CZG,CC,RG1,XG1,R01,X01,RG2,XG2,R02,X02,RG3,XG3,R03,X03,RNUT
RL,XNUTRL

Tabla A-7-1- Definiciones de campo del archivo de datos sin procesar

Campo	Descripción
yo	Barra conectada al devanado 1.
j	Bus conectado al devanado 2.
k	Barra conectada al devanado 3 o 0 para un transformador de dos devanados
CKT	Identificador de circuito
CW	El código de E/S de datos de devanado que define las unidades para WINDV1, WINDV2 y WINDV3: 1 para la relación de espiras fuera de la nominal en pu de la tensión base de la barra colectora del 2 devanado para la tensión de devanado en kV 3 para relación de espiras fuera de nominal en pu de la tensión nominal del devanado (NOMV1, NOMV2, NOMV3)
CZ	El código de E/S de datos de impedancia que define las unidades para R1-2, X1-2, R2-3, X2-3, R3-1 y X3-1: 1 para resistencia y reactancia en sistema pu en base MVA y base de voltaje de devanado 2 para resistencia y reactancia en pu sobre una base MVA especificada y una base de tensión de devanado 3 para la pérdida de carga del transformador en vatios y la magnitud de la impedancia en pu sobre una base de MVA y una base de tensión de devanado especificadas.
CM	El código de E/S de admitancia magnetizante define las unidades para MAG1 y MAG2: 1 para admitancia compleja en sistema pu en MVA base y devanado 1 base de tensión de barra 2 sin pérdida de carga en vatios y corriente de excitación en pu en el voltaje del devanado 1 (NOMV1)
MAG1, MAG2	La admitancia de magnetización del transformador en unidades definidas por CM
NMETR	El código final no medido: 1 para bobinar 1 bus 2 para bobinar 2 bus 3 para devanado de 3 barras (solo válido para transformadores de tres devanados)
NOMBRE	Identificador alfanumérico del transformador
ESTADO	Estado del transformador: 0 para fuera de servicio 1 para en servicio 2 para solo bobinado 2 fuera de servicio 3 para solo bobinado 3 fuera de servicio 4 para solo bobinado 1 fuera de servicio Las opciones 2, 3 y 4 solo son válidas en transformadores de tres devanados.
O1,O2,O3,O4	Número de propietario del transformador.
F1,F2,F3,F4	Propiedad fraccionada asignada a cada uno de los propietarios.
VECGRP	Identificador alfanumérico que especifica el grupo de vectores en función de las conexiones de los devanados del transformador y los ángulos de fase. Esto es sólo para fines informativos.
R1-2,X1-2 R2-3,X2-3 R3-1,X3-1	Las impedancias medidas del transformador entre las barras a las que se conectan los devanados indicados en las unidades especificadas por CZ.

Campo	Descripción
SBASE1-2 SBASE2-3 SBASE3-1	El MVA base trifásico del devanado indicado del transformador.
VMSTAR	La magnitud del voltaje en el bus del punto estrella oculto en pu.
ANSTAR	El ángulo de fase de voltaje del bus en el bus de punto estrella oculto en grados.
VIENTO1 VIENTO2 VIENTO3	La relación de vueltas fuera del nominal del devanado indicado en unidades indicadas por CW.
NOMV1 NOMV2 NOMV3	La base de voltaje nominal del devanado indicado en kV o 0 para indicar que se supone que el voltaje es idéntico al voltaje base del bus conectado.
ANG1 ANG2 ANG3	El ángulo de cambio de fase del devanado indicado en grados.
RATA1,RATB1,RATB1 RATA2,RATB2,RATC2 RATA3,RATB3,RATC3	Los tres valores nominales trifásicos de los devanados indicados en unidades determinadas por el valor XFRRAT en el campo del identificador de caso, o la configuración actual de la opción del programa de porcentaje de carga del transformador en PSS®E. Las dos opciones válidas para las unidades son: - MVA si XFRRAT ≤ 0 - Corriente expresada como MVA si XFRRAT > 0
DQO1 DQO2 DQO3	El modo de control del transformador para ajustes automáticos del devanado indicado. 0 sin control (toma fija y cambio de fase fijo) para 1 control de voltaje 2 para control de flujo de potencia reactiva 3 para control de flujo de potencia activa 4 para el control de una cantidad de línea de CC (solo válido para transformadores de dos devanados) 5 para el control de flujo de potencia activa asimétrica Si el modo de control se ingresa como un número positivo, se habilitan los ajustes automáticos; si se ingresa como un número negativo, los ajustes automáticos están deshabilitados.
CONT1 CONT2 CONT3	La barra para la cual se controlará el voltaje mediante la opción de ajuste de relación de espiras del transformador cuando CODX es 1.
RMA1, RMI1 RMA2,RMI2 RMA3,RMI3	Cuando CODX es 1, 2 o 3, los límites superior e inferior de uno de los siguientes: - Cuando CODX es 1 o 2 y CW es 1, la relación de vueltas fuera de nominal en pu del voltaje base del bus del devanado indicado - Cuando CODX es 1 o 2 y CW es 2, el voltaje real del devanado indicado en kV - Cuando CODX es 1 o 2 y CW es 3, la relación de vueltas fuera de nominal en pu del voltaje del devanado indicado - Cuando CODX es 3, el ángulo de cambio de fase en grados
VMA1, VMI1 VMA2, VMI2 VMA3, VMI3	Cuando CODX es 1, 2 o 3, los límites superior e inferior de uno de los siguientes: - Cuando CODX es 1, el voltaje en el bus controlado. - Cuando CODX es 2, el flujo de potencia reactiva en el transformador en el extremo del bus del devanado indicado en Mvar - Cuando CODX es 3, el flujo de potencia activa hacia el transformador en el extremo del bus del devanado indicado en MW

Campo	Descripción
NTP1 NTP2 NTP3	El número de posiciones de toma disponibles para el devanado indicado.
TAB1 TAB2 TAB3	El número de la tabla de corrección de impedancia del transformador que se aplicará al devanado del transformador indicado.
CR1, CX1 CR2, CX2 CR3, CX3	La impedancia de compensación de caída de carga para transformadores de control de voltaje ingresada en pu en la base del sistema. (Se usa cuando CODX es 1)
CNXA1 CNXA2 CNXA3	El ángulo de conexión del devanado en grados. (Se usa cuando CODX es 5)

Tabla A-7-2- Definiciones de campo del archivo de datos Seq

Campo	Descripción
yo	Barra conectada al devanado 1.
j	Bus conectado al devanado 2.
k	Barra conectada al devanado 3 o 0 para un transformador de dos devanados.
ICKT	Identificador de circuito
CZ0	El código de E/S de datos de impedancia sin conexión a tierra define las unidades en las que se especifican los valores de impedancia Z01, Z02 y Z03: 1) por unidad en base MVA y devanado base X tensión 2) por unidad en una base de MVA especificada y base de tensión X de devanado Para transformadores de dos devanados, el valor CZ0 debe configurarse en 1 cuando se usan los códigos de conexión del 1 al 9. Para transformadores de tres devanados, el valor CZ0 debe configurarse en 1 cuando se usan los códigos de conexión de un solo dígito del 1 al 6, o códigos de conexión de 3 dígitos. códigos de conexión utilizando los dígitos del 1 al 7.
CZG	El código de E/S de datos de impedancia de puesta a tierra define las unidades en las que se especifican los valores de impedancia ZG1, ZG2, ZG3 y ZNUTRL: 1) para por unidad en sistema MVA base y devanado o terminal base de tensión 2) por unidad en una base de MVA especificada y base de voltaje de devanado o terminal 3) para ohmios Para transformadores de dos devanados, el valor CZG debe configurarse en 1 cuando se usan los códigos de conexión del 1 al 9. Para transformadores de tres devanados, el valor CZG debe configurarse en 1 cuando se usan los códigos de conexión de un solo dígito del 1 al 6, o códigos de conexión de 3 dígitos. códigos de conexión utilizando los dígitos del 1 al 7.
CC	El código de conexión de devanado que indica las rutas de conexión y tierra que se utilizarán en el modelado del transformador en la red de secuencia cero. Las opciones válidas para transformadores de dos devanados son: 1) ruta en serie, sin ruta a tierra 2) sin ruta en serie, ruta a tierra en el devanado 1 lado 3) sin ruta en serie, ruta a tierra en el lado del devanado 2 4) sin caminos en serie o de tierra 5) ruta en serie, ruta de tierra en el lado del devanado 2 6) sin ruta en serie, ruta a tierra en el lado del devanado 1, transformador de puesta a tierra en el lado del devanado 2 7) sin ruta en serie, transformador de puesta a tierra en el lado del devanado 1, ruta a tierra en el lado del devanado 2 8) ruta en serie, ruta de tierra en cada lado 9) ruta en serie a cada lado, ruta de tierra en el punto de unión de las dos rutas en serie 20) ruta en serie en cada lado, ruta a tierra en el punto de unión de las dos rutas en serie (transformador de tipo de núcleo con conexión a tierra en estrella - conexión a tierra en estrella) 21) ruta en serie, sin ruta a tierra (conexión a tierra en estrella - conexión a tierra en estrella sin transformador automático de tipo núcleo) 22) ruta en serie sin ruta a tierra (autotransformador tipo núcleo sin conexión a tierra estrella - estrella) Las opciones 11 a 19 son las mismas que las opciones 1 a 9, pero permiten que CZ0 y CG0 sean valores distintos de 1. Las opciones válidas para transformadores de tres devanados son: 1) ruta en serie en los tres devanados, devanado 1 ruta de tierra en el bus de punto de estrella (5-1-1) 2) trayectoria en serie en los devanados 1 y 2, devanado 3 trayectoria a tierra en la barra de estrella (1-1-3)

Campo	Descripción
	3)trayectoria en serie en el devanado 2, trayectorias a tierra desde los devanados 1 y 3 en la barra de puntos de estrella (3-1-3) 4)sin rutas en serie, rutas a tierra desde los tres devanados en el bus de punto de estrella (3-3-3) 5)trayectoria en serie en los devanados 1 y 3, trayectoria a tierra en la barra lateral del devanado 2 (1-2-1) 6)trayectoria en serie en los tres devanados, sin trayectoria a tierra (1-1-1) 17)ruta en serie en los devanados 1 y 2, ruta de tierra del devanado 3 en la barra de punto de estrella (autotransformador en estrella-estrella-triángulo) 18)ruta en serie en los devanados 1 y 2, sin ruta a tierra en el devanado 3 (autotransformador neutro sin conexión a tierra estrella-estrella-triángulo) Las opciones de la 11 a la 16 son las mismas que las de la 1 a la 6, pero permiten que CZ0 y CG0 sean valores distintos de 1.
RG1,XG1 RG2,XG2 RG3,XG3	La impedancia de puesta a tierra de secuencia cero en el devanado indicado para un transformador puesto a tierra por impedancia en unidades definidas por CZG. El código de conexión determina cómo definir este valor.
R01,X01 R02,X02 R03,X03	La impedancia de secuencia cero del devanado indicado en unidades definidas por CZ0. El código de conexión determina cómo definir este valor.
RNUTRL,XNUTRL	La impedancia de puesta a tierra del neutro común de secuencia cero en unidades definidas por CZG. Este valor solo es aplicable para CC $\geq$ 11.

Tabla A-7-3- Fuente de datos PSSE Seq

Tipo de transformador	Campo	Fuente de modelo genérico
YN-yn	CC	20
	RG1, XG1	RGH, XGH
	R01, X01	RM0, XM0
	RG2, XG2	RGX, XGX
	R02, X02	$(RH0+R'X0)/2, (XH0 +X'X0)/2$
YN-y	CC	12
	RG1, XG1	RM0, XM0
	R01, X01	ZGH, XGH
	RG2, XG2	No utilizado
	R02, X02	No utilizado
Y-yn	CC	13
	RG1, XG1	No utilizado
	R01, X01	RM0, XM0
	RG2, XG2	RGX, XGX
	R02, X02	No utilizado
Yy	CC	14
	RG1, XG1	No utilizado
	R01, X01	No utilizado
	RG2, XG2	No utilizado
	R02, X02	No utilizado
YN-d con transformador de puesta a tierra	CC	dieciséis
	RG1, XG1	RGH, XGH
	R01, X01	R0, X0
	RG2, XG2	No utilizado
	R02, X02	No utilizado
YN-d sin puesta a tierra transformador	CC	12
	RG1, XG1	RGH, XGH
	R01, X01	R0, X0
	RG2, XG2	No utilizado
	R02, X02	No utilizado
Yarda	CC	14
	RG1, XG1	No utilizado
	R01, X01	No utilizado
	RG2, XG2	No utilizado
	R02, X02	No utilizado
D-yn con transformador de puesta a tierra	CC	17
	RG1, XG1	No utilizado

Tipo de transformador	Campo	Fuente de modelo genérico
	R01, X01	No utilizado
	RG2, XG2	RGX, XGX
	R02, X02	R0, X0
D-yn sin puesta a tierra transformador	CC	13
	RG1, XG1	No utilizado
	R01, X01	No utilizado
	RG2, XG2	RGX, XGX
	R02, X02	R0, X0
dy	CC	14
	RG1, XG1	No utilizado
	R01, X01	No utilizado
	RG2, XG2	No utilizado
	R02, X02	No utilizado
Dd	CC	14
	RG1, XG1	No utilizado
	R01, X01	No utilizado
	RG2, XG2	No utilizado
	R02, X02	No utilizado
Autotransformador YN	CC	19
	RG1, XG1	No utilizado
	R01, X01	RH0+R'X0, XH0+X'X0
	RG2, XG2	RG, XG
	R02, X02	RM0, XM0
Y auto-transformador	CC	22
	RG1, XG1	No utilizado
	R01, X01	RM0, XM0
	RG2, XG2	No utilizado
	R02, X02	No utilizado
YN-yn-yn	CC	dieciséis
	RG1, XG1	RGH0, XGH0
	R01, X01	RHX0, XHX0
	RG2, XG2	RGH0, XGH0
	R02, X02	RHY0, XHY0
	RG3, XG3	RGY0, XGY0
	R03, X03	RXY0, XXY0
Todos los demás transformadores Yyy	CC	14
	RG1, XG1	No utilizado
	R01, X01	RHX0, XHX0
	RG2, XG2	No utilizado

Tipo de transformador	Campo	Fuente de modelo genérico
	R02, X02	RHY0, XHY0
	RG3, XG3	No utilizado
	R03, X03	RXY0, XXY0
YN-yn-d	CC	12
	RG1, XG1	RGH0, XGH0
	R01, X01	RHX0, XHX0
	RG2, XG2	RGX0, XGX0
	R02, X02	RHY0, XHY0
	RG3, XG3	No utilizado
	R03, X03	RXY0, XXY0
Todos los demás transformadores Yyd	CC	14
	RG1, XG1	No utilizado
	R01, X01	RHX0, XHX0
	RG2, XG2	No utilizado
	R02, X02	RHY0, XHY0
	RG3, XG3	No utilizado
	R03, X03	RXY0, XXY0
Todos los transformadores Dyy	CC	14
	RG1, XG1	No utilizado
	R01, X01	RHX0, XHX0
	RG2, XG2	No utilizado
	R02, X02	RHY0, XHY0
	RG3, XG3	No utilizado
	R03, X03	RXY0, XXY0
Autotransformador YN-d	CC	17
	RG1, XG1	No utilizado
	R01, X01	RHX0, XHX0
	RG2, XG2	RGY0, XGY0
	R02, X02	RHY0, XHY0
	RG3, XG3	No utilizado
	R03, X03	RXY0, XXY0
Autotransformadores Yd	CC	14
	RG1, XG1	No utilizado
	R01, X01	RHX0, XHX0
	RG2, XG2	No utilizado
	R02, X02	RHY0, XHY0
	RG3, XG3	No utilizado
	R03, X03	RXY0, XXY0

Ejemplo de transformador de dos devanados

Consulte la Tabla A-7-4 y la Tabla A-7-5 para conocer los valores .raw y .seq calculados para el ejemplo del transformador YY de dos devanados en la Sección 2.4.4. Las tablas no incluyen datos como números de bus y límites de voltaje que provienen de otras fuentes.

Tabla A-7-4- Datos sin procesar del PSS®E del transformador de dos devanados YY

Campo	Fuente	Valor
CW	Los voltajes de los devanados se ingresan en kV	2
CZ	Los valores de impedancia se convierten a la base de MVA del sistema y la base de voltaje del devanado	1
CM	Los valores de admitancia se convierten en base de MVA del sistema y base de tensión de barra de devanado 1	1
MAG1	Conductancia equivalente de pérdidas sin carga	0.000116
MAG2	Susceptancia de rama magnetizante	- 0.000136
ESTADO	Se supone que está en servicio	1
R1-2	Pérdidas de carga resistencia equivalente	0.018516
X1-2	Reactancia de dispersión de los devanados	0.511665
SBASE1-2	Prueba base MVA	15
VIENTOV1	Voltaje de devanado primario	138
NOMV1	Voltaje de devanado primario	138
ANG1	Ángulo de cambio de fase del devanado primario	0
RATA1	Primera calificación (supone que XFRRAT especifica MVA)	15
RATB1	Segunda calificación (supone que XFRRAT especifica MVA)	20
RATC1	Tercera calificación (supone que XFRRAT especifica MVA)	25
NTP1	Número de pasos de toque	17
TAB1	Se supone que es 0	0
VIENTOV2	Voltaje de devanado secundario	26.5
NOMV2	Voltaje de devanado secundario	25

Tabla A-7-5- Datos de secuencia de PSSE del transformador de dos devanados YY

Campo	Fuente	Valor
CZ0	Elegido por su compatibilidad con versiones anteriores de PSS®E	1
CG0	Elegido por su compatibilidad con versiones anteriores de PSS®E	1
CC	Elegido según el tipo de transformador y si sus devanados están conectados a tierra.	20
RG1	Determinado por CC	0
XG1	Determinado por CC	0
R01	Determinado por CC	0.52133
X01	Determinado por CC	0
RG2	Determinado por CC	0
XG2	Determinado por CC	0
R02	Determinado por CC	3.0620
X02	Determinado por CC	0
RNEUTRL	No utilizado	0
XNEUTRL	No utilizado	0

Ejemplo de transformador de tres devanados

Consulte la Tabla A-7-6 y la Tabla A-7-7 para conocer los valores .raw y .seq calculados para el ejemplo del transformador YY de dos devanados en la Sección 3.4.4. Las tablas no incluyen datos como números de bus y límites de voltaje que provienen de otras fuentes.

Tabla A-7-6 - Datos sin procesar del PSSE del transformador de tres devanados YYY

Campo	Fuente	Valor
CW	Los voltajes de los devanados se ingresan en kV	2
CZ	Los valores de impedancia se convierten a la base de MVA del sistema y la base de voltaje del devanado	1
CM	Los valores de admitancia se convierten en base de MVA del sistema y base de tensión de barra de devanado 1	1
MAG1	Conductancia equivalente de pérdidas sin carga	0.000457
MAG2	Susceptancia de rama magnetizante	- 0.005764
ESTADO	Se supone que está en servicio	1
R1-2	Resistencia equivalente de pérdidas de carga del devanado primario	0
X1-2	Reactancia de fuga del devanado primario	0.027511
SBASE1-2	Prueba de devanado primario base MVA	25
R2-3	Resistencia equivalente de pérdidas de carga del devanado secundario	0
X2-3	Reactancia de fuga del devanado secundario	0.37682
SBASE2-3	Prueba de devanado secundario base MVA	25
R3-1	Resistencia equivalente de pérdidas de carga del devanado terciario	0
X3-1	Reactancia de dispersión del devanado terciario	0.37557
SBASE3-1	Prueba de devanado terciario base MVA	15
VIENTO1	Voltaje de devanado primario	245
NOMV1	Voltaje de devanado primario	245
ANG1	Ángulo de cambio de fase del devanado primario	0
RATA1	Primera clasificación del devanado primario (supone que XFRRAT especifica MVA)	50
RATB1	Segundo valor nominal del devanado primario (supone que XFRRAT especifica MVA)	66.7
RATC1	Tercera clasificación del devanado primario (supone que XFRRAT especifica MVA)	83.3
NTP1	Número de devanado primario de pasos de derivación	24
TAB1	Se supone que es 0	0
VIENTO2	Voltaje de devanado secundario	26
NOMV2	Voltaje de devanado secundario	26
ANG2	Ángulo de cambio de fase del devanado secundario	0
RATA2	Primera clasificación del devanado secundario (supone que XFRRAT especifica MVA)	25
RATB2	Segundo valor nominal del devanado secundario (supone que XFRRAT especifica MVA)	33.3
RATC2	Tercera clasificación del devanado secundario (supone que XFRRAT especifica MVA)	41.7
NTP2	Devanado secundario número de pasos de derivación	1
TAB2	Se supone que es 0	0
VIENTO3	Voltaje de devanado terciario	26

Campo	Fuente	Valor
NOMV3	Voltaje de devanado terciario	26
ANG3	Ángulo de cambio de fase del devanado terciario	0
RATA3	Primera clasificación del devanado terciario (supone que XFRRAT especifica MVA)	25
RATB3	Segundo valor nominal del devanado terciario (supone que XFRRAT especifica MVA)	33.3
RATC3	Tercera clasificación del devanado terciario (supone que XFRRAT especifica MVA)	41.7
NTP3	Devanado terciario número de pasos de derivación	1
TAB3	Se supone que es 0	0

Tabla A-7-7- Datos de secuencia de PSSE del transformador de dos devanados YY

Campo	Fuente	Valor
CZ0	Elegido por su compatibilidad con versiones anteriores de PSS®E	1
CG0	Elegido por su compatibilidad con versiones anteriores de PSS®E	1
CC	Elegido según el tipo de transformador y si sus devanados están conectados a tierra.	dieciséis
RG1	Determinado por CC	0
XG1	Determinado por CC	0
R01	Determinado por CC	0.32555
X01	Determinado por CC	0
RG2	Determinado por CC	0
XG2	Determinado por CC	0.15416
R02	Determinado por CC	0.32552
X02	Determinado por CC	0
RG3	Determinado por CC	0
XG3	Determinado por CC	0.15416
R03	Determinado por CC	0.65111
X03	Determinado por CC	0
RNEUTRL	No utilizado	0
XNEUTRL	No utilizado	0

Apéndice B. Cambiador de tomas

Técnicamente, existen dos tipos genéricos de cambiadores de tomas en carga en los transformadores de potencia: en el tanque y en compartimiento separado [10].

El tipo de cambiador de tomas en el tanque (el tipo Jansen) se asienta en el aceite del transformador principal junto con el conjunto del núcleo y la bobina, y se monta cerca de la cubierta del transformador. Este tipo de cambiador de tomas se utiliza en el extremo neutro de transformadores monofásicos o trifásicos conectados en Y. Para transformadores trifásicos, se deben utilizar tres cambiadores de tomas monofásicos. Por lo general, este tipo de cambiador de tomas se usa para niveles altos de voltaje o corrientes.

El tipo de cambiador de tomas de compartimiento separado tiene su propio tanque, que se ensambla por separado del transformador. Está atornillado al costado del tanque y conectado a los devanados con tomas del transformador a través de un tablero de conexión. Algunos cambiadores de tomas de compartimiento separado tienen dos compartimientos: uno para el interruptor de desvío y el otro para el interruptor selector y cualquier interruptor de cambio. Están disponibles en ensamblajes trifásicos y conectados en Y para aplicación en el extremo neutro de un transformador trifásico o completamente aislados para aplicación en el extremo de la línea. Para las conexiones en Y, es económico colocar el cambiador de tomas en el extremo neutro de la conexión porque esa ubicación requiere niveles de aislamiento más bajos.

Dependiendo de la ubicación del devanado de derivación en el transformador, puede operar con un voltio fijo por vuelta o un voltio variable por vuelta. Para mantener constante el voltaje por vuelta, el cambiador de tomas debe conectarse al lado regulado del transformador. Por lo general, el lado de bajo voltaje de un transformador tiene un voltaje regulado. Si se coloca un cambiador de tomas en ese lado, para una conexión en Y es más económico colocarlo en el extremo neutro de bajo potencial porque su nivel de aislamiento puede ser menor. Para un devanado de alta corriente, el costo de un cambiador de tomas de este tipo afecta significativamente el diseño total del transformador. Debido a que hay menos vueltas en el devanado de bajo voltaje y no se pueden usar vueltas fraccionarias, a menudo no es práctico tener el cambiador de tomas en el lado de bajo voltaje. El enfoque económico para resolver el problema de la alta corriente es colocar el cambiador de tomas en el lado de alta tensión del transformador; con esta disposición todavía se puede regular el lado de baja tensión. Esto es aplicable si el lado de alto voltaje está conectado en Y porque el cambiador de tomas se puede colocar en el extremo neutral, y si el transformador está conectado automáticamente, la corriente se reduce. De esta forma, si se regula el lado de baja tensión, el voltaje por vuelta será variable en el transformador. Si se coloca un cambiador de tomas en el lado regulado, el voltaje por vuelta será constante. El volt por vuelta variable en algunos casos puede ser técnica o económicamente la única solución; sin embargo, tiene las siguientes desventajas: Esto es aplicable si el lado de alto voltaje está conectado en Y porque el cambiador de tomas se puede colocar en el extremo neutral, y si el transformador está conectado automáticamente, la corriente se reduce. De esta forma, si se regula el lado de baja tensión, el voltaje por vuelta será variable en el transformador. Si se coloca un cambiador de tomas en el lado regulado, el voltaje por vuelta será constante. El volt por vuelta variable en algunos casos puede ser técnica o económicamente la única solución; sin embargo, tiene las siguientes desventajas: El volt por vuelta variable en algunos casos puede ser técnica o económicamente la única solución; sin embargo, tiene las siguientes desventajas: El volt por vuelta variable en algunos casos puede ser técnica o económicamente la única solución; sin embargo, tiene las siguientes desventajas:

- 1) El núcleo normalmente está diseñado para el flujo máximo en circuitos electromagnéticos. El flujo del núcleo es proporcional al voltio por vuelta en un transformador. El voltaje variable por vuelta provoca el flujo variable en el núcleo. Dado que las vueltas mínimas requieren que el núcleo lleve el flujo máximo, el núcleo debe diseñarse para las vueltas mínimas. En consecuencia, para un voltaje variable por vuelta, el núcleo sería más grande que su contraparte de voltios fijos por vuelta. Por lo tanto, el núcleo solo se usaría con la máxima eficiencia en la posición de giro mínimo del cambiador de tomas.

- 2) En un transformador de flujo variable, la variación de voltaje por paso no es constante, incluso si el número de vueltas por paso es constante. Esto se debe a que los voltios por vuelta cambian con la posición del paso.
- 3) Un transformador está diseñado para cumplir con ciertas pérdidas y niveles de sonido garantizados en la posición nominal, que generalmente es la posición media. Si el flujo varía en el núcleo, las pérdidas sin carga, la corriente de excitación, la impedancia y el nivel de sonido del transformador también variarán. Por lo tanto, podría exceder significativamente los valores garantizados en las posiciones inferiores a la nominal.
- 4) El voltaje del tercer devanado del transformador variará a medida que se mueva el cambiador de tomas, lo que podría no ser deseable.

Otro enfoque que se puede tomar para colocar un cambiador de tomas en el lado de alto voltaje es usar un transformador auxiliar. Cuando se desea la regulación en el lado de bajo voltaje de un transformador de corriente relativamente alta, el uso de un transformador auxiliar puede ser económico. La Figura B-1 muestra dos conexiones que utilizan un transformador auxiliar para regular el voltaje [10].

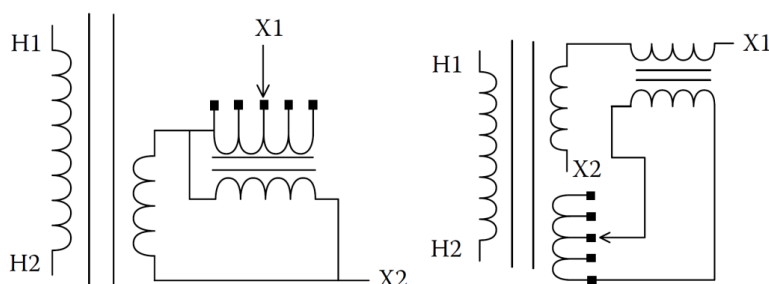


Figura B-1- a) Regulador de voltaje en serie, b) Transformador elevador en serie

En la práctica, la conexión de un regulador de voltaje en serie no ayuda a mitigar los problemas de alta corriente de un cambiador de tomas, pero el transformador principal puede optimizarse independientemente del regulador de voltaje en serie. En una conexión de refuerzo en serie, el devanado de derivación está separado de los devanados del transformador principal; por lo tanto, se puede seleccionar el número de vueltas por paso para que el cambiador de toma lleve corrientes más pequeñas.

Apéndice C. Teoría de redes de dos puertos

C.1. Visión general

La teoría de la red de dos puertos se utiliza para describir la relación entre un par de terminales. En esta guía, el análisis se restringe a redes lineales sin ninguna fuente independiente, lo cual es suficiente para el modelado de transformadores.

En la Figura C-1 se muestra un diagrama esquemático de una red de dos puertos. Cada sistema de dos puertos tiene exactamente dos ecuaciones gobernantes que muestran la relación entre el voltaje y la corriente en las terminales.



Figura C-1- Tensiones y corrientes en una red de dos puertos

Las ecuaciones se pueden escribir en términos de cualquier par de variables de red y, según las variables que se utilicen, los parámetros se denominan impedancia, admitancia, híbrido, híbrido inverso, transmisión y transmisión inversa. En esta guía, los parámetros de admitancia e impedancia se analizan en detalle.

C.1. Parámetros de admitancia de una red de dos puertos

Las siguientes ecuaciones podrían usarse como ecuaciones rectoras de la red de dos puertos (los coeficientes son parámetros de admitancia):

$$\begin{aligned} i_1 &= y_{11} V_1 + y_{12} V_2 \\ i_2 &= y_{21} V_1 + y_{22} V_2 \end{aligned}$$

Para calcular los parámetros en las ecuaciones anteriores, se deben realizar dos pruebas en el sistema, y en cada prueba se deben medir dos variables de red. La Figura C-2 muestra una de las pruebas, que consiste en cortocircuitar el puerto dos ($V_2=0$), aplicar el voltaje V_1 en el puerto uno y medir la corriente en ambos puertos (i_1 e i_2). Los parámetros Y_{11} e Y_{21} se calculan usando las fórmulas dadas.

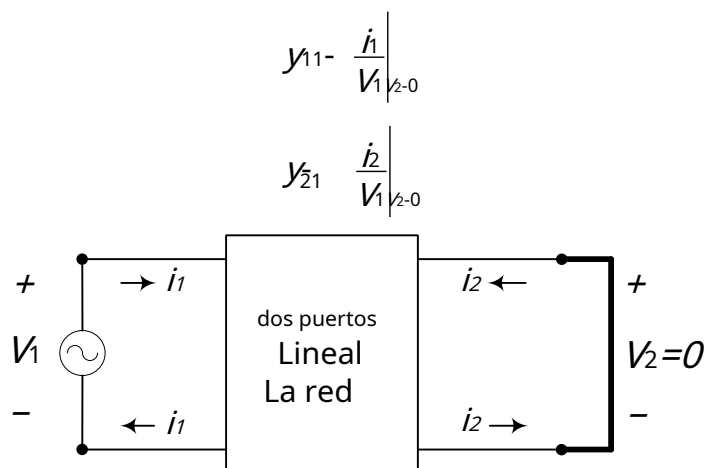


Figura C-2- Configuración de prueba para el cálculo de parámetros de admitancia (1/2)

La segunda prueba consiste en cortocircuitar el puerto uno ($V_1=0$), aplicar el voltaje V_2 en el puerto dos y medir las corrientes en ambos puertos. Los parámetros Y_{12} e Y_{22} se calculan usando las fórmulas dadas.

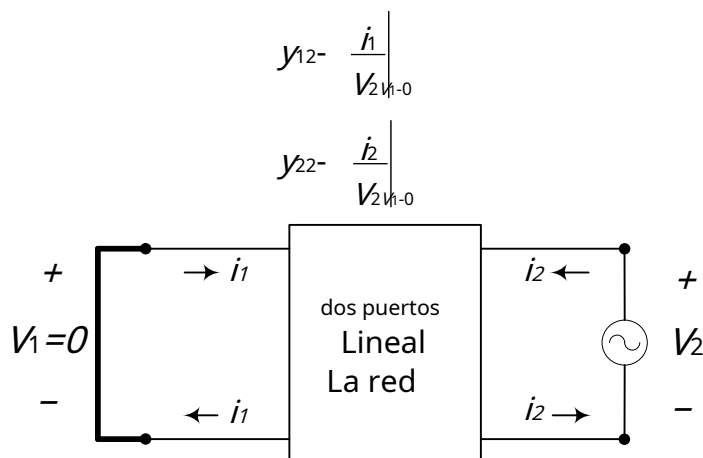


Figura C-3- Configuración de prueba para el cálculo de parámetros de admitancia (2/2)

El siguiente circuito se llama circuito equivalente PI. Solo podría implementarse para sistemas en los que $Y_{12}=Y_{21}$. Para redes lineales pasivas, como un transformador de dos devanados, las tres impedancias en el equivalente de PI serán positivas.

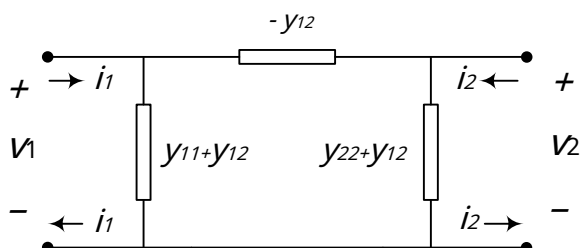


Figura C-4- Circuito equivalente PI para una red lineal de dos puertos

C.2. Parámetros de impedancia de una red de dos puertos

Las siguientes ecuaciones podrían usarse como las ecuaciones gobernantes de la red. Los coeficientes son parámetros de impedancia.

$$\begin{aligned} V_1 &= Z_{11} i_1 + Z_{12} i_2 \\ V_2 &= Z_{21} i_1 + Z_{22} i_2 \end{aligned}$$

Para calcular los parámetros en las ecuaciones anteriores, se deben realizar dos pruebas en el sistema, y en cada prueba se deben medir dos variables de red. La Figura C-5 muestra una de las pruebas, que consiste en dejar el Puerto Dos abierto ($i_2=0$), aplicar voltaje V_1 en el Puerto Uno y medir la corriente en el Puerto Uno y el voltaje en el Puerto Dos. Usando las fórmulas dadas, se calculan los parámetros Z_{11} y Z_{21} .

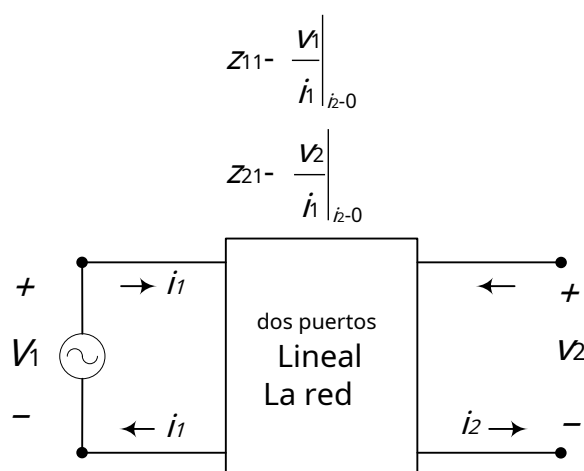


Figura C-5- Configuración de prueba para el cálculo de parámetros de impedancia (1/2)

La segunda prueba consiste en dejar el puerto uno abierto ($i_1=0$), aplicar voltaje V_2 en el puerto dos y medir la corriente en el puerto dos y el voltaje en el puerto uno. Usando las siguientes fórmulas, se calculan los parámetros Z_{12} y Z_{22} .

$$\begin{aligned} Z_{12} &= \frac{V_1}{i_2} \bigg|_{i_1=0} \\ Z_{22} &= \frac{V_2}{i_2} \bigg|_{i_1=0} \end{aligned}$$

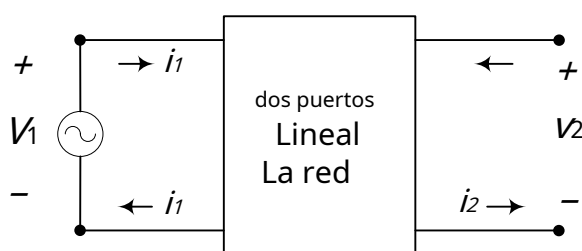


Figura C-6- Configuración de prueba para cálculo de parámetros de admitancia (2/2)

El siguiente circuito se denomina circuito equivalente T, que podría implementarse solo para sistemas en los que $Z_{12} = Z_{21}$. Esta condición es cierta para redes lineales pasivas, como un transformador de dos devanados. Las tres impedancias en el circuito T-equivalente serán positivas en tales sistemas.

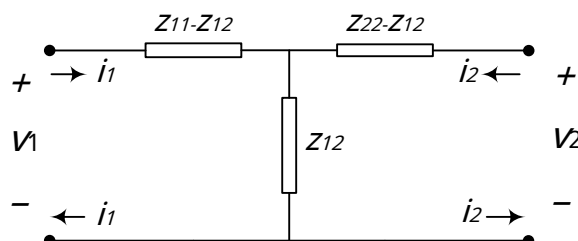


Figura C-7- Circuito T-equivalente para una red lineal de dos puertos

El modelo T y el modelo π podrían convertirse fácilmente al otro utilizando la conversión estrella-triángulo estándar.

C.3. Transformador de dos devanados como red de dos puertos

Para simplificar, un circuito equivalente de transformador transferido al lado de alta tensión sin un transformador ideal se considera como una red de dos puertos de un transformador. La Figura C-8 muestra un modelo T de un transformador de dos devanados.

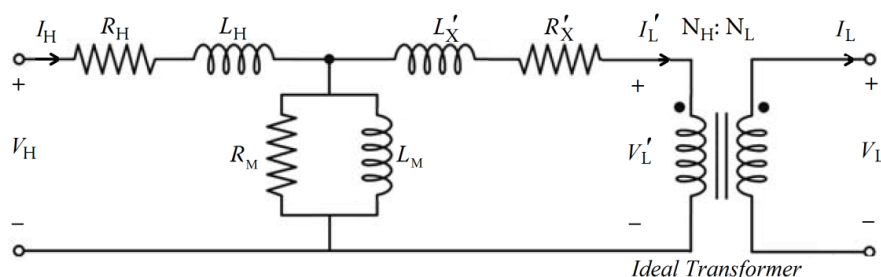


Figura C-8- Modelo T de un transformador de dos devanados

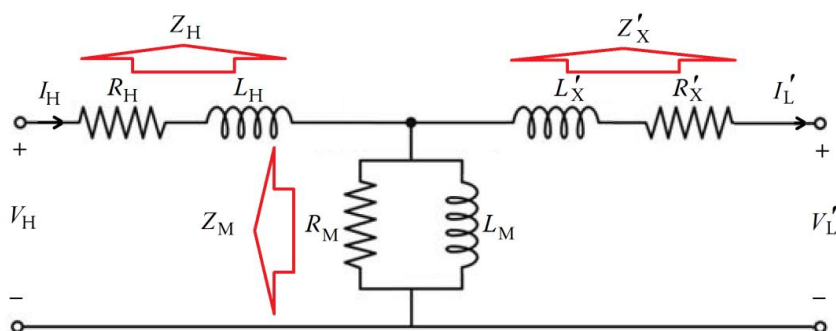


Figura C-9- Circuito equivalente del transformador transferido al lado de alta tensión como un circuito de dos red de puertos

$$V_H (Z_H Z_{METRO}) - y_{OH} Z_{METRO} - y_{OL}$$

$$V'_L Z_{METRO} - y_{OL} (Z'_X Z_{METRO}) - y_{OH}$$

La matriz de impedancia de transferencia, Z, es:

$$Z = \begin{bmatrix} -Z_H Z_{METRO} & -Z_{METRO} \\ -Z_{METRO} & -Z'_X Z_{METRO} \end{bmatrix}$$

La matriz de admitancia de transferencia, Y, es una inversión de la matriz de impedancia:

$$Y = \begin{bmatrix} \frac{Z'_X Z_{METRO}}{Z_H Z'_X Z_{METRO} - Z_L Z_{METRO}} & \frac{Z_{METRO}}{Z_H Z'_X Z_{METRO} - Z_L Z_{METRO}} \\ \frac{Z_{METRO}}{Z_H Z'_X Z_{METRO} - Z_L Z_{METRO}} & \frac{Z_H Z_{METRO}}{Z_H Z'_X Z_{METRO} - Z_L Z_{METRO}} \end{bmatrix}$$

Sustituyendo estos parámetros en la Figura C-4 se obtiene C-10. Por lo tanto, C-10-b se puede derivar como el modelo π exacto del transformador si se tiene en cuenta un transformador ideal.

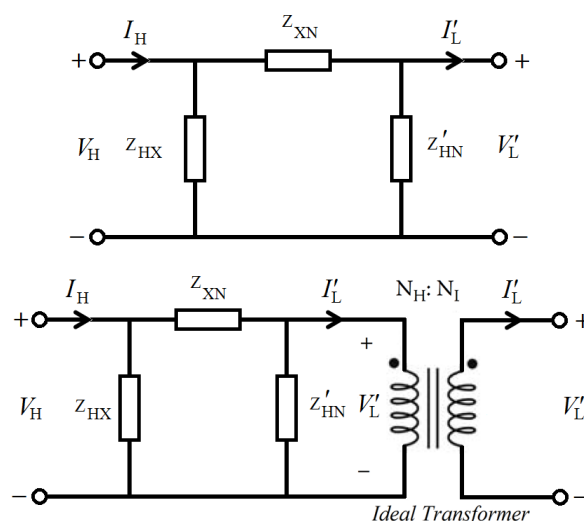


Figura C-10- π -Modelo de transformador de dos devanados: Parámetro transferido al lado tensión, a) Sin transformador ideal, b) Con transformador ideal

en el cual:

$$Z_{hn} = Z_{METRO} \left(1 - \frac{Z_H}{Z_X} - \frac{Z_H}{Z_{METRO}} \right)$$

$$Z_{XN} = Z_{METRO} \left(1 - \frac{Z_X}{Z_H} - \frac{Z_X}{Z_{METRO}} \right)$$

$$Z_{HX} = Z_H + Z_X - \frac{Z_H Z_X}{Z_{METRO}}$$

En un transformador bien diseñado, suponiendo que las densidades de corriente en ambos devanados son iguales, aproximadamente igual a . Por lo tanto:

$$Z_{hn} = Z_{METRO} \left(2 - \frac{Z_H}{Z_{METRO}} \right)$$

$$Z_{XN} = Z_{METRO} \left(2 - \frac{Z_H}{Z_{METRO}} \right)$$

$$Z_{HX} = \frac{1}{2} (Z_H + Z_X) \left(2 - \frac{Z_H}{Z_{METRO}} \right)$$

En la Sección 1.4 se establece que la corriente de magnetización es del 2 al 3% de la corriente a plena carga. Además, de acuerdo con el estándar IEEE, se espera que la reactancia en serie sea del 7 % en una potencia típica.

transformador. En consecuencia, la proporción $\frac{Z_M}{Z_H}$ nunca supera el 1% ($\frac{7\%}{2} = 3.5\%$); por lo tanto, el anterior

La ecuación se puede simplificar de nuevo de la siguiente manera:

Como resultado, cuando no se conoce la información interna, para separar el efecto de magnetización en dos ramas, los parámetros de magnetización medidos se pueden duplicar para construir el modelo π del transformador. La relación entre los parámetros del modelo T y el modelo π , como se muestra en la Figura C-11, se presenta de la siguiente manera:

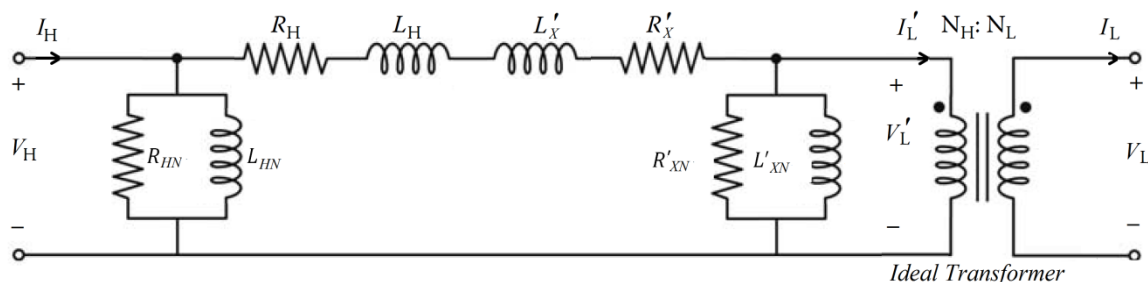


Figura C-11- π - Modelo de transformador de dos devanados, (modelo aproximado)

C.4. Verificación con un Ejemplo Práctico: Secuencia Positiva o Negativa π - Modelo Circuito Equivalente

Los parámetros del transformador calculados a partir de los resultados de las pruebas mientras el circuito equivalente del transformador se ha transferido al lado de bajo voltaje se enumeran en la Tabla C-1. Dado que no hay forma de saber cómo se pueden dividir los parámetros de pérdidas de carga entre dos devanados, como se mencionó, un método aproximado es dividirlo en dos valores iguales.

Tabla C-1- Parámetros de Secuencia Positiva o Negativa del Transformador en pu (@ 100 MVA y 25kV)

	PU
R	0.02386
X	0.55305
GRAMO	0.00014
B	0.00022

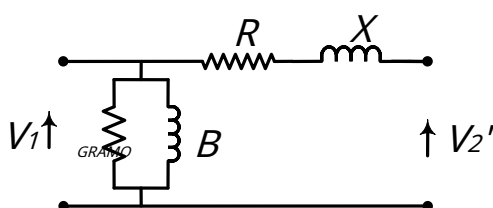


Figura C-12- Modelo de transformador según los resultados de la prueba

Para derivar el modelo T del transformador, como se muestra en la Figura C-9, la impedancia en serie se divide en dos impedancias iguales. Sustituyendo estos parámetros en las ecuaciones del modelo π se obtiene:

en el cual

$$\begin{aligned} Z_{12} &= \frac{R}{2} + j\frac{X}{2} \\ Y_{12} &= \frac{B}{2} + j\frac{GRAMO}{2} \end{aligned}$$

Estas dos ecuaciones muestran que el enfoque presentado para derivar el circuito equivalente del modelo π del modelo T tiene un error muy pequeño.

C.4.1. YY Circuito equivalente de secuencia cero del transformador conectado

En la Sección 1.15.3, se establece que el circuito equivalente de secuencia cero de los transformadores varía según el tipo de conexión del transformador y la estructura del núcleo. En la Tabla 1-2 se enumeran los circuitos equivalentes de secuencia cero de diferentes tipos de conexión de transformador.

El modelo π se puede derivar del modelo T solo para una conexión Yy conectada a tierra en ambos lados, porque para los otros tipos de conexiones, el circuito equivalente de secuencia cero no es una red de dos puertos. El procedimiento para derivar el modelo π del modelo T es el mismo que se describió anteriormente, excepto que las impedancias de tierra deben tenerse en cuenta en el cálculo de la red de dos puertos. El subíndice "0" denota los parámetros de secuencia cero. La Figura C-13 muestra el modelo de secuencia de fase cero de un transformador conectado en Yg-Yg. Como se muestra en la Figura C-14, el

La impedancia de tierra del lado de bajo voltaje y la impedancia del devanado del lado de bajo voltaje transferida al lado de alto voltaje constituyen el circuito equivalente de secuencia cero del modelo T (que es similar a un circuito equivalente de secuencia positiva o negativa). Este modelo T se considera como una red de dos puertos de secuencia cero para derivar el modelo π de secuencia cero.

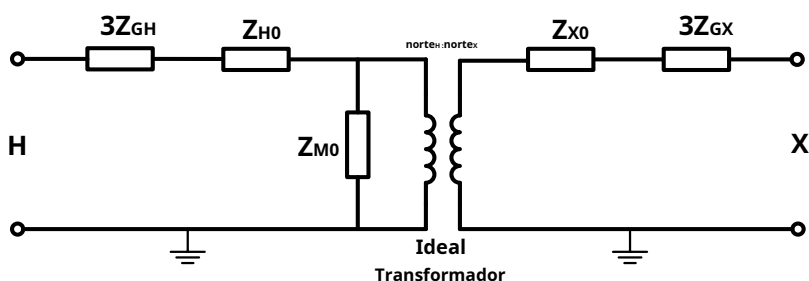


Figura C-13- Modelo homopolar de un transformador conectado en Yg-Yg

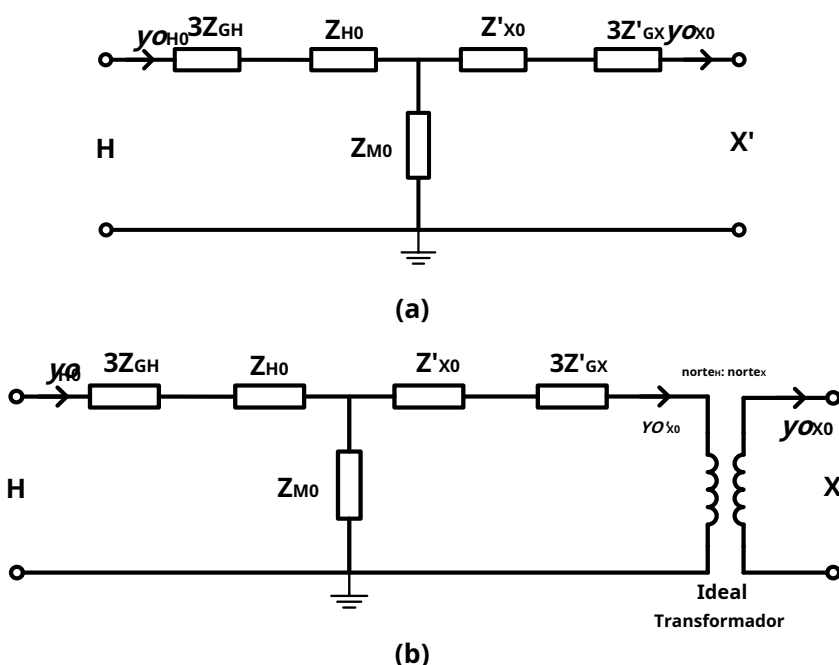


Figura C-14- Modelo T homopolar, parámetro transferido al lado de alta tensión, a) Sin transformador ideal, b) Con transformador ideal

Las ecuaciones de voltaje de la red de dos puertos para el modelo T que se muestra en la Figura C 14-a son las siguientes:

$$V_{H0} - (Z_{H0} - 3Z_{GH} - Z_{METRO0}) - y_{O_{H0}} - Z_{METRO0} - y_{O'_{X0}}$$

$$V'_{X0} - Z_{METRO0} - y_{O_{H0}} - (Z'_{X0} - 3Z_{GX} - Z_{METRO0}) - y_{O'_{X0}}$$

La matriz de impedancia de transferencia es:

$$Z_0 = \frac{-Z_{H0} - 3Z_{GH} - Z_{METRO0}}{Z_0 - Z_{X0} - 3Z_{GX} - Z_{METRO0}}$$

Las ecuaciones actuales para el modelo π son las siguientes:

La matriz de admitancia de transferencia, Y , que es una inversión de la matriz de impedancia, es:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}$$

La sustitución de estos parámetros en la Figura C-4 da como resultado la Figura C-15. Por lo tanto:

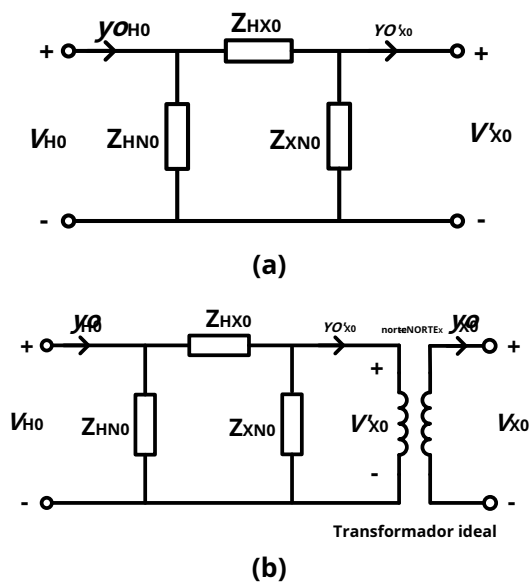
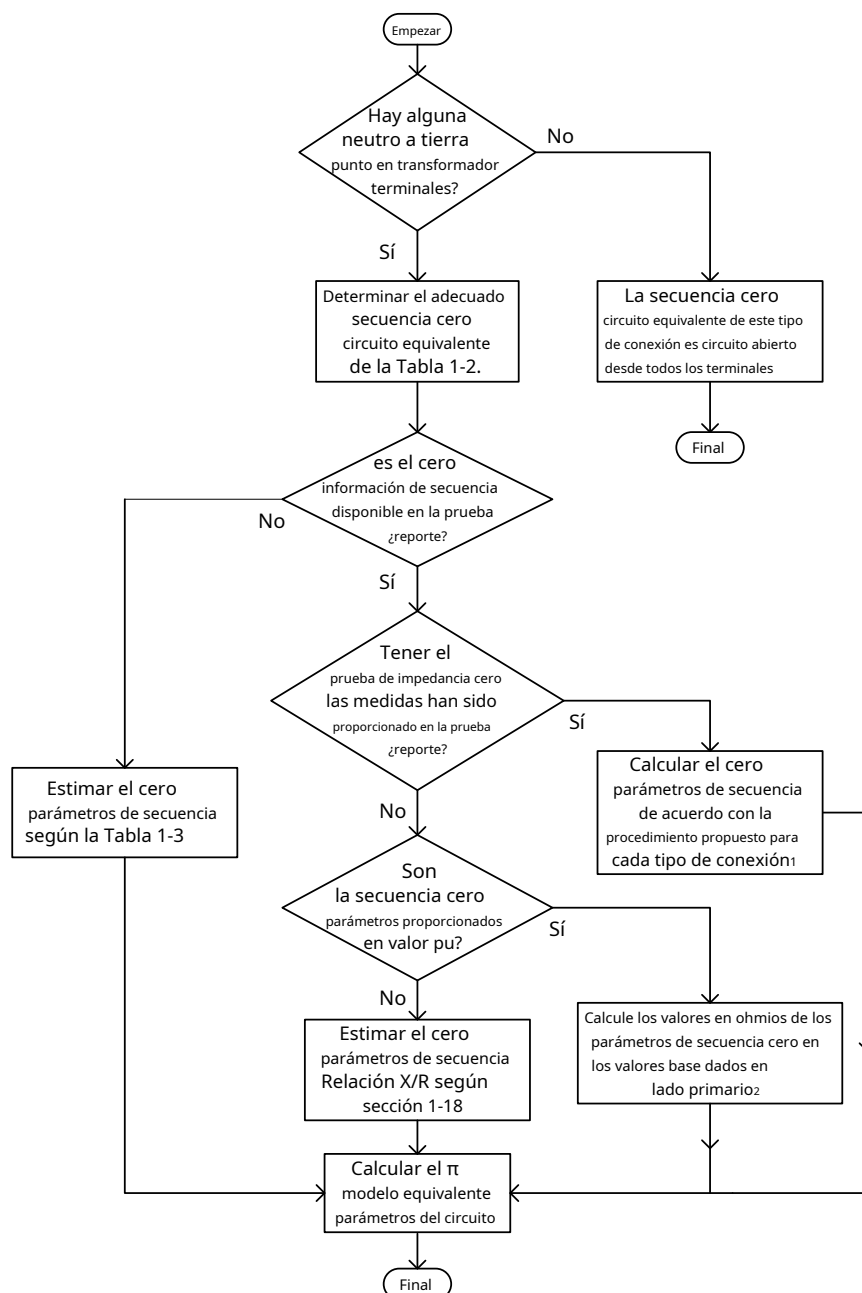


Figura C-15- Modelo π de secuencia cero, parámetro transferido al lado de alta tensión, a) Sin transformador ideal, b) Con transformador ideal

Apéndice D. Procedimiento para Modelar un Transformador en Cero-Seuencia



Apéndice E. El sistema por unidad

Un sistema de energía interconectado generalmente consta de muchos niveles de voltaje diferentes. En el sistema de Alberta, el voltaje nominal del bus en el sistema de transmisión debe ser uno de 500 kV, 240 kV, 138 kV o 69 kV, que puede diferir un poco del voltaje operativo real del sistema de transmisión en cualquier ubicación. La Tabla E-1 muestra los voltajes nominales típicos en la red de Alberta que han sido capturados de TASMo. El sistema por unidad simplifica el análisis de sistemas de energía complejos al elegir un conjunto común de parámetros básicos en términos de los cuales se definen todas las cantidades de los sistemas. Los diferentes niveles de tensión desaparecen y el sistema global se reduce a un conjunto de impedancias.

**Tabla E-1- Voltajes nominales típicos en la red de Alberta
(capturado de TASMo)**

kV	kV	kV	kV
11	20	125	230
11.5	20.5	130	239
12	21	132	240
12.47	22,9	134	245
12.75	23,9	135	246
13	23,9	138	250
13.2	24.49	138.6	251
13.2	24.76	138.8	252
13.5	24,9	139	255
13.73	24,9	140	256
13.8	24.94	142	260
13.8	25	142.4	263
13.86	26	142.5	265
14.2	26.4	142.9	500
14.4	26.5	143.13	525
14.7	27.5	144	
14.9	34.5	145	
15	66	147	
dieciséis	69	148.6	
18	69.07	152.4	
19	72		
19.5			

Las principales ventajas del sistema por unidad son:

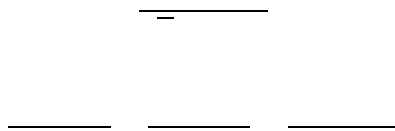
- 1) Los valores por unidad para la impedancia, el voltaje y la corriente del transformador son idénticos cuando se refieren al primario y al secundario. El transformador en un sistema por unidad es de una sola impedancia. No hay necesidad de reflejar las impedancias de un lado del transformador al otro lado.
- 2) Los valores por unidad de varios componentes se encuentran dentro de un rango estrecho, independientemente de la clasificación del equipo.
- 3) Los valores por unidad representan claramente los valores relativos de las cantidades del circuito. Se eliminan muchas de las constantes de escala en las ecuaciones.

La definición de cualquier cantidad (voltaje, corriente, potencia, impedancia) en el sistema por unidad es:

Para caracterizar un sistema por unidad, se deben definir al menos dos valores base. Una vez que se definen dos cualesquiera de los cuatro valores base (, , y), los dos valores base restantes se pueden determinar de acuerdo con sus relaciones de circuito fundamentales. Los valores base son valores reales, mientras que las cantidades según el análisis fasorial son complejas. Dados los cuatro valores base, las cantidades por unidad se definen como:

En la práctica, los valores base de potencia y voltaje generalmente se seleccionan y los valores base de corriente e impedancia se determinan de la siguiente manera:

En los sistemas trifásicos, las cuatro ecuaciones mencionadas anteriormente son las mismas si se tiene en cuenta la tensión de línea a línea en lugar de la tensión de fase excepto:



En los sistemas de potencia en los que es constante para todos los puntos del sistema, si la relación de voltaje bases a cada lado de un transformador se elige para igualar la relación de los valores nominales de voltaje del transformador, entonces la impedancia por unidad del transformador permanece sin cambios cuando se refiere de un lado del transformador al otro. Esto permite que el transformador ideal en el modelo de transformador pueda eliminarse como se muestra en la Figura 1-8.

Normalmente, el sistema de energía y son diferentes a los valores nominales de los transformadores como hay muchos tipos diferentes de transformadores con diferentes clasificaciones de MVA. Además, un transformador puede operar en una configuración de derivación no nominal que indica un nivel de voltaje diferente al nivel de voltaje nominal del sistema. Por lo tanto, los parámetros deben referirse de un sistema por unidad a otro sistema por unidad. Dados los dos sistemas por unidad como un sistema por unidad nuevo y uno antiguo, la impedancia por unidad se puede referir desde el sistema por unidad anterior al nuevo sistema por unidad de la siguiente manera:



Apéndice F. Tabla de impedancia del transformador

Los parámetros de un circuito equivalente de transformador dependen de la posición de derivación del transformador en la que se realizan las pruebas de pérdidas sin carga y pérdidas con carga. Ese circuito equivalente es más preciso para esa posición de toma. En la práctica, los transformadores de potencia están diseñados para funcionar de manera óptima a la tensión nominal, pero dado que la tensión en un sistema de potencia varía dentro de un límite aceptado, la relación de tensión del transformador debe ajustarse mediante cambiadores de tomas LTC o DETC. Los resultados de las pruebas de pérdidas con carga y sin carga del transformador que se utilizan para modelar el transformador se llevan a cabo a los voltajes nominales de los devanados y en la posición de derivación nominal. Sin embargo, en el informe de prueba, los resultados de la prueba de pérdidas de carga pueden informarse al mínimo, al máximo o en ambas posiciones de toma, así como en la posición de toma nominal.

Los parámetros de la rama de magnetización no cambian cuando cambia la posición del tap. Como se describe en la Sección 1.15.1, para una prueba de pérdidas sin carga, el transformador se energiza para dar el 100 % de los voltios pico por vuelta, lo que da como resultado un flujo del 100 % en el núcleo. Sin embargo, debido a las limitaciones técnicas, normalmente se excita un devanado de bajo voltaje, pero generalmente no importa cuántas vueltas se excitan para que se aplique el 100 % de los voltios pico por vuelta.

Como se describe en la Sección 1.13, la impedancia en serie de un transformador cambia cuando cambia la posición de toma. Este cambio se debe al número de vueltas de devanado de derivación que se introducen físicamente en el circuito o se extraen del circuito. Si se dispone de al menos dos resultados de pruebas de pérdidas de carga para dos posiciones de toma diferentes, se puede determinar el cambio de impedancia de una posición de toma a otra posición de toma. Suponiendo que la impedancia de los contactos del cambiador de tomas sea cero, el cambio de impedancia calculado puede extenderse a otras posiciones de toma y la tabla de corrección de impedancia aproximada puede determinarse en consecuencia.

Para presentar cómo la posición de la toma afecta el modelo de transformación, se supone un transformador con un cambiador de tomas LTC en el lado de alta tensión. Se supone que el voltaje en el lado de bajo voltaje es constante y la derivación se controla para compensar las variaciones de voltaje en el terminal del lado de alto voltaje. La figura F-1 muestra su circuito equivalente modelo T en el que el subíndice " " denota la posición de toma nominal en la que se ha calculado el circuito equivalente.

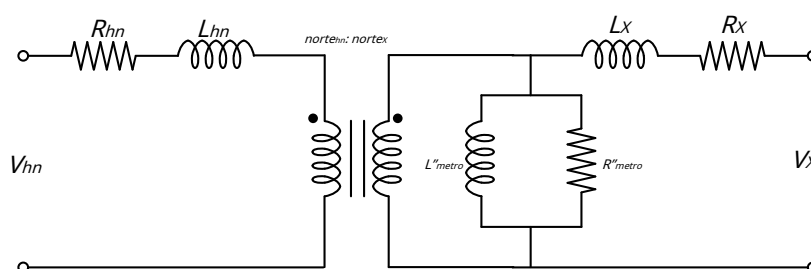


Figura F-1- Circuito equivalente del transformador modelo T en la posición de derivación nominal con el ramo magnetizante en el lado secundario

Como se mencionó anteriormente, la posición del grifo no afectará los parámetros de la rama de magnetización. Además, se supone que el voltaje es constante en el lado secundario; por lo tanto, considerando la

La rama de magnetización en el lado secundario aclara que sus parámetros no cambiarán con el cambiador de tomas. A pesar de la rama de magnetización, como se muestra en la Figura F-2, la impedancia en serie del devanado secundario también será constante para diferentes posiciones de derivación.

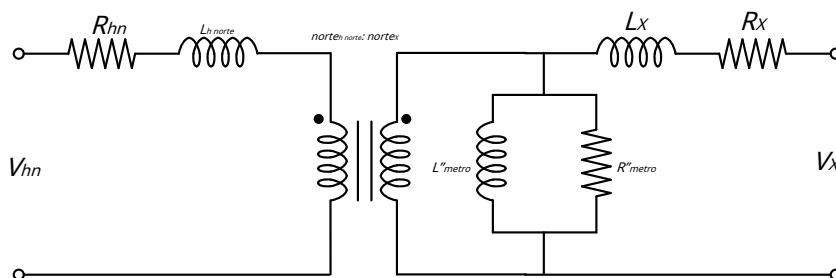


Figura F-2- Circuito equivalente del transformador modelo T en posición de derivación no nominal con el ramo magnetizante en el lado secundario

El efecto de la posición de toma sobre la resistencia y la reactancia de fuga del devanado de alto voltaje no es similar. Como se describe en la Sección 1.2.2.d, la resistencia equivalente del devanado incluye la resistencia de CC del devanado, las pérdidas por corrientes parásitas debidas a la corriente de carga, el efecto pelicular y las pérdidas por dispersión. El efecto sobre cada uno de estos componentes no solo depende del tipo de cambiador de tomas, sino también del tipo inherente de cada componente. Por lo tanto, el modelado teórico de este efecto depende del caso. En el tipo lineal de cambiadores de tomas, si el voltaje de posición de toma relacionado es más alto que el voltaje nominal (), el componente de resistencia de CC es mayor que la posición nominal resistencia dc, pero otros componentes son más pequeños que los componentes nominales. Cabe señalar que los demás componentes son totalmente más pequeños que el componente de resistencia de CC; por lo tanto, el cambio del componente de resistencia de CC es dominante.

El efecto de la posición de toma en la reactancia de fuga es diferente. Varía exponencialmente con el número efectivo (no total) de vueltas de bobinado. Sin embargo, este efecto es lineal en la resistencia de ca del devanado. En orden, las vueltas de bobinado para todas las posiciones de derivación se presentan en la placa de identificación del transformador; el efecto de la posición de la toma en la reactancia de fuga se puede determinar con mayor precisión. Pero, por lo general, el número de vueltas no se proporciona en la placa de identificación del transformador.

Como resultado, independientemente del tipo de cambiador de tomas, la impedancia en serie equivalente del transformador para todas las posiciones de toma se puede determinar a través de tres enfoques:

- 1) **Enfoque Uno:** Mediante mediciones de prueba en todas las posiciones de toma. Si se ha realizado una prueba de pérdidas de carga para todas las posiciones de toma, la impedancia en serie se puede calcular a partir de las mediciones de prueba para cada posición de toma mientras la rama de magnetización que se considera en el lado de bajo voltaje es constante. Como se muestra en la Figura F-3, , resistencia ac equivalente, y , la reactancia de fuga de los devanados, se determinan directamente a partir de los resultados de las pruebas de pérdidas de carga en posición del toque. En la práctica, el informe de prueba de un transformador no incluye mediciones de prueba de pérdidas de carga para todas las posiciones de derivación, excepto en el caso de transformadores especiales como los transformadores de cambio de fase, incluso si se han realizado pruebas de pérdidas de carga durante el proceso de fabricación, porque los resultados de las pruebas informadas son un informe de prueba resumido.

2) *Enfoque dos:* A través de la estimación de al menos dos resultados de prueba de pérdidas de carga proporcionados en el informe de prueba. Los informes de prueba de transformadores equipados con cambiadores de tomas generalmente incluyen resultados de pruebas de pérdidas de carga en la configuración de toma nominal y en las posiciones de toma mínima y máxima. La impedancia en serie equivalente y la resistencia de CA del devanado se pueden calcular para estas tres posiciones de derivación a partir de los resultados proporcionados. Para otras posiciones de toma, estos parámetros se pueden estimar a partir del ajuste de la curva y la interpolación entre los datos disponibles. Dado que las características de resistencia de CA y de reactancia de fuga del devanado frente a la posición de la toma son similares a una característica lineal, la estimación o el ajuste de la curva generalmente se puede lograr mediante un cálculo simple (la función de ajuste de la curva de MS-Excel [opciones de línea de tendencia] es adecuada para este propósito). Una curva polinómica de dos órdenes dará la mejor estimación. Sin embargo, se debe tener en cuenta que para los reguladores de voltaje escalonado y los transformadores de cambio de fase, las características de resistencia de CA y de reactancia de fuga de los devanados en comparación con la posición de la toma no son una característica lineal, y es posible que la función de ajuste de curvas de MS-Excel no pueda estimar un valor adecuado. curva o puede generar errores; en estos casos, se recomiendan otros programas numéricos.

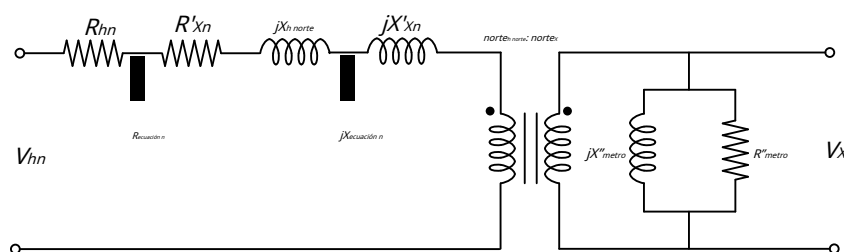


Figura F-3- Circuito equivalente del transformador en posición de derivación

3) *Enfoque tres:* Mediante cálculo de transferencia de impedancia. Si el informe de prueba del transformador incluye solo un informe de prueba de pérdidas de carga realizado en la posición de toma nominal, el único enfoque es considerar la operación del cambiador de toma como una relación de vueltas fuera de la nominal, como se explica en la Sección 1.13. Este enfoque no es un enfoque preciso y puede conducir a un valor de parámetros no reales, pero cualquier cálculo adicional o suposición no realista puede conducir a resultados no realistas. Este método se explica a continuación.

La Figura F-4 muestra un transformador que opera en un ajuste de derivación no nominal. Su circuito equivalente se ha derivado de los resultados de las pruebas que se han realizado en la posición de derivación nominal. La operación en la configuración de derivación no nominal se muestra como un transformador ideal en la terminal de alto voltaje. Este transformador ideal presenta la relación de vueltas fuera de la nominal.

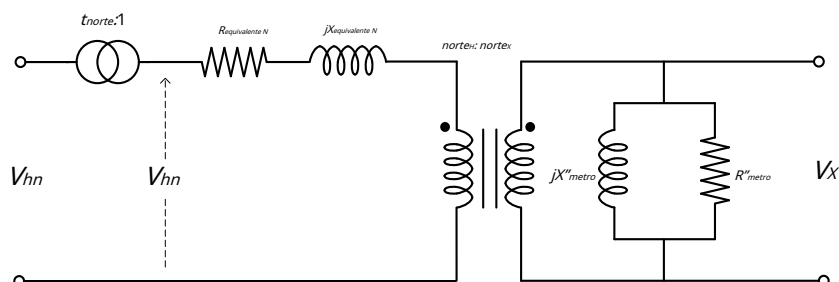


Figura F-4- Circuito equivalente de transformador en la posición de derivación nominal mientras que el ajuste de derivación no nominal se muestra como un transformador ideal en la terminal (presentando relación de vueltas nominal)

La impedancia en serie se puede referir al lado terminal del transformador ideal de relación de espiras fuera de la nominal, como se muestra en la Figura F-5. Estas impedancias se pueden obtener como:

En el cual:

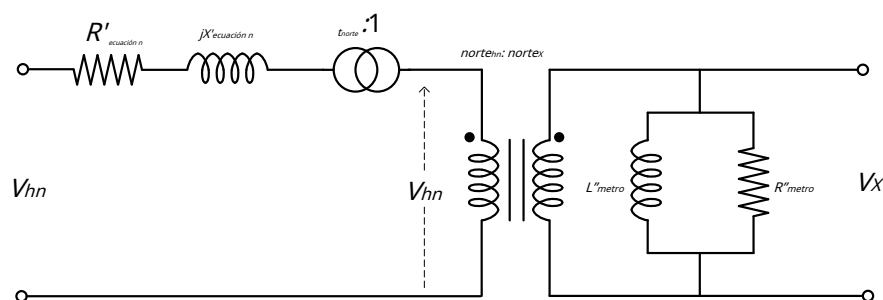


Figura F-5- Circuito equivalente de transformador en la posición de derivación no nominal con transferencia impedancia en serie de los devanados al lado terminal de una relación de espiras fuera de la nominal ideal transformador

Dos transformadores ideales se pueden combinar en un solo transformador como se muestra en la Figura F-6. En el cual:

relación de vueltas como

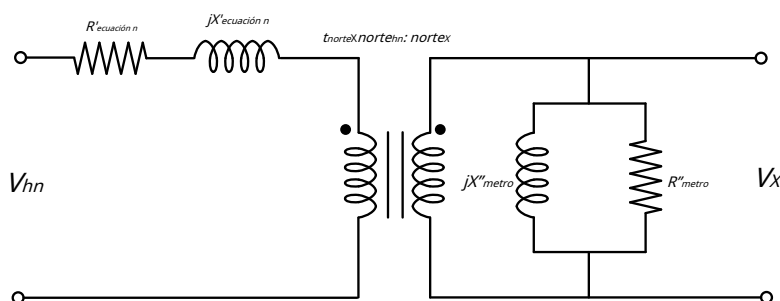


Figura F-6- Circuito equivalente de transformador en posición de derivación con rama magnetizante en la lado secundario

La Figura F-6 muestra el circuito equivalente del transformador que opera en la posición de toma, un ajuste de toma no nominal. La rama de magnetización que se había considerado en el lado secundario es constante y la posición del tap no cambia sus parámetros. Ahora, la rama de magnetización se puede transferir al lado primario como se muestra en la Figura F-7, pero se debe tener en cuenta que el voltaje de excitación en el lado primario no es el voltaje nominal. Por lo tanto, los parámetros de la rama de magnetización deben calcularse de acuerdo con la posición de operación del grifo de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} R'_{Magnetización} &= R''_{metro} \left(\frac{n_{norte}}{n_{orte}} \right)^2 \\ jX'_{Magnetización} &= jX''_{metro} \left(\frac{n_{norte}}{n_{orte}} \right)^2 \end{aligned}$$

Estos parámetros obtenidos de la rama de magnetización no solo no significan que los parámetros de la rama de magnetización cambien por la posición de toma, sino que también garantizan que se activa el 100 % de los voltios pico por vuelta.

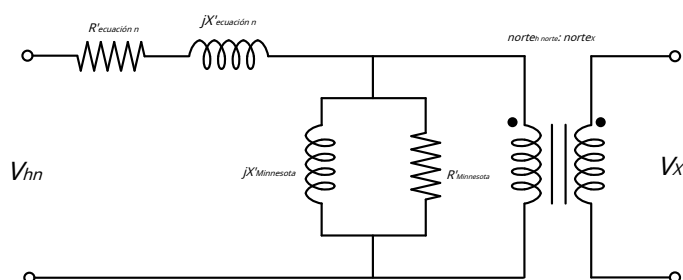


Figura F-7- Circuito equivalente de transformador en posición de derivación con la rama magnetizante en el lado primario

Un ejemplo práctico: transformador de dos devanados

El transformador del Ejemplo 1, discutido en la Sección 2.4.4, se usa aquí para mostrar cómo se puede modelar en posiciones de derivación no nominales. Los resultados de la prueba de pérdidas de carga se han proporcionado para las posiciones de derivación mínima, máxima y nominal. La siguiente tabla muestra los resultados calculados para las posiciones de toma dadas.

Tabla F-1- Los parámetros de impedancia en serie del transformador calculados a partir de los resultados de la prueba

tocar	V _H	PAGS _{LL}	y _{oz}	Prueba	y _o Calificado	Z _{base}	z (pu)	r	Z	R	X
norte	kV	kilovatios	%	AMEU	A	@MVA	@ Prueba AMEU	-	-	-	-
1	151.8	39.952	7.5	15	57.05	1536.216	0.075	0.002663	115.216	4.0917	115.143
9	138	41.66	7.68	15	62.76	1269.6	0.0768	0.002777	97.5052	3.5261	97.4415
17	124.2	37.25	7.41	13.5	62.76	1142.64	0.0741	0.002759	84.6696	3.1528	84.6109

Los parámetros de impedancia en serie equivalentes se calculan mediante el Método dos y el Método tres, que se detallaron en la lista numerada anterior.

Enfoque dos: Para estimar a partir de la interpolación, los valores de impedancia y resistencia que se muestran en las Figuras F-7 y F-8 se dibujaron en MS-Excel, y de la función de ajuste de curvas de Excel se obtuvo una ecuación polinomial de segundo orden en función de la posición de toma para la impedancia y resistencia de la siguiente manera, en la que n es la posición de toma (1-17):

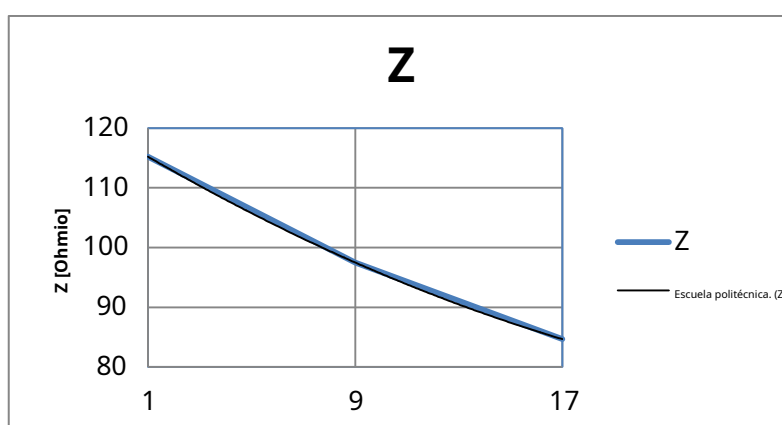


Figura F-7- La impedancia en serie equivalente frente a tres posiciones de derivación dadas

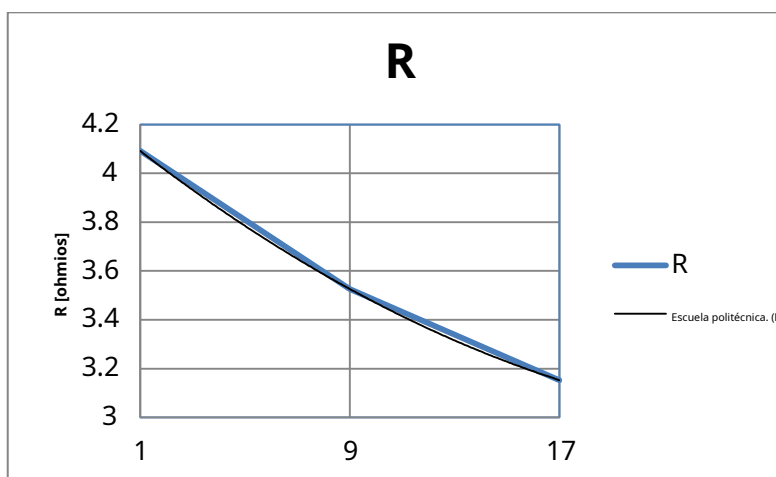


Figura F-8- La resistencia en serie equivalente frente a las tres posiciones de derivación dadas

Las figuras F-9 a F-11 muestran los valores estimados de la impedancia serie. Los resultados se han enumerado en la Tabla F-2.

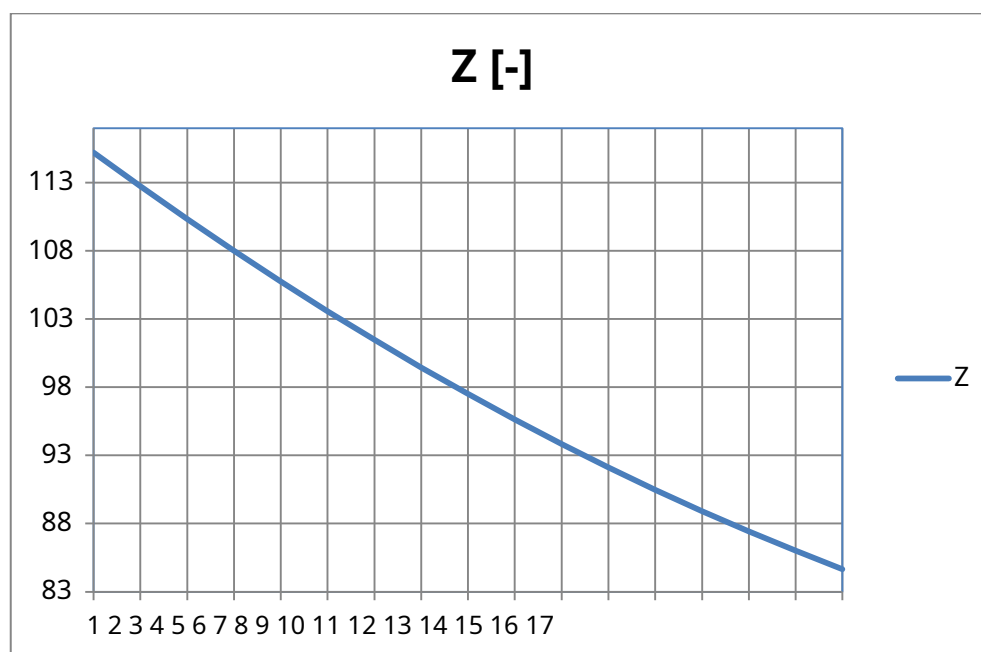


Figura F-9- La impedancia en serie equivalente estimada en función de las posiciones de derivación a través de enfoque dos

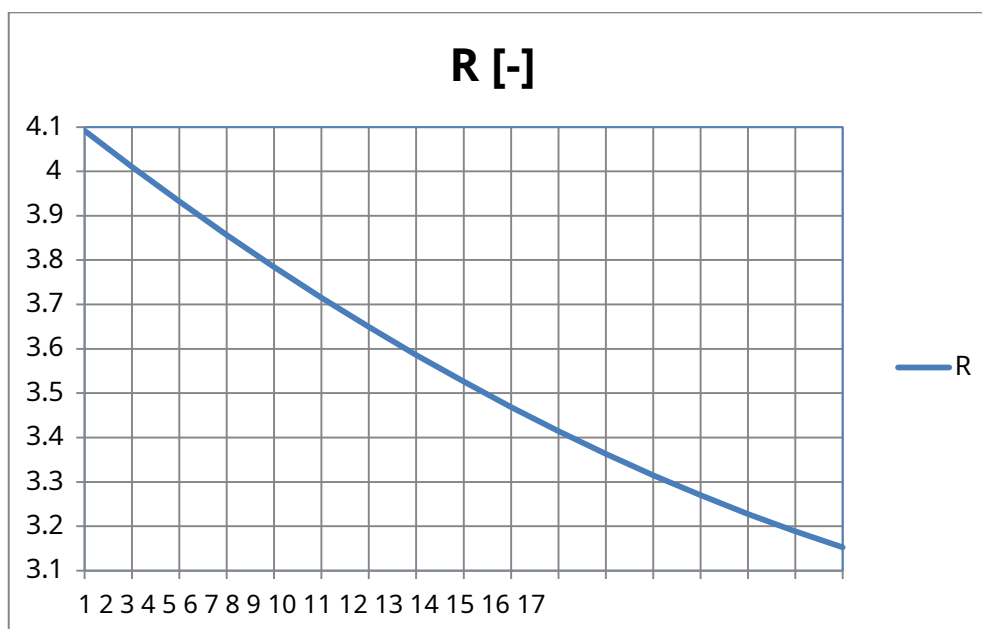


Figura F-10- La resistencia en serie equivalente estimada frente a las posiciones de derivación a través de enfoque dos

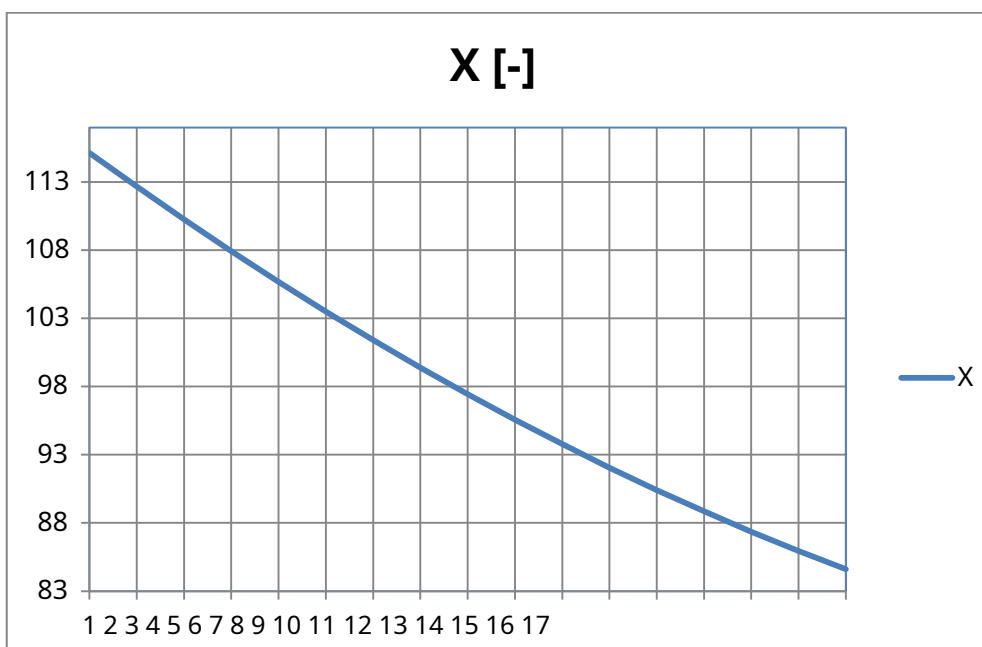


Figura F-11- La reactancia en serie equivalente estimada versus las posiciones de derivación calculadas de la impedancia y la resistencia estimadas a través del enfoque Dos

Enfoque tres: Como se describió anteriormente, la resistencia de CA en serie y la reactancia de fuga de un transformador obtenidas de la prueba de pérdidas de carga en la posición de toma nominal se refieren a la tensión de ajuste de toma relacionada a partir de la tensión nominal de la siguiente manera:

Y también:

Los parámetros calculados a través de ambos métodos se enumeran en la Tabla F-2. Como puede verse, los resultados de ambos métodos son cercanos; sin embargo, el Enfoque Dos es más preciso que el Enfoque Tres.

Tabla F-2- Tabla de impedancia del transformador para todas las posiciones de derivación

Tocar	V _H kV	V _X kV	E _{serie}	De interpolación (Aproximación dos)			De relación de vueltas fuera de nominal (Aproximación Tres)		
				Z [-]	R [-]	X [-]	Z [-]	R [-]	X [-]
1	151.800	26.5	1.1000	115.21360	4.09160	115.14092	117.98139	4.26658	117.90422
2	150.075	26.5	1.0875	112.73309	4.01038	112.66173	115.31523	4.17017	115.23980
3	148.350	26.5	1.0750	110.32875	3.93216	110.25866	112.67954	4.07485	112.60584
4	146.625	26.5	1.0625	108.00059	3.85694	107.93170	110.07432	3.98064	110.00232
5	144.900	26.5	1.0500	105.74860	3.78473	105.68085	107.49957	3.88753	107.42926
6	143.175	26.5	1.0375	103.57279	3.71551	103.50612	104.95529	3.79552	104.88664
7	141.450	26.5	1.0250	101.47315	3.64931	101.40751	102.44148	3.70461	102.37448
8	139.725	26.5	1.0125	99.44969	3.58610	99.38501	99.95815	3.61481	99.89276
9	138.000	26.5	1.0000	97.50240	3.52590	97.43863	97.50528	3.52610	97.44150
10	136.275	26.5	0.9875	95.63129	3.46870	95.56836	95.08288	3.43850	95.02069
11	134.550	26.5	0.9750	93.83635	3.41451	93.77421	92.69096	3.35200	92.63033
12	132.825	26.5	0.9625	92.11759	3.36331	92.05617	90.32950	3.26660	90.27042
13	131.100	26.5	0.9500	90.47500	3.31513	90.41424	87.99852	3.18231	87.94096
14	129.375	26.5	0.9375	88.90859	3.26994	88.84844	85.69800	3.09911	85.64194
15	127.650	26.5	0.9250	87.41835	3.22776	87.35874	83.42796	3.01702	83.37338
dieciséis	125.925	26.5	0.9125	86.00429	3.18858	85.94516	81.18838	2.93603	81.13528
17	124.200	26.5	0.9000	84.66640	3.15240	84.60769	78.97928	2.85614	78.92762

Apéndice G. Definiciones

mmf:Fuerza magnetomotriz **CEM:**Fuerza electromotriz **PCT:**Cambiador de tomas fuera de circuito **OLTC****LTC:**Cambiador de tomas bajo carga **CONNECTICUT:**Transformador de corriente **PT:**Transformador potencial

NORTE:Número de vueltas de bobinado si es un parámetro y punto neutro del conjunto de bobinados si representa un nodo.

Relación de giro fuera de nominal:Cuando la relación V_{base} de ambos lados de las terminales del transformador no es la misma que la relación de tensión nominal del devanado, se denomina relación de giro fuera de nominal o relación de derivación.

Voltaje de impedancia: El voltaje de impedancia de un transformador es el voltaje requerido para hacer circular la corriente nominal a través de uno de los dos devanados especificados cuando el otro devanado está en cortocircuito con el devanado conectado como para la operación nominal.

Impedancia de cortocircuito:La impedancia de cortocircuito es la relación entre el voltaje y la corriente en condiciones de voltaje de impedancia.

Relación de toma actual:La relación de vueltas fuera del valor nominal actual del transformador.

Relación de toma mínima, relación de toma máxima:Relaciones de derivación fuera de nominal mínimas y máximas permitidas para el transformador LTC. Los valores típicos son 0,9 y 1,1.

Tamaño de paso de toque:Incremento de la relación de vueltas fuera del nominal del transformador. La relación de vueltas no nominales se incrementa o se reduce desde 1,0 en múltiplos enteros de este valor.

Tabla de corrección de impedancia:Especifica el número de la tabla de corrección de impedancia del transformador correspondiente del transformador. Las tablas de corrección de la impedancia del transformador se utilizan para especificar cómo debe cambiar la impedancia del transformador con la relación de vueltas fuera del valor nominal. Si este número es 0, no se asocia ninguna tabla de corrección de impedancia con el transformador y, por lo tanto, la impedancia del transformador permanecerá fija a medida que cambie la relación de derivación.

Tabla G-8 - Designaciones y descripciones de las clases de refrigeración utilizadas en Power Transformadores

IEEE/CEI Designacion	Anterior Designación (1993)	Descripción
EN UNA	OA u ONS	Aceite Natural/Aire Natural, Aceite-aire (autorrefrigerado)
ONAF	FA u ONF	Aceite Natural/Aire Forzado, Aire Forzado
ONÁN/ONAF/ONAF	OA/FA/FA	Aceite Natural Aire Natural/Aceite Natural Aire Forzado/Aceite Natural Aire Forzado, Aceite-aire (autoenfriado), seguido de dos etapas de enfriamiento por aire forzado (ventiladores)
ONAN/ONAF/OFAF	OA/FA/FOA	Aceite Natural Aire Natural/Aceite Natural Aire Forzado/Aceite Forzado Aire Forzado, Aceite-aire (autoenfriado), seguido de una etapa de enfriamiento por aire forzado (ventiladores), seguida de 1 etapa de aceite forzado (bombas de aceite)
ONAF/ODAF	OA/FOA	Aceite Natural Aire Forzado/Aceite Directo Aire Forzado, Aceite-aire (autorrefrigerado), seguido de una etapa de bombas de flujo de aceite dirigidas (con ventiladores)
ONAF/ODAF/ODAF	OA/FOA/FOA	Aceite Natural Aire Forzado/Aceite Directo Aire Forzado/Aceite Directo Aire Forzado, Aceite-aire (autorrefrigerado), seguido de dos etapas de bombas de flujo de aceite dirigido (con ventiladores)
OFAF	FOA	Petróleo Forzado Aire Forzado Clasificación de aire/aceite forzado (con ventiladores) únicamente, sin clasificación de autoenfriamiento
OFWF	FOW	Petróleo Forzado Agua Forzado Clasificación de enfriamiento forzado de aceite/agua solamente (intercambiador de calor de aceite/agua con bombas de aceite y agua), sin clasificación de auto-enfriamiento
ODAF	FOA	Aceite Directo Aire Forzado Clasificación de enfriamiento por aire/aceite forzado solo con bombas y ventiladores de flujo de aceite dirigido, sin clasificación de autoenfriamiento
ODWF	FOW	Aceite Directo Agua Forzada Clasificación de enfriamiento forzado de aceite/agua únicamente (intercambiador de calor de aceite/agua con bombas de flujo de aceite dirigido y bombas de agua); sin clasificación de autoenfriamiento