

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

"ANÁLISIS DE FERRORESONANCIA
EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN"

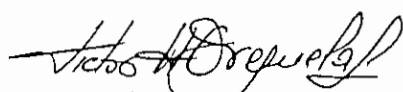
TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICO CON LA ESPECIALIZACIÓN
EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

EDISSON GUSTAVO MORALES LOPEZ

QUITO, DICIEMBRE DE 1987



Certifico que el presente trabajo
de Tesis ha sido realizado en forma
total por el señor: EDISSON GUSTAVO
MORALES LOPEZ.



Ing. Víctor Orejuela L.

DIRECTOR DE TESIS

DEDICATORIA:

A mis queridos padres, hermanos
y familiares.

AGRADECIMIENTO:

Mi más sincero agradecimiento al Ing. Víctor Orejuela L., por su valiosa ayuda prestada al desarrollo de la Tésis y, en general a todas y cada una de las personas que de una u otra manera colaboraron desinteresadamente en la realización de este trabajo de Tesis.

INDICE

Pag.

CAPITULO I: GENERALIDADES

I.1	Introducción.....	1
I.2	Objetivo.....	2
I.3	Alcance.....	2

CAPITULO II: SOBREVOLTAJES EN REDES DE DISTRIBUCION

CRITERIOS GENERALES

II.1	Introducción.....	4
II.2	Sobrevoltajes debido a Causas Externas.....	4
II.2.1	Sobrevoltajes por descargas directas.....	5
II.2.2	Sobrevoltajes por descargas indirectas.....	5
II.3.	Sobrevoltajes debido a causas internas.....	5
II.3.1	Sobrevoltajes de Maniobra.....	6
II.3.1.1	Energización y Recierre.....	6
II.3.1.2	Maniobra de corrientes inductivas.....	7
II.3.1.3	Maniobra de corrientes capacitivas.....	7
II.3.2	Sobrevoltajes de Frecuencia Industrial.....	8
II.3.2.1	Sobrevoltajes por fallas.....	8
II.3.2.2	Efecto Ferranti.....	8
II.3.2.3	Por desconexión Brusca de carga.....	9
II.4	Ferroresonancia.....	9

CAPITULO III: ANALISIS DE FERRORESONANCIA

III.1	Criterios Generales.....	10
III.2	Evaluación Técnica de Ferroresonancia.....	11
III.2.1	Análisis de Resonancia.....	11
III.2.1.1	Definición.....	11
III.2.1.2	Resonancia en Redes RLC Serie.....	11
III.2.1.3	Resonancia en circuitos RLC Paralelo.....	12
III.2.2	Análisis de Ferroresonancia.....	16
III.2.2.1	Definición.....	16
III.2.2.2	Condiciones de Ferroresonancia.....	18
III.2.2.3	Ferroresonancia en Sistemas de Potencia y en Siste <u>mas</u> mas de Distribución.....	19
III.2.2.4	El circuito Ferroresonante.....	20
	- Análisis del Circuito Ferroresonante.....	20
III.2.2.5	Parámetros de influencia en el circuito Ferroreso <u>nante</u> nante.....	26
III.2.2.6	Efecto de los voltajes Ferroresonantes.....	28
III.3	Casos de Ferroresonancia en Sistemas de Distribu <u>ción</u> ción.....	29
III.3.1	Ferroresonancia por apertura de Conductores.....	30
III.3.1.1	Apertura de un conductor.....	30
III.3.1.2	Apertura de dos conductores.....	34
III.3.2	Ferroresonancia por maniobra de Bancos de Transfor <u>madores</u> 1Ø o Transformadores 3Ø	37
III.3.2.1	Efecto de las conexiones de los bancos de Transfor <u>madores</u> 1 Ø o Transformadores 3 Ø	39

III.3.2.1.1	Conexiones $Y-\Delta, \Delta-Y_{\neq}$	39
	- Una fase Energizada.....	39
	- Dos fases Energizadas.....	42
III.3.2.1.2	Conexión $Y-Y$	44
III.3.2.1.3	Conexión $Y_{\neq} Y_{\neq}$	44
III.3.2.1.4	Ferroresonancia en Transformadores de Potencial	47
III.3.3	Ferroresonancia debido a la red de capacitancias internas de los devanados en un Transformador.....	48
III.3.4	Ferroresonancia en circuitos con compensación Serie.....	50

CAPITULO IV: CRITERIOS Y METODOS DE CONTROL DE FERRORESONANCIA

IV.1	Criterios Generales.....	53
IV.2	Evaluación de los Métodos de Control.....	54
IV.2.1	Métodos que involucran al diseño del circuito...	54
IV.2.1.1	Longitud Apropiaada del Alimentador Primario.....	54
IV.2.1.2	Interruptores Tripolares.....	63
IV.2.1.3	Resistencias en el secundario.....	64
	- Determinación del porcentaje de carga Resistiva.....	66
IV.2.2	Maniobra de Transformadores y Alimentadores Primarios.....	72
IV.2.2.1	Secuencia de Maniobra.....	72
IV.2.2.2	Coordinación de los elementos de maniobra del transformador y la línea.....	74

IV.3	Otras Alternativas.....	75
IV.3.1	Efecto de las conexiones de Transformadores....	75
IV.3.1.1	Transformadores conectados $Y_{\Delta}-Y_{\Delta}$	75
IV.3.1.2	Transformadores conectados Y_{Δ} (abierto) , - Δ (abierto).....	76
IV.3.2	Uso de Resistencias desde el neutro a tierra en transformadores conectados en $Y-\Delta$	77
IV.3.3	Resistencia a través de un Transformador.....	79
CAPITULO V: EVALUACION ECONOMICA		
V.1	Generalidades.....	81
V.2	Costos de Materiales y equipos.....	81
V.2.1	Costos de Instalación.....	82
V.2.2	Costos de Operación y Mantenimiento.....	82
V.2.3	Costos de Pérdidas.....	83
V.3	Otros Costos.....	84
CAPITULO VI: EJEMPLO DE APLICACION		
VI.1	Introducción.....	86
VI.2	Descripción del Sistema.....	86
VI.3	Datos del Sistema.....	90
	- Alimentador Primario.....	90
	- Transformadores.....	92
	- Elementos de Seccionamiento instalados.....	92
VI.4	Cálculo de sobrevoltajes por Ferroresonancia...	93

VI.4.1	Apertura de uno y dos conductores de fase.....	93
	- Cálculos.....	94
	- Reactancia capacitiva de secuencia.....	95
	- Impedancia de magnetización.....	95
	- Procedimiento de cálculo de los sobrevoltajes por apertura de conductores.....	95
VI.4.1.1	Análisis del Transformador T_1 (225.0 KVA).....	98
VI.4.1.2	Análisis del Transformador T_2 (500.0 KVA).....	100
VI.4.1.3	Análisis del Transformador T_n (112.5 KVA).....	102
VI.4.1.4	Análisis de Transformadores: T_4 (1.000 KVA) y T_5 (1.500 KVA).....	103
VI.4.2	Análisis de Resultados.....	106
VI.4.3	Sobrevoltajes Ferroresonantes por maniobra de Transformadores.....	108
VI.5	Alternativas de Control de Ferroresonancia.....	112
VI.5.1	Análisis de Alternativas.....	113
	- Alternativa 1.....	113
	Justificación de los elementos in- cluidos en esta Alternativa.....	114
	- Alternativa 2.....	115
	- Máxima longitud entre transformador y elementos de protección.....	116
	- Cálculo del valor de resistencia a utilizarse.....	117
VI.5.2	Comparación de Alternativas.....	118
VI.6	Evaluación Económica.....	119
VI.6.1	Costos de los elementos involucrados.....	119

	1. Costo de instalación.....	119
	2. Costos por operación y mantenimiento.....	120
	3. Costo de pérdidas de energía.....	121
VI.6.2	Evaluación Económica.....	123

CAPITULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones.....	125
Recomendaciones.....	127

APENDICE A

APENDICE B

ANEXO B

APENDICE C

ANEXO C

BIBLIOGRAFIA

CAPITULO I

GENERALIDADES

I.1 INTRODUCCION

En la realización del diseño de una red de distribución y en su evaluación se deben tomar en cuenta algunos factores, entre los que se menciona a los de control y protección de sobrevoltajes, los cuales permiten tener un servicio en las mejores condiciones técnicas.

Cuando un Sistema de Distribución se encuentra en funcionamiento, ó en él se realizan operaciones de maniobra pueden originarse sobrevoltajes por: Descargas atmosféricas, fallas a tierra, cambios súbitos de carga, etc.; y se caracterizan tanto por su amplitud como por su duración. Pero bajo ciertas configuraciones: Circuitos descargados, circuitos trifásicos provistos de protección monopolar, alimentadores aéreos de gran longitud, ó constituídos por cables (alimentadores subterráneos); en donde se tienen elementos capacitivos de gran magnitud, e inductivos con características magnéticas no lineales (Transformadores); pueden presentarse severos sobrevoltajes debido al fenómeno de Ferresonancia y como consecuencia de ello efectos negativos en los componentes del sistema (conductores, transformadores, pararrayos, etc.).

Es por ésta situación que es importante tener un conocimiento adecuado del comportamiento Ferresonante en un Sistema de Distribución; en base del cual se pueden tomar medidas tendientes a controlar ó amortiguar de alguna manera los efectos negativos que por ésta causa se presentan en la Red.

I.2 OBJETIVO

El objetivo fundamental del presente trabajo es realizar un estudio técnico de Ferroresonancia en un Sistema de Distribución; y de manera especial en un Alimentador Primario; analizar detenidamente los Métodos y procedimientos más conocidos para su control y/o atenuación; así como evaluar económicamente las alternativas técnicamente posibles con la finalidad de tener un sistema de Condiciones Técnico-Económicas adecuadas.

Además se pretende mostrar la importancia que el fenómeno de Ferroresonancia está adquiriendo en las Redes de Distribución de nuestro medio debido a su continuo crecimiento.

I.3 ALCANCE

Para cumplir con los objetivos planteados se enfocan los siguientes temas:

El Capítulo II, describe en términos generales los sobrevoltajes que se presentan en un Sistema de Distribución.

El Capítulo III, analiza detenidamente a la Ferroresonancia. Para ello inicialmente describe el comportamiento resonante en circuitos simples, lo cual es referencia para luego evaluar técnicamente a la Ferroresonancia. Se discuten los casos más conocidos de Ferroresonancia que se dan en Sistemas de Distribución; y de manera especial en un Alimentador Primario.

El Capítulo IV, estudia a los métodos y procedimientos de con-

trol de Ferroresonancia. Se analizan y se dan criterios de diferentes medidas propuestas para controlar, atenuar, ó eliminar este comportamiento.

El Capítulo V, contiene criterios a ser tomados en cuenta en la realización de la Evaluación Económica de las Alternativas Técnica-mente posibles de control de Ferroresonancia.

El Capítulo VI, analiza un ejemplo de aplicación tomando en cuenta los conceptos y criterios establecidos en los capítulos anteriores - para un Alimentador Primario del Sistema de Distribución de la Empresa Eléctrica Quito S.A.

En el Capítulo VII, se emiten algunas conclusiones y recomendaciones sobre el trabajo que se desarrolla.

Este trabajo estudia y analiza con detalle al comportamiento Ferroresonante, los casos más conocidos que se dan en una Red de Distribución, y los métodos y procedimientos que controlan esta condición.

Por no estar incluidos dentro del alcance del presente trabajo no se hace ningún tipo de evaluación de la Coordinación de las Protecciones en Sistemas de Distribución y; ningún tipo de modelación matemática que permita evaluar al comportamiento Ferroresonante.

CAPITULO II

SOBREVOLTAJES EN REDES DE DISTRIBUCION

CRITERIOS GENERALES

II.1 INTRODUCCION

Este Capítulo analiza de una manera resumida los sobrevoltajes que se dan en un Sistema de Distribución, en vista de que ellos han sido tratados con mayor amplitud en otros trabajos de Tesis (Ver Ref.1). En este caso se pondrá énfasis en el origen, clasificación e importancia de los mismos.

Un sobrevoltaje, es el voltaje que se presenta en un sistema eléctrico, con un valor superior a una tensión de referencia y que es el voltaje más elevado de operación del sistema.

Los sobrevoltajes que se presentan en una red de distribución tienen diferente origen:

II.2 SOBREVOLTAJES DEBIDO A CAUSAS EXTERNAS.

Son los que se originan fuera del Sistema y son independientes de éste, se deben a: La acción de rayos por descargas atmosféricas - que impactan directamente sobre los conductores de fase; ó caen a tierra, en éste caso el sobrevoltaje se establece por inducción electrostática.

II.2.1 SOBREVOLTAJES POR DESCARGAS DIRECTAS

Las ondas de éste tipo de voltaje se caracterizan por el elevado gradiente en el frente de onda, amplitud considerable y duración reducida.

La magnitud del voltaje de descarga depende principalmente de la corriente de descarga, la cual es un parámetro, cuyos valores tanto de magnitud como en el frente de onda son de carácter probabilístico; - existiendo mayor posibilidad de ocurrencia de corrientes de descarga relativamente débiles y menor probabilidad de una corriente de gran intensidad (Ref. 1)

Este tipo de descargas son las más peligrosas, ya que producen sobretensiones transitorias de gran magnitud, que superan el nivel de aislamiento del sistema, ocasionando fallas en él. (Ref. 2)

II.2.2 SOBREVOLTAJES POR DESCARGAS INDIRECTAS.

Estas descargas producen sobrevoltajes que son inducidos sobre las líneas de Distribución, debido al cambio brusco del campo eléctrico nube-tierra, cuando la descarga del rayo no incide directamente - sobre los conductores de fase.

La magnitud de éstos sobrevoltajes es inferior a la producida por descargas directas pero igualmente superan el nivel de aislamiento, ocasionando fallas en el sistema (Ref. 3)

II.3 SOBREVOLTAJES DEBIDO A CAUSAS INTERNAS.

Se deben a fenómenos que aparecen cuando el estado de la Red

cambia por; una operación de maniobra, condiciones de falla, ó comportamiento anormal del sistema.

Se dividen en:

- Sobrevoltajes de Maniobra
- Sobrevoltajes de Frecuencia Industrial.

II.3.1 SOBREVOLTAJES DE MANIOBRA.

Se originan en el Sistema por una operación específica de maniobra: Energización o recierre, conexión ó desconexión de corrientes - capacitivas o inductivas.

Estudios han demostrado que la magnitud de los sobrevoltajes por maniobra en un sistema varía desde 1.0 por unidad hasta 4.0 por unidad (Ref. 4)

II.3.1.1 Energización y Recierre.

En la energización o recierre de una línea, sobrevoltajes severos pueden ser generados. La magnitud de éstas sobretensiones es dependiente de algunos factores: longitud de la línea, su impedancia, compensación, carga remanente; etc.

En una línea, la carga remanente antes de su recierre tiene un efecto significativo en los sobrevoltajes producidos, el valor de ésta carga depende del equipo conectado a la línea pues ésto determina el mecanismo de disminución de la sobretensión.

Los transformadores afectan a la energización y recierre por

la interacción de su característica magnética no lineal con la capacitancia de la línea e inductancia del Sistema (Ref. 4).

II.3.1.2 Maniobra de Corrientes inductivas.

Son eventos de sobrevoltaje, los cuales resultan de la maniobra de cierto tipo de carga inductiva siendo importantes los siguientes casos: Interrupción de la corriente de arranque de motores grandes, interrupción de la corriente de magnetización de transformadores, operaciones de maniobra de hornos de arcos, etc; y se deben al corte muy rápido de la corriente (en puntos alejados de su valor cero); éste corte puede causar reigniciones en el interruptor asociado a la maniobra. (Ref. 8).

Aunque la corriente en el interruptor puede cambiar a cero casi instantáneamente, la corriente en la carga inductiva requiere de un tiempo para que la energía magnética almacenada en ésta, sea transferida a la carga disponible y esto puede ser causa del sobrevoltaje. (Ref. 5).

II.3.1.3 Maniobra de Corrientes capacitivas.

Se refiere principalmente a la maniobra de bancos de condensadores:

- En la energización de un banco de condensadores desde una fuente primordialmente inductiva, pueden presentarse sobrevoltajes por el cierre no simultáneo de los polos del interruptor y ocurren tanto en el banco de condensadores, como en localidades remotas con rápidos incrementos especialmente en terminales abiertos lejanos.
- En la desenergización, los sobrevoltajes se deben al re-encendido del arco en el instante de interrupción por la presencia de una corrien-

te de elevada frecuencia. En éste caso el sobrevoltaje se aproxima a 3.0 por unidad. (Ref.6).

II.3.2 SOBREVOLTAJES DE FRECUENCIA INDUSTRIAL.

Son voltajes que se presentan sobre equipos, aparatos y elementos de la red originados por: Condiciones de falla, efecto ferranti, variaciones bruscas de carga, ferresonancia.

Son voltajes oscilantes y pueden ser débilmente amortiguados; siendo los ocasionados por fallas los más frecuentes en un sistema. (Ref.1).

II.3.2.1. Sobrevoltajes por fallas.

De los diversos tipos de fallas, los que ocasionan mayores dificultades al sistema por su asimetría son: los de fase-tierra y los de dos fases-tierra. El sobrevoltaje se produce en la(s) fase(s) sana(s), cuando otra se coloca al potencial de tierra y, se caracteriza por el coeficiente de puesta a tierra en ese punto del sistema (Ref.1).

Estudios han demostrado que en condiciones de fallas resultan sobrevoltajes, con magnitudes que pueden alcanzar hasta 2.0 por unidad (Ref. 7).

II.3.2.2. Efecto Ferranti.

El efecto Ferranti se produce en la energización de circuitos. Ocurre por el flujo de la corriente de carga capacitiva a través de la impedancia inductiva en serie del alimentador.

Por efecto ferranti una línea larga en vacío puede presentar elevación de tensión en el extremo de recepción ó en determinados casos en algún punto intermedio (Ref. 1,7).

Este tipo de sobrevoltajes, según estudios pueden alcanzar magnitudes de hasta 2.0 por unidad ó más dependiendo de las condiciones de la red (longitud, voltaje del primario, carga, etc.) (Ref. 7).

II.3.2.3 Por Desconexión brusca de carga.

Se produce por la disminución brusca de carga activa y reactiva, al desconectarse automáticamente sectores importantes y su valor depende de la configuración del circuito luego de la desconexión. (Ref. 8).

Estas sobretensiones son controladas normalmente por la acción de los reguladores de carga activa y por los de carga reactiva y por lo tanto son de relativamente corta duración. La magnitud de éstos voltajes no es importante, pero pueden agravarse si la disminución brusca de la carga se debe a la apertura unilateral de líneas largas. (Ref. 7).

II.4. FERRORESONANCIA.

Este tipo de sobrevoltajes se puede presentar en una operación de maniobra monopolar o apertura de uno o dos conductores de fase y, se debe a la interrelación existente entre la capacitancia del sistema y la inductancia no lineal especialmente de transformadores.

En los Capítulos III y IV, se trata con amplitud lo relacionado a éste fenómeno, por ser la base del presente trabajo.

CAPITULO III

ANALISIS DE FERRORESONANCIA

III.1 CRITERIOS GENERALES

En redes de distribución, los sobrevoltajes ferroresonantes han sido reconocidos e investigados desde aproximadamente el año 1925. A partir de entonces, diferentes estudios, análisis e investigaciones, y numerosos trabajos se han referido al respecto.

La mayor parte de ellos tienen su base en investigaciones - realizadas en el Analizador Transitorio de Redes (TNA) y pruebas de laboratorio a escala. Con la ayuda de éstos procedimientos, se han analizado a los circuitos involucrados y los resultados a los que se ha llegado concuerdan con situaciones que se han presentado en la práctica. Han sido pues, éstos trabajos contribuciones significativas para el entendimiento del fenómeno.

En éste Capítulo se realiza el análisis técnico de Ferroresonancia, partiendo inicialmente del estudio del circuito RLC lineal simple, el cual es referencia para luego tomar en cuenta la no linealidad de la inductancia, parámetro importante del circuito ferroresonante.

También se describen y analizan los casos más conocidos de Ferroresonancia que se dan en un Sistema de Distribución, y los efectos de los diferentes parámetros involucrados.

III.2. EVALUACION TECNICA DE FERRORESONANCIA

III.2.1. Análisis de Resonancia.

III.2.1.1. Definición.

Se dice que un circuito RLC lineal simple entra en resonancia, cuando al aplicar un voltaje $\bar{E}$ a sus terminales, la respuesta de corriente $\bar{I}$ es tal que el ángulo de fase entre las dos funciones es cero, a ésta condición de fase nula se la denomina condición de factor de potencia unitario (Ref.9); y se produce cuando la reactancia inductiva (X_L) es igual a la capacitiva (X_C) (en circuitos serie), ó la susceptancia inductiva (B_L) es igual a la capacitiva (B_C) (en circuitos paralelo).

III.2.1.2. Resonancia en redes RLC serie.

La Fig. N° III.1.1, muestra a un circuito RLC lineal simple y, su correspondiente diagrama fasorial.

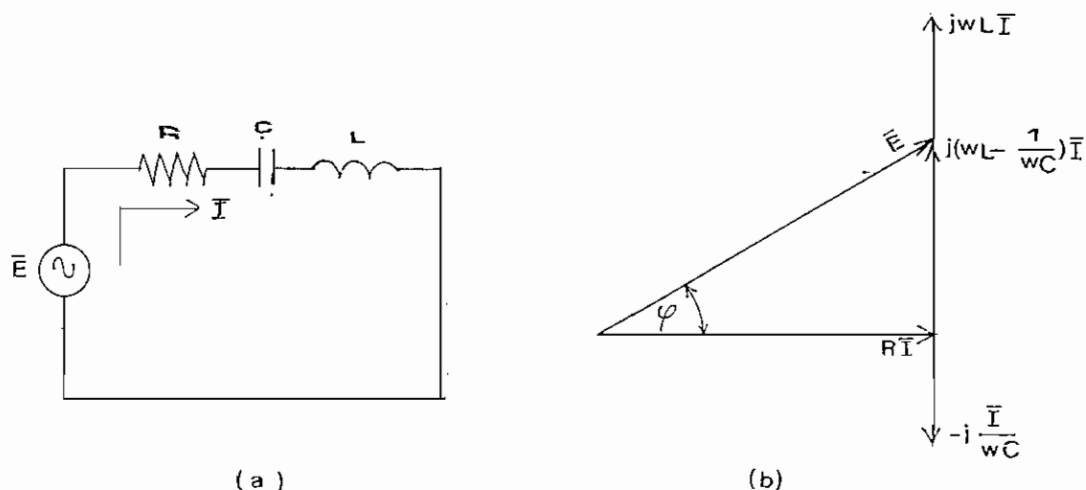


Fig. N° III.1.1: Circuito RLC Serie

a) Circuito RLC lineal simple

b) Diagrama fasorial.

De la Fig. Nº III.1.1.1.a, si la reactancia es diferente de la reactancia capacitiva, se pueden escribir las siguientes relaciones: (Ref. 9)

$$Z_T(w) = R + j(wL - \frac{1}{wC}) \quad (III.1)$$

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (wL - \frac{1}{wC})^2}} \quad (III.2)$$

$$E = I \sqrt{R^2 + (wL - \frac{1}{wC})^2} \quad (III.3)$$

$$T_g \varphi = \frac{wL - \frac{1}{wC}}{R} \quad (III.4)$$

Donde: $Z_T(w)$, Impedancia total del circuito.

R, L , y C , son la resistencia, inductancia y capacitancia respectivamente del circuito:

E , es la magnitud del voltaje aplicado al circuito

I , es la magnitud de la corriente.

φ , es el ángulo de fase.

w , es la frecuencia aplicada al circuito ($2\pi \cdot 60$)

En condiciones de resonancia, la reactancia inductiva X_L es igual a la reactancia capacitiva X_C ; y la caída de voltaje en éstos elementos es igual pero de signo contrario. Escribiendo relaciones para la magnitud de voltaje E y la corriente I , bajo éstas condiciones se tiene: (Ref. 9)

De la ecuación (III.3):

$$E = I \sqrt{R^2 + (wL - \frac{1}{wC})^2}$$

Pero, en condiciones de resonancia: $wL - \frac{1}{wC} = 0$

De tal manera que:

$$E = IR \quad (III.5)$$

O también:

$$I = \frac{E}{R} = I_0 \quad (III.6)$$

Donde: I_0 , es la magnitud de la corriente en condiciones de Resonancia. Según la ecuación (III.6), la corriente I_0 está limitada por la resistencia R , y puede llegar a tener valores altos, si ésta es muy pequeña. Esto puede traer como consecuencia altas magnitudes de voltaje a través de la inductancia y capacitancia del circuito (Ref. 10).

La frecuencia a la cual se produce resonancia es:

$$\begin{aligned} \omega L - \frac{1}{\omega C} &= 0 \\ \omega &= \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0 \end{aligned} \quad (III.7)$$

Donde: ω_0 , es la denominada frecuencia natural del circuito RLC serie simple.

L y C ; son la inductancia y capacitancia del circuito.

La caída de voltaje sobre la inductancia (E_L) y la capacitancia (E_C) bajo éstas condiciones es:

$$\begin{aligned} E_L &= E_C = E_0 = I_0 X_L = I_0 X_C \\ E_0 &= I_0 \omega_0 L = \frac{E}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \end{aligned} \quad (III.8)$$

Donde: E_0 , Caída de voltaje en la inductancia o capacitancia en condiciones de resonancia.

E , magnitud del voltaje aplicado al circuito.

R, L , y C , resistencia, inductancia y capacitancia del circuito.

La ecuación (III.8) confirma lo dicho, si la resistencia R es pequeña, la caída de voltaje a través de la inductancia o capacitancia puede ser grande.

En la red descrita, si se asume un valor de X_L constante, hay solamente un valor de X_C que puede dar como resultado una condición de resonancia serie.

III.2.1.3 Resonancia en circuitos RLC Paralelo.

En ocasiones, los elementos de un circuito no pueden ser transformados a resultantes serie, por lo tanto, el análisis se realiza considerando la conexión en paralelo de tales elementos.

La Fig.III.1.2, ilustra a un circuito RLC paralelo simple.

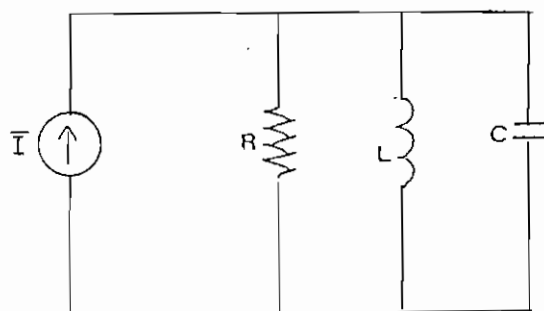


Fig. N°III.1.2:Circuito RLC paralelo-simple

Al considerar las relaciones duales con la red RLC serie:

Resistencia	(R)	$\longleftrightarrow$	Conductancia	(G)
Voltaje	(E)	$\longleftrightarrow$	Corriente	(I)
Impedancia	(Z)	$\longleftrightarrow$	Admitancia	(Y)

De la Fig. N°III.11.2, si la susceptancia inductiva es diferente de la capacitiva:

$$Y_T(\omega) = G + j(\omega C - \frac{1}{\omega L}) \quad (III.9)$$

Donde: $Y_T(\omega)$, es la admitancia total del circuito

G, L y C ; es la conductancia, inductancia y capacitancia respectivamente del circuito.

En condiciones de resonancia: (Ref.9).

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$Y_T(\omega) = G \quad (III.10)$$

$$I_0 = EG \quad (III.11)$$

Donde: ω_0 , es la frecuencia natural del circuito.

L y C , son la inductancia y capacitancia del circuito

I_0 , magnitud de la corriente en condiciones de resonancia.

E , magnitud del voltaje a los terminales del circuito.

De la ecuación (III.11), la corriente I_0 se ve limitada por el valor de la conductancia G y, si ésta es grande (R pequeña), la magnitud de la misma puede ser elevada, resultando valores de corriente altos en el circuito (Ref.9).

En circuitos reales, la conexión serie o paralelo para los elementos R , L , y C rara vez están presentes y la combinación de los dos casos puede resultar en resonancia.

III.2.2 ANÁLISIS DE FERRORESONANCIA.

En el circuito de la Fig:III.1.1., se tiene un solo valor de reactancia inductiva X_L y capacitiva X_C que pueden generar una condición de resonancia.

Cuando X_L es variable, dependiendo de la no linealidad como es el caso de la inductancia de excitación de un transformador, ésta varía según el grado de magnetización del núcleo, entonces se tiene una reactancia variable durante cada ciclo de voltaje aplicado a los terminales del transformador. Cada valor de inductancia puede entrar en resonancia con un valor de capacitancia dado; de esta manera se puede tener algunos puntos de resonancia, en contraposición con la dada en la Fig. N°- III.1., donde hay una sola condición de resonancia.(Ref.10,11)

II.2.2.1 Definición

Ferroresonancia es un caso especial de resonancia, en el cual la no linealidad (inductancia) se refiere a la de un núcleo magnético saturable como es, la reactancia de magnetización de un transformador (Ref.10).

La Fig. N° III.2 muestra la curva de magnetización de núcleo de un transformador típico de Distribución, ésta da el voltaje en por unidad (p.u.) en función de la corriente de excitación en % de la corriente nominal.

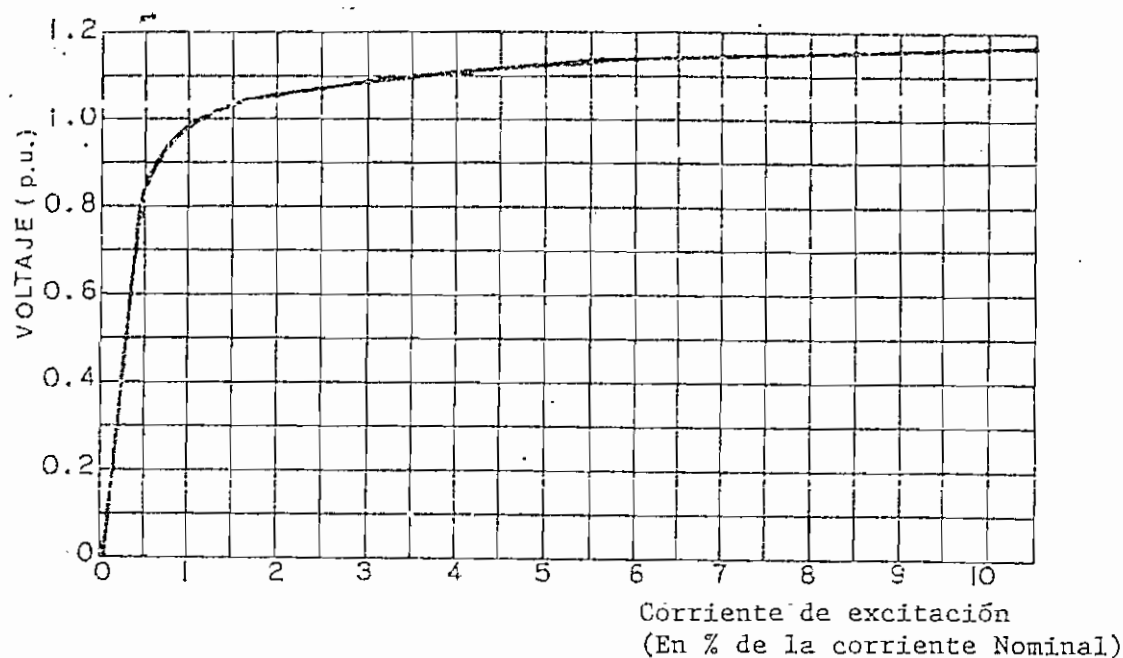


Fig. Nº III.2: Curva de magnetización para un transformador típico de Distribución.

Esta curva puede considerarse que consiste de tres partes específicas:

- Una sección en el frente de la curva, que es casi una línea recta, ubicada en la parte en la cual el transformador no está saturado. La reactancia en aquel sector de la curva es casi constante en valor.
- Una segunda sección cubre el codo de la curva; allí la pendiente cambia a casi horizontal. Esta es la parte en donde la reactancia inductiva cambia más rápidamente.
- Una tercera sección cubre la parte casi horizontal en la cola de la curva. La reactancia inductiva es en ésta parte mucho menor que en el frente de la curva (Ref.11).

Para una operación del transformador, a voltaje nominal, la reactancia de magnetización se determina, tomando como base los KVA nominales y el voltaje nominal del transformador. Para algún voltaje diferente de aquel, la reactancia puede ser calculada de la curva de magnetización (Ref. 17).

III.2.2 Condiciones de Ferroresonancia.

(Tomado de las Ref. 12,13). El Fenómeno de Ferroresonancia puede aparecer en sí mismo bajo diferentes condiciones:

- La primera condición es la denominada normal y es aquella en donde en el caso de voltajes senoidales presentes en la fuente de alimentación, los sobrevoltajes Ferroresonantes son esencialmente senoidales (a frecuencia industrial). Si al lado de la condición normal se obtiene una, en donde los sobrevoltajes que aunque distorsionados consisten esencialmente de una componente a la frecuencia de suministro (60 Hz) se habla de Ferroresonancia Fundamental. La característica de ésta condición Ferroresonante es que una variación en el voltaje de suministro causa el cambio súbito de la una condición a la otra.
- Ferroresonancia subarmónica; si en el caso de voltajes senoidales aplicados, la frecuencia de los sobrevoltajes Ferroresonantes es menor que la de suministro.
- Ferroresonancia Armónica; si en la condición obtenida la Frecuencia de las sobretensiones es mayor que la industrial.

Alguna de aquellas condiciones enunciadas puede tener un comportamiento de régimen permanente (de estado estable) ó ellas pueden

ser inestables, en cuyo caso su duración es transitoria. Estos modos inestables de oscilación pueden degenerar en una condición sostenida ó en otras, en donde ningún sobrevoltaje sea generado.

II.2.2.3 Ferroresonancia en sistemas de Potencia y en Redes de Distribución.

Ferroresonancia en Sistemas de Potencia es generalmente definido como un fenómeno oscilatorio creado por la interacción de la capacitancia del sistema con la inductancia no lineal (variable, especialmente de transformadores). La diferencia con Ferroresonancia en Redes de Distribución se establece por las características de los circuitos y por los métodos de interrupción.

Sistemas de Transmisión de longitudes relativamente largas pueden tener combinaciones de capacitancia de la línea e inductancia de la fuente que resultan en resonancia a una frecuencia natural o a un armónico particular de la frecuencia de la fuente. Cuando éste es el caso, una columna del núcleo del transformador puede actuar como una fuente para voltajes armónicos, los cuales en algunos casos pueden ser autosostenidos (estables); no es necesario que exista alguna perturbación para que ésto ocurra.

En sistemas de Distribución, es más común que la Ferroresonancia sea causada por una condición de desbalance: Fusión de un fusible, maniobra monopolar, apertura accidental de un conductor; etc. Estas condiciones pueden ser suficientes para mantener el efecto Ferroresonante.

III.2.2.4 El Circuito Ferroresonante.

En Sistemas de Distribución, la capacitancia del Alimenta-
dor Primario puede ser energizado en serie con un transformador de
distribución; y ésta condición puede ser intencional o accidental de-
bido a: una maniobra monopolar, fusión de un fusible, o apertura acci-
dental; en cada uno de los casos pueden aparecer sobrevoltajes a tra-
vés de la capacitancia y el transformador.

- Análisis del circuito Ferroresonante.

Es el propósito de ésta discusión el presentar un análisis
matemático aproximado del circuito ferroresonante para explicar el fe-
nómeno y calcular aproximadamente los voltajes obtenidos como una fun-
ción de la reactancia capacitiva en serie con un transformador dado.

Bajo estas condiciones el circuito ferroresonante, es como
el indicado en la Fig. N° III.3.

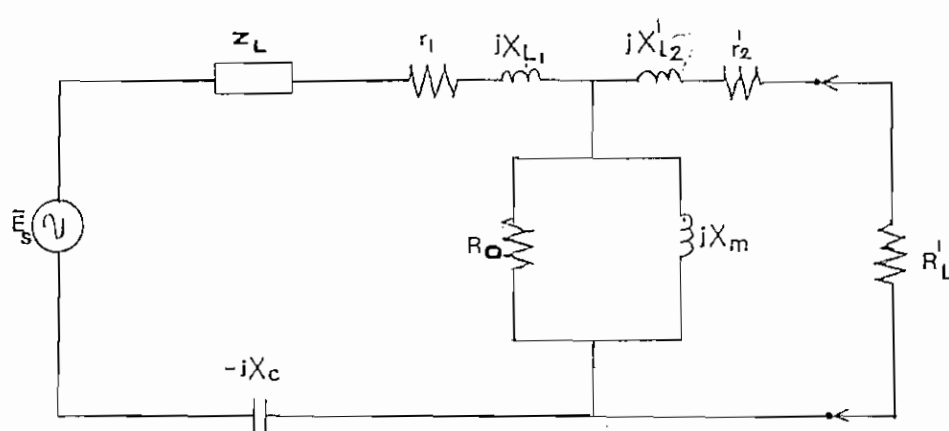


Fig. N° III.3: Diagrama de impedancias.- Circuito Ferroresonante:

En el circuito de la Fig. N° III.3:

Z_L , Impedancia de la línea, entre la fuente y el transformador

r_1 , resistencia de pérdidas en el devanado primario

r_2' , resistencia de pérdidas en el devanado secundario reflejado al primario.

X_{L1} , reactancia de dispersión en el devanado primario

X_{L2}' , reactancia de dispersión en el devanado secundario, reflejado al primario.

R_0 , resistencia de pérdidas en el hierro.

X_m , reactancia de magnetización del transformador.

R_L' , resistencia ubicada como carga en el secundario, reflejado al primario.

X_C , reactancia capacitiva en serie.

$\bar{E}_S$, voltaje generado en la fuente.

En el circuito de la Fig. N° III.3 se pueden hacer simplificaciones: La impedancia de la línea Z_L es pequeña en comparación con la impedancia de magnetización; X_{L1} y X_{L2}' son despreciables; la resistencia de pérdidas en el núcleo es mínima, y la resistencia ubicada como carga (R_L') es mucho mayor que r_2' . Bajo estas condiciones el circuito puede ser representado como se indica en la Fig. N° III.4.

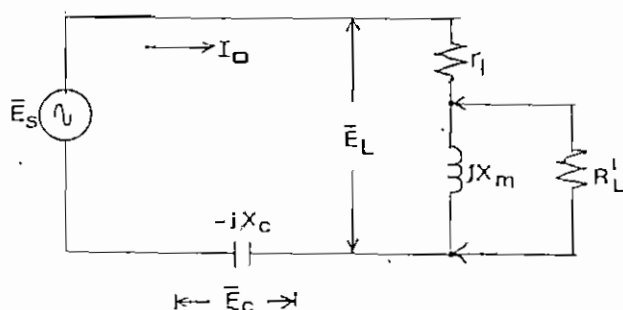


Fig. N° III.4: Diagrama de impedancias-Circuito Ferroresonante simplificado.

En la Fig. N° III.4:

$r_1 + jX_m$, Impedancia equivalente del transformador

X_C , Reactancia capacitiva en serie.

$\bar{E}_S$, Voltaje generado en la fuente

$\bar{E}_L$, Voltaje en los terminales del transformador.

$\bar{E}_C$, Voltaje en los terminales del condensador.

El voltaje en los terminales del transformador, está dado por: (Ref.15).

$$\bar{E}_L = \left[\frac{R_L' r_1 + j (R_L' + r_1) X_m}{R_L' r_1 + X_C X_m + j (R_L' X_m - R_L' X_C + r_1 X_m)} \right] \bar{E}_S \quad (\text{III.12})$$

El voltaje en los terminales del condensador, cuando $\bar{E}_S = 1.0$ p.u., está dado por: (Ref.15).

$$\bar{E}_C = 1.0 - \bar{E}_L \quad (\text{III.13})$$

$$\bar{E}_C = \frac{X_C X_m - j R_L' X_C}{R_L' r_1 + X_C X_m + j (R_L' X_m - R_L' X_C + r_1 X_m)} \quad (\text{III.14})$$

Al considerar que el transformador está descargado; bajo estas condiciones, R_L' (Resistencia ubicada como carga en el secundario) tiende a infinito y el voltaje en los terminales del transformador es: (Ref.15).

$$E_L = \frac{r_1 + jX_m}{r_1 + j(X_m - X_C)} \quad (\text{III.15})$$

Adicionalmente despreciando r_1 (supone pocas pérdidas en el transformador), la ecuación III.15 se reduce a:

$$E_L = \frac{X_m}{X_m - X_C} \quad (\text{III.16})$$

La ecuación III.16 indica que, E_L el voltaje en los terminales del transformador crece indefinidamente a medida que X_C se aproxima a X_m ; sin embargo X_m no es constante ya que está relacionado con el voltaje E_L ; y ésta relación se determina con el uso de la curva de magnetización del transformador (Ref.15).

De la ecuación III.16, el circuito de la Fig. III.4 queda reducido al siguiente diagrama (Ref. 14).

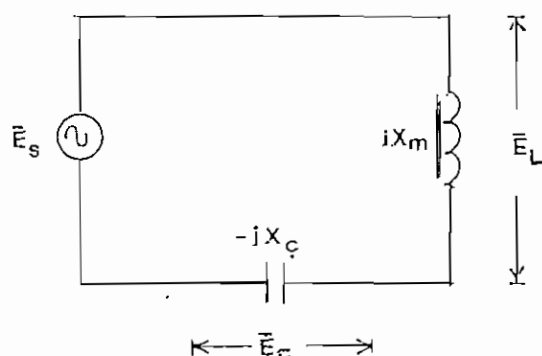


Fig. Nº III.5: Circuito CL (no lineal)

La operación del circuito de la Fig. Nº III.5, está descrito por:

$$\bar{E}_L = \bar{E}_S - \bar{E}_C \quad (\text{III.17})$$

Donde:

$\bar{E}_L$, voltaje en los devanados del transformador

$\bar{E}_S$, valor RMS del voltaje aplicado.

$\bar{E}_C$, voltaje en el condensador

Cada uno de los términos de la ecuación III.17, pueden ser trazados en un gráfico como se indica en la Fig. Nº III.6 (Ref. 14).

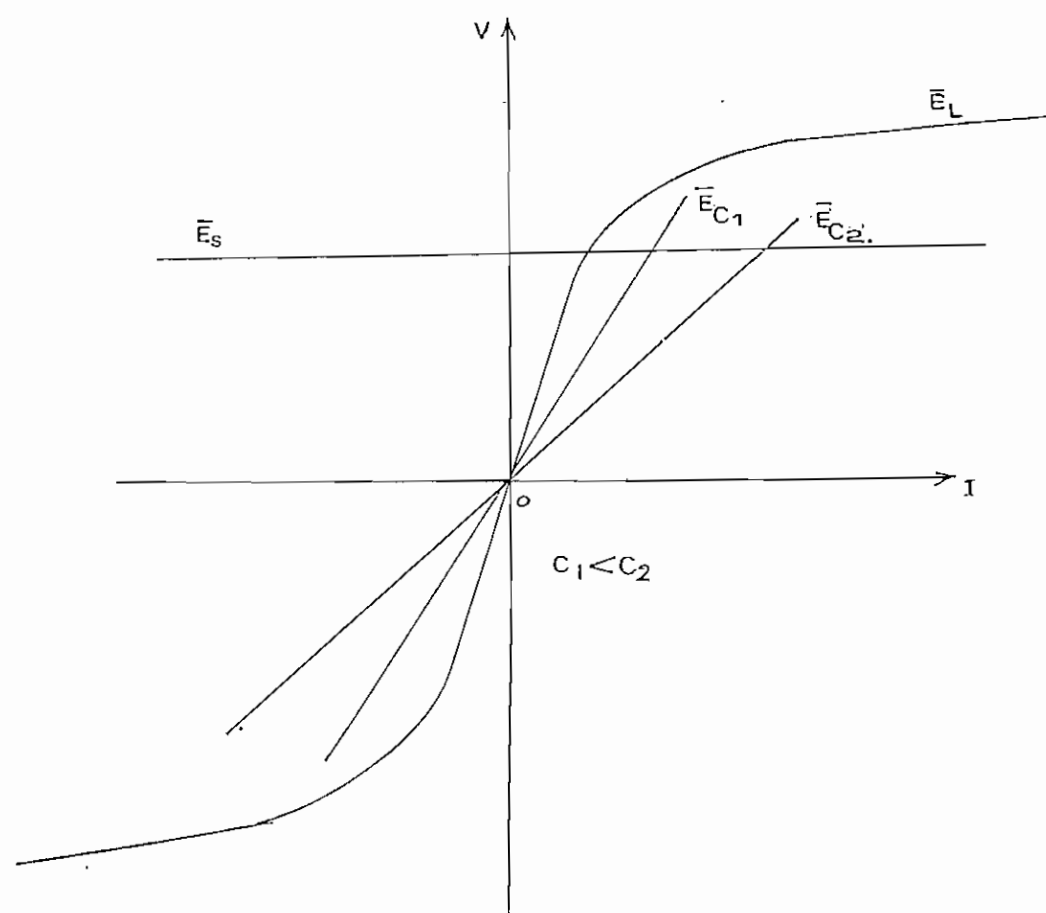


Fig. Nº III.6: Relaciones de $V - I$ de los elementos individuales del circuito CL (no lineal) de la Fig. Nº III.5

En el circuito de la Fig. Nº III.6, se aprecia que:

- $\bar{E}_s$, es una función lineal horizontal, cuyo valor es independiente de la corriente $\bar{I}$.
- $\bar{E}_C$, es una función lineal con pendiente, que pasa por el origen y cuyo valor es una función de la reactancia capacitiva a la frecuencia de $\bar{E}_s$.
- $\bar{E}_L$, tiene una característica no lineal y, es usualmente determinado por pruebas.

Si la ecuación III.17, se resuelve gráficamente; usando las características de la fuente y el voltaje en el condensador (Ver Fig. Nº III.6), resulta la Fig. Nº III.7:

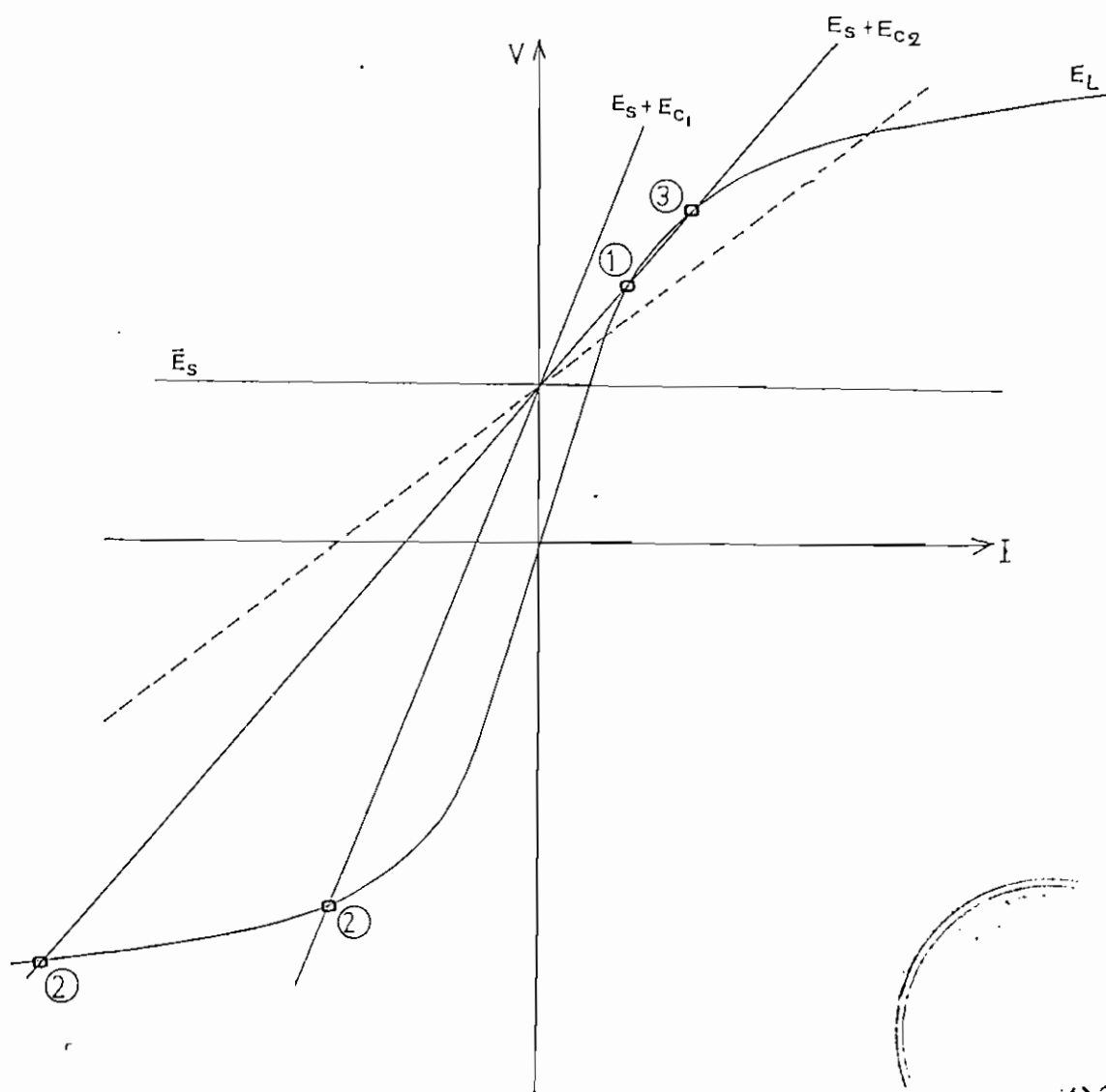


Fig. Nº III.7: Adición de voltaje E_s a las curvas E_{c1} y E_{c2} de la Fig. Nº III.6

Escribiendo de otra manera la ecuación III.17:

$$E_L = E_s + IX_C \quad (\text{III.18})$$

De las ecuaciones III.17 y III.18 se tiene la solución, ésto es, cuando la línea recta intersecta la curva de magnetización del transformador.

Aquella característica de voltaje asociado a C_2 , tiene 3 intersecciones con E_L , mientras que la relacionada con C_1 , tiene solamente 1.

Si se refiere a las intersecciones de $(E_S + E_{C_2})$:

El punto 1 muestra que el circuito no está saturado y es primordialmente inductivo. El punto 2 indica que el circuito tiene una capacitancia apreciable, y esta condición representa a una situación de comportamiento Ferroresonante estable. El punto 3 indica una posición intermedia, la cual puede aparecer por corto tiempo, siendo transitorio y por tanto inestable. (Ref. 14,15). Un incremento de X_C hasta $(E_S + E_{C_1})$ resulta solamente en una intersección con la rama negativa de la curva de magnetización, teniéndose una condición ferroresonante estable.

De igual manera, si X_C se ve disminuida, la recta $E_S + IX_C$ es casi paralela a la parte saturada de la curva de magnetización del transformador, una solución es positiva y débilmente mayor que el voltaje de suministro; las otras se aproximan en el infinito (Ref.14,15).

III.2.2.5. Parámetros de influencia en el circuito ferroresonante.

El continuo crecimiento de los sistemas de distribución, en ocasiones sin una planificación adecuada, hace posible encontrar parámetros que influyen en el comportamiento del circuito, los cuales pueden combinarse para ser susceptibles a una condición ferroresonante.

Los parámetros de influencia, se suman a continuación:

- Existe un incremento en la utilización de cables conductores en circuitos primarios (redes subterráneas), resultando sistemas con una mayor capacitancia a tierra que en líneas aéreas.
- Niveles de voltaje en el Alimentador Primario que no cumplen con los requisitos establecidos por las normas, dando como resultado el funcionamiento de transformadores por sobre su característica nominal de operación, llegando en ocasiones a trabajar en la región de saturación.
- Materiales y diseño del transformador improvisados, resultando transformadores con corrientes de excitación no contemplados por los constructores, esto influye en la impedancia de magnetización y consecuentemente en el comportamiento Ferroresonante del sistema (Ref.10).

De lo anterior se deduce que el problema de Ferroresonancia en un circuito general ó en un sistema de distribución en forma particular involucra a la capacitancia del circuito (Alimentador Primario) y la no linealidad (inductancia del núcleo magnético) de un transformador.

La capacitancia que interviene en la aparición de una condición ferroresonante, se debe a la de la línea aérea o cable, según se trate de un circuito aéreo o subterráneo.

Los cables tienen mayor capacitancia fase-tierra por unidad de longitud que las líneas aéreas; de esta manera el problema se establece más fácilmente en redes de distribución subterráneas (Ref. 16).

Con voltajes de distribución menores a 13.2 KV el problema es moderado, a menos que una considerable longitud de línea esté invo

lucrada. Para voltajes de distribución más altos (22.8/13.2 KV), la capacitancia de las líneas es ya un problema. Finalmente a voltajes mayores (34.5/19.9.KV), aún sin considerar a la línea que conecta al transformador, pueden ocurrir sobrevoltajes ferroresonantes por efecto de la capacitancia entre los devanados de alta y de baja del transformador y la de los devanados a tierra. La reactancia capacitiva puede ser comparable con la reactancia de magnetización del transformador, la cual incrementa la probabilidad de ocurrencia de los sobrevoltajes Ferroresonantes (Ref. 16).

Cuando en la red de distribución existen bancos de condensadores conectados al sistema, su capacitancia debe añadirse a la de la línea o el cable; la capacitancia total inherente se incrementa agravándose el problema (Ref. 17).

La inductancia se debe a la de un núcleo magnético, tal como sucede con la reactancia de magnetización de un transformador.

Como se ha manifestado, para una operación del transformador a voltaje nominal, la reactancia de magnetización se determina tomando como base los KVA nominales y el voltaje nominal del transformador. Para algún voltaje diferente de aquel, la reactancia puede ser calculada de la curva de magnetización del transformador (Ref. 17).

III.2.2.6 Efecto de los voltajes Ferroresonantes.

La presencia de los voltajes Ferroresonantes pueden estar indicados por descarga del pararrayos en la fase (s) abierta (s), o por falla del aislamiento del transformador, pararrayos, la línea u otros equipos. (Ref. 11).

Cuando los sobrevoltajes resultantes son menores que 1.1 por unidad no hay ningún problema en los componentes de la red; pero cuando éste se ubica entre 1.1 y 3.0 por unidad los resultados pueden ser, un calentamiento desmesurado del núcleo del transformador, o fallas del pararrayos conectado en los terminales del transformador.

Cuando el sobrevoltaje supera 3.0 por unidad puede fallar el aislamiento del sistema (Ref.14)

III.3 CASOS DE FERRORESONANCIA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCION

Se puede observar el comportamiento Ferroresonante en si tuaciones en las cuales la capacitancia de un Alimentador Primario (aéreo o subterráneo) está conectado en serie con la impedancia de magnetización de un transformador. Si se presentan condiciones de Ferroresonancia, éste comportamiento es severo si el neutro del Primario del Transformador no está conectado a tierra (Ref. 8).

A continuación se analizan los casos más conocidos de Ferroresonancia que pueden suceder en una red de distribución; entre los cuales se menciona:

- 1) Ferroresonancia por apertura de conductores
 - a) Apertura de un conductor de fase.
 - b) Apertura de dos conductores de fase.

- 2) Ferroresonancia por maniobra de bancos de transformadores monofásicos.
 - a) Una fase energizada
 - b) Dos fases energizadas.
- 3) Ferroresonancia debido a la red de capacitancias internas de los devanados de un transformador.
- 4) Ferroresonancia en circuitos con compensación serie.

III.3.1 Ferroresonancia por apertura de conductores.

Si entre el sistema (fuente) y el transformador descargado se interrumpen una o dos fases, puede ocurrir sobrevoltajes en el conductor o conductores abiertos. El cálculo de los sobrevoltajes se basa en el método de las componentes simétricas.

La reactancia capacitiva a tierra de secuencia positiva, negativa y cero de la línea o cable subterráneo pueden ser calculados con suficiente exactitud en tanto y cuanto se dispongan de los datos necesarios: diámetro de los conductores, espacio entre ellos, longitud de la línea, material del aislamiento; etc. (Ref. 18).

III.3.1.1 Apertura de un conductor.

La Fig. Nº III.8.a muestra el circuito en el cual se tiene un conductor abierto; esta condición puede producir una inversión de fase y sobrevoltajes.

Cuando un conductor de fase de un circuito 3 $\emptyset$ conectado a un banco de transformadores 1 $\emptyset$ ó transformadores 3 $\emptyset$ sin carga en el circuito secundario, es abierto, se forma un camino para la circulación de corriente por los otros conduc

tores de fase, a través de la impedancia de magnetización X_m del transformador, y de allí a tierra a través de la capacitancia fase-tierra - del conductor abierto.

La reactancia capacitiva de secuencia positiva, negativa y cero, y la reactancia de magnetización X_m , se combinan para dar una condición Ferresonante y de esta manera sobre voltajes (Ref.17,18).

Para el caso de un conductor abierto las redes de secuencia interconectadas se ilustran en la Fig. Nº III.8.b.

El valor del sobrevoltaje en la fase abierta, determinado en base al método de las componentes simétricas es: (Ref. 18).

$$E_{ay} = \frac{X_C X_m - X_{co} (X_m - X_C)}{X_C X_m + 2(X_{co} (X_m - X_C))} E_1 \quad (III.19)$$

Donde: X_C , reactancia capacitiva de secuencia positiva

X_{co} , reactancia capacitiva de secuencia cero.

(1)

X_m , reactancia de magnetización del transformador.

E_1 , voltaje generado de secuencia positiva (se asume 1.0 p.u)

E_{ay} , magnitud del sobrevoltaje en la fase abierta con respecto a tierra.

(1): La impedancia de magnetización se asume que es igual para las secuencias positiva, negativa y, cero:(Ref. 18).

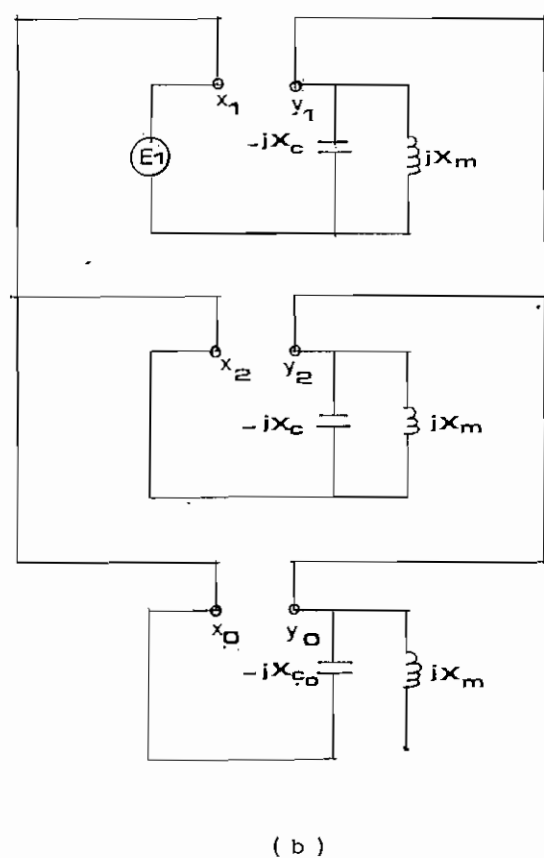
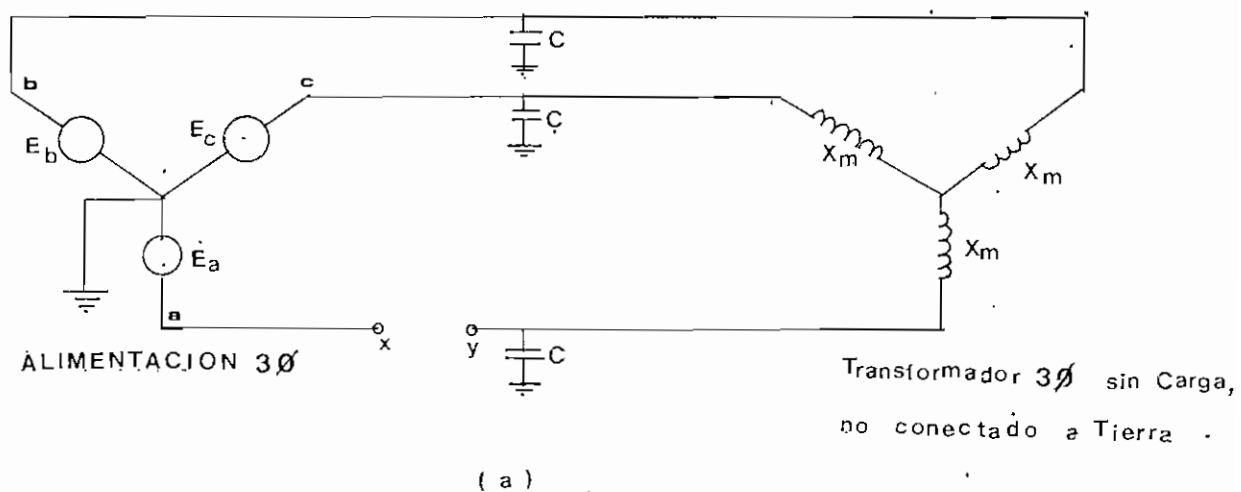


Fig. Nº III.8: a) Sistema solidamente conectado a tierra, un conductor abierto.

b) Circuito equivalente, una fase abierta .

De la ecuación (III.19), si $X_{co} (X_m - X_c)$ es mayor que $X_c X_m$, la magnitud de E_{ay} se incrementa negativamente y bajo estas condiciones se produce una inversión de fase; caso contrario, E_{ay} se incrementa positivamente.

Si la relación X_c/X_m se aproxima a la unidad, E_{ay} se aproxima a 1.0 pu.

Si la relación $X_c/X_{co} = 1.0$, como se considera a cables conductores de redes subterráneas la relación III.19 se reduce a:

$$E_{ay} = \frac{X_{co}/X_m}{3 - 2 X_{co}/X_m} \quad (III.20)$$

La última relación también se la obtiene a partir del circuito de la Fig. Nº III.8.a, utilizando el teorema de Thevenin; es decir, reemplazando el circuito de ésta Fig. por una fuente de voltaje de valor $-1/2 E_a$, y el valor de la impedancia vista desde el punto y; como se ilustra en la Fig. Nº III.9:

La magnitud de E_{ay} tomará diferentes valores dependiendo del valor de la relación X_{co}/X_m .

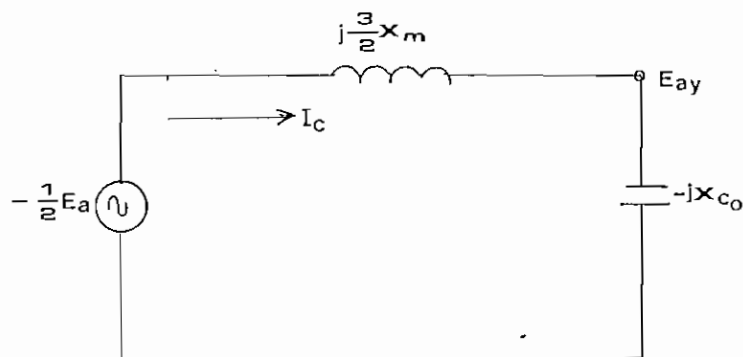


Fig. Nº III.9: Circuito equivalente obtenido a partir de la Fig. Nº III.8.a Cuando $X_c = X_{co}$.

III.3.1.2. Apertura de dos conductores.

La Fig. Nº III.10.a., muestra un circuito que tiene dos conductores abiertos.

Cuando dos conductores de un circuito 3 $\emptyset$, que suministra a un banco de transformadores 1 $\emptyset$ o transformadores 3 $\emptyset$ sin carga en el circuito secundario es abierto, se tiene un camino para el flujo de corriente de la fase a a través de la reactancia de magnetización X_m del transformador y de allí a tierra a través de la capacitancia - fase-tierra de las fases abiertas.

La reactancia capacitiva de secuencia positiva, negativa y cero de los conductores abiertos, y la reactancia de magnetización X_m pueden tener una relación tal que aparecen condiciones de Ferroresonancia, y consecuentemente sobrevoltajes. (Ref. 17,18).

Para este caso, las redes de secuencia interconectadas se ilustran en la Fig. Nº III.10.b.

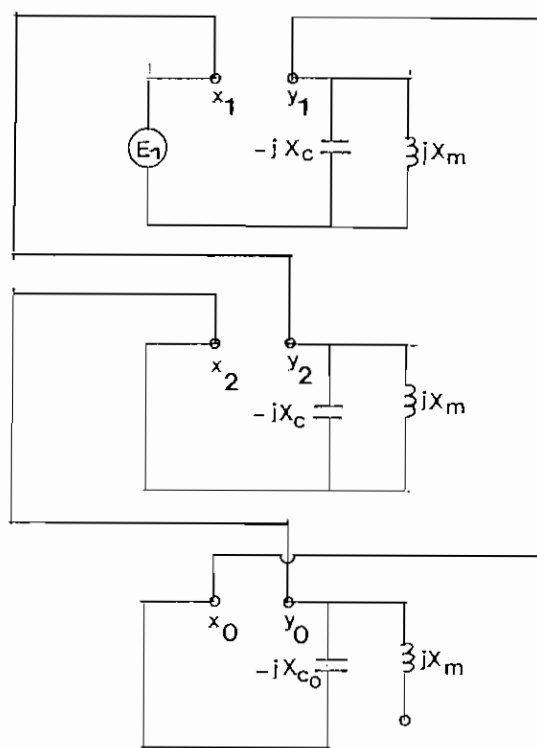
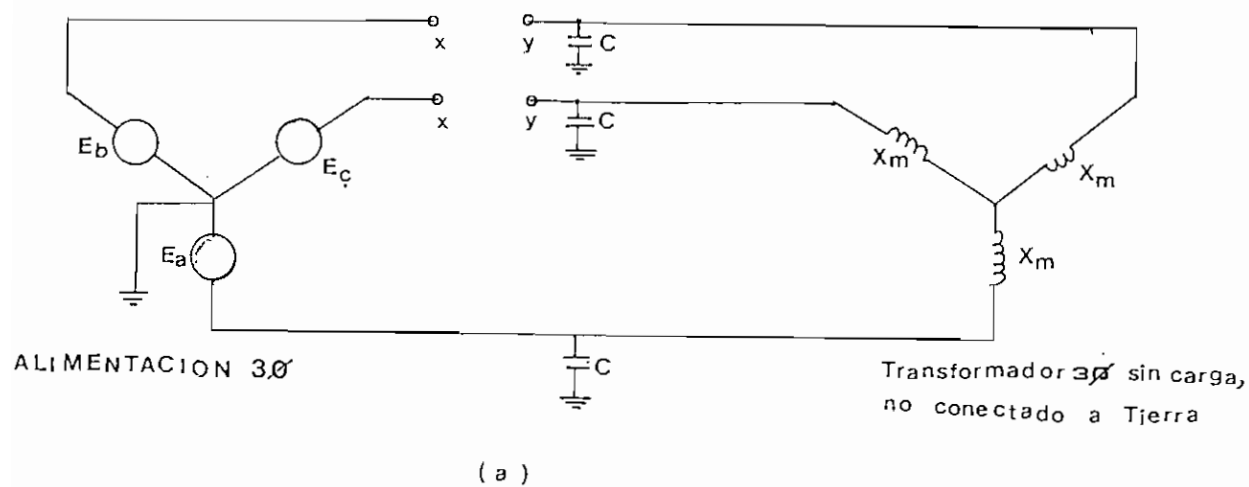


Fig. N° III.10: a) Sistema solidamente conectado a tierra, dos conductores abiertos.

b) Circuito equivalente (dos fases abiertas).

El valor de la magnitud del sobrevoltaje en las fases abiertas es determinado tomando como base el estudio de las componentes simétricas y resulta ser: (Ref. 18).

$$E_{by} = E_{cy} = \frac{X_{co} (X_c - X_m) + X_c X_m}{X_{co} (X_c - X_m) - 2 X_c X_m} \bar{E}_1 \quad (\text{III.21})$$

Donde: X_c , reactancia capacitiva de secuencia positiva

X_{co} , reactancia capacitiva de secuencia cero

X_m , reactancia de magnetización del transformador

$\bar{E}_1$, voltaje generado de secuencia positiva (se asume 1.0 p.u.)

E_{by}, E_{cy} , magnitud del sobrevoltaje en las fases abiertas (b y c por ejemplo), con respecto a tierra.

Quienes estén interesados en la deducción de las relaciones (III.19) y (III.21); éstas están incluidas en el Apéndice A.

De la ecuación III.21, si la relación $2X_c X_m$ es mayor que $X_{co} (X_c - X_m)$, la magnitud de E_{by} ó E_{cy} se incrementa negativamente por lo tanto, bajo estas condiciones también se produce una inversión de fase; caso contrario E_{by} se incrementa positivamente.

Como en el caso de un conductor abierto, si la relación $X_c/X_{co} = 1.0$, como se considera en el caso de cables conductores, la relación III.21 se reduce a:

$$E_{by} = E_{cy} = \frac{X_{co}/X_m}{X_{co}/X_m - 3} \quad (\text{III.22})$$

La última relación también se la puede obtener utilizando el teorema de Thevenin para el circuito de la Fig. N° III.10.a, como se ilustra en la Fig. N° III.11

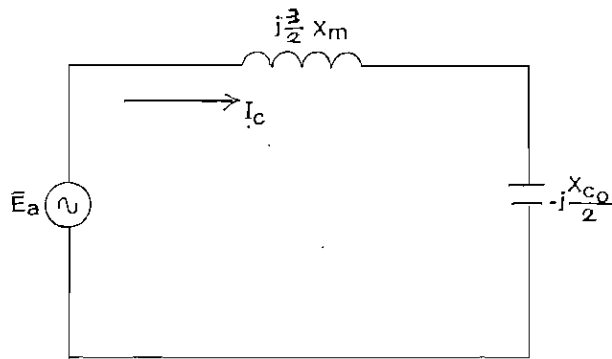


Fig. Nº III.11: Circuito equivalente obtenido a partir de la Fig. Nº III.10.a Cuando $X_{co} = X_c$

La magnitud de E_b toma distintos valores, dependiendo del valor que tome la relación X_{co}/X_m .

III.3.2. Ferroresonancia por maniobra de bancos de transformadores 1Ø ó transformadores 3Ø.

Se pueden presentar sobrevoltajes ferroresonantes durante una maniobra monopolar de Bancos de transformadores 1Ø ó transformadores 3Ø, cuando se energiza el mismo con aparatos de maniobra monopolares.

Cuando por ejemplo se energice una sola fase al cerrar el fusible correspondiente el sobrevoltaje será evidente en las fases abiertas tan pronto como se cierre el seccionador-fusible de aquella fase.

La Fig. Nº III.12, muestra el diagrama unifilar de un circuito de distribución típico donde la maniobra puede suceder. Allí se tiene un alimentador primario de construcción aérea o subterránea.

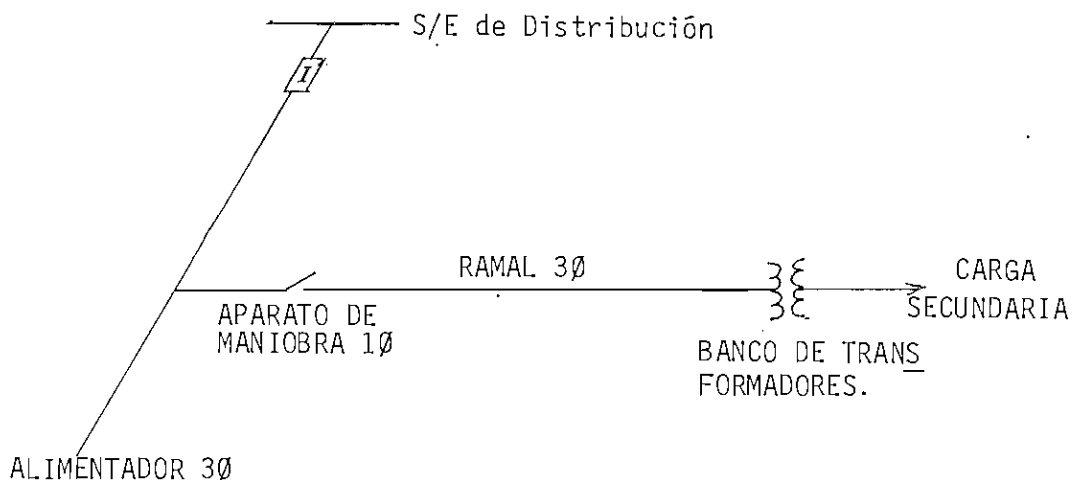


Fig. Nº III.12; Parte de un circuito de distribución típico.

La Fig. Nº III.13, muestra "detalles" del circuito 3 ϕ equivalente de la Fig. Nº III.12, en el cual se ha incluido la capacitancia fase-tierra del alimentador primario.

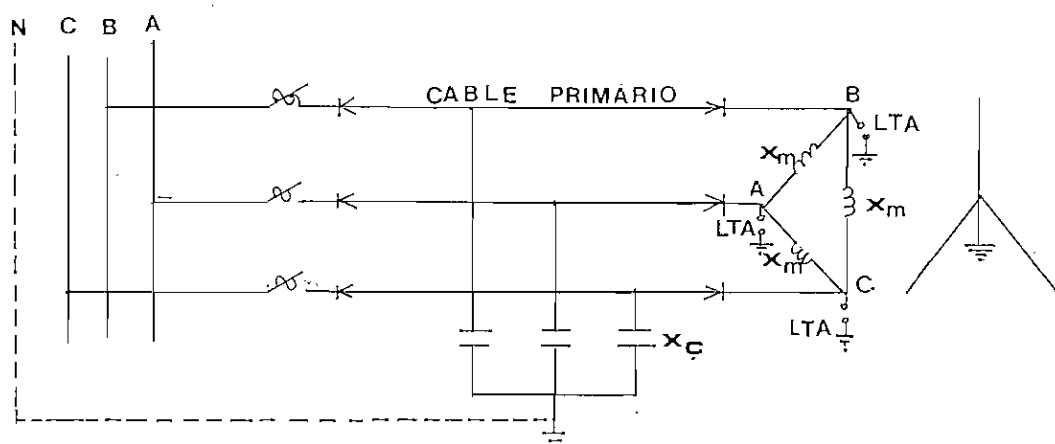


Fig. Nº III.13: Transformador 3 ϕ , dos fases abiertas, mostrando la capacitancia del cable.

De este diagrama, cuando una fase es energizada (fase B por ejemplo), los devanados BA y BC del transformador están energizados en serie con las capacitancias a tierra de las fases A y C respectivamente; de tal manera que el circuito ferresonante está presente y los sobrevolta-

jes pueden aparecer tanto en el devanado del transformador, como en la capacitancia de la línea. Inclusive se aprecia que el pararrayos, al estar en paralelo con la capacitancia del ramal, está sujeto a sobrevoltajes por efecto ferroresonante.

Esta situación ocurre como resultado de una maniobra secuencial fase (Ref.19).

III.3.2.1. Efecto de las conexiones de los bancos de transformadores 1Ø ó transformadores 3Ø.

III.3.2.1.1 Conexiones: $Y-\Delta$; $\Delta-Y_{\frac{1}{2}}$

Casos severos de ferroresonancia se producen cuando el neutro del primario de bancos de transformadores 1Ø ó transformadores 3 Ø no tienen un punto de conexión a tierra; siendo éstas principalmente - las conexiones $Y-\Delta$; $\Delta-Y_{\frac{1}{2}}$. Un banco de transformadores 1Ø ó transformador 3Ø conectados simétricamente $Y-\Delta$; $\Delta-Y_{\frac{1}{2}}$, todos ellos se comportan más o menos de la misma manera en el circuito de la Fig. Nº III.12, cuando una ó dos fases están abiertas (Ref.19).

Resultados de pruebas e investigaciones indican que el tipo de núcleo magnético usado tiene una pequeña, si la hay, influencia en los sobrevoltajes resultantes Ref. 20,21):

- Una fase energizada.

La Fig. Nº III.14.a, muestra las curvas del voltaje a tierra en una fase abierta, para un transformador conectado $Y-\Delta$, y la Fig. Nº - III.14.b para una conexión de los devanados del transformador $\Delta-Y_{\frac{1}{2}}$.

Los diagramas muestran el voltaje a tierra, como una función de $\frac{X_{co}}{X_m}$, donde: X_m es la reactancia de magnetización del transformador, y X_{co} es la reactancia capacitiva a tierra de secuencia cero de la línea entre el transformador y los aparatos de maniobra.

En la Fig. N° III.14, las curvas de línea sólida y segmentada muestran valores calculados; mientras los puntos trazados indican valores obtenidos por estudios en el analizador transitorio de redes (TNA) (Ref. 20,21).

Se aprecia que para valores bajos $\frac{X_{co}}{X_m}$ hay la posibilidad de obtener 3 valores de magnitud de voltaje diferentes, para un mismo valor de $\frac{X_{co}}{X_m}$.

Para valores grandes de $\frac{X_{co}}{X_m}$, se ve que la rama positiva se aproxima a + 1.0 p.u. Este es el caso en el que no se incluye a la capacitancia del ramal y el transformador está energizado una sola fase; luego el voltaje es semejante al de la fuente de alimentación.

Para valores pequeños de X_{co}/X_m , las magnitudes de los voltajes se incrementan a valores altos, y una situación de verdadera Ferresonancia se aproxima entre X_{co} y X_m ; bajo éstas condiciones, los voltajes están limitados solamente por la resistencia del sistema. (Ref. 20,21).

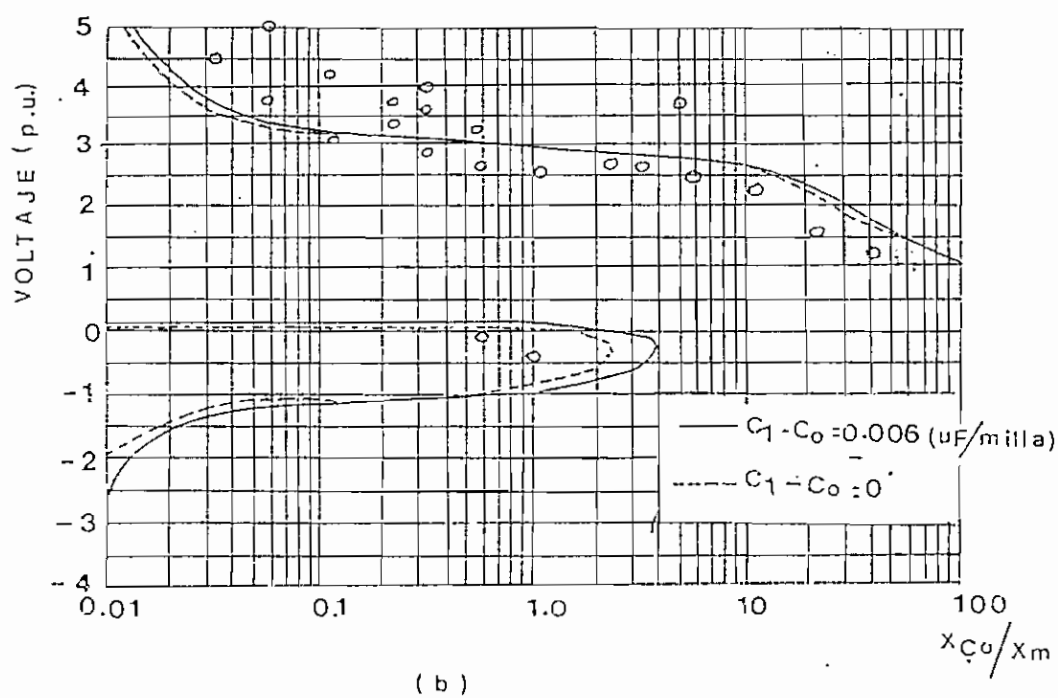
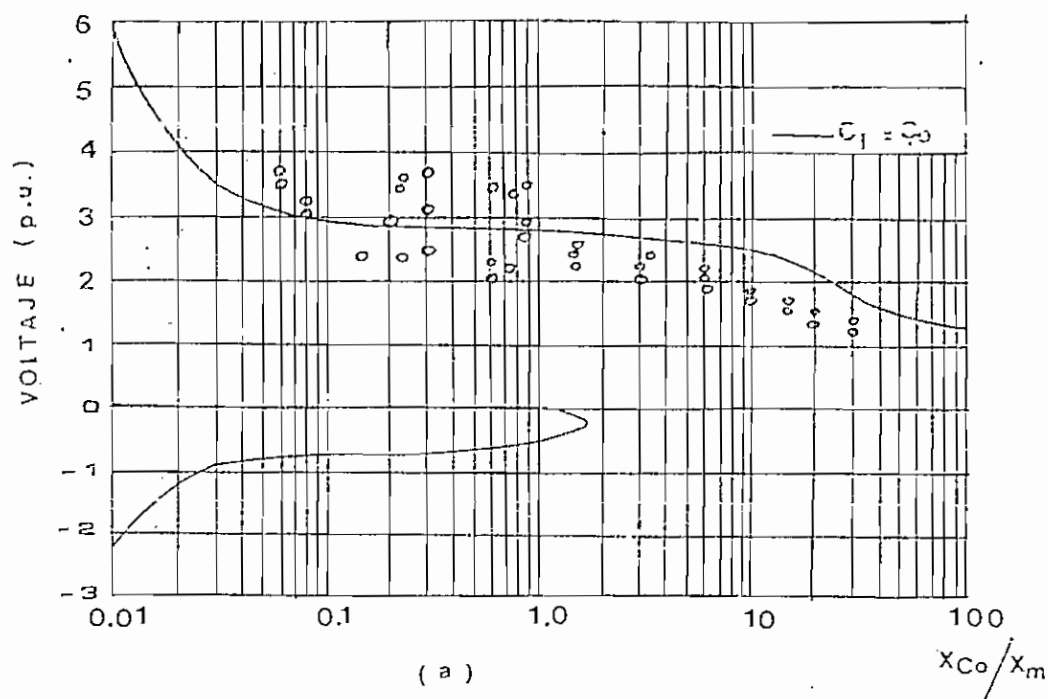


Fig. N° III.14: Voltaje fase-tierra en una fase abierta; con una fase energizada.

a) Conexión $Y-\Delta$

b) Conexión $\Delta-Y$

- Dos fases energizadas.

La Fig. Nº III.15.a, muestra el voltaje a tierra de la fase abierta para una conexión de los devanados del transformador $Y-\Delta$, y la Fig. Nº III.15.b, para una conexión $\Delta-Y$.

En la Fig. Nº III.15, las curvas de líneas sólida y segmentada muestran valores calculados, mientras los puntos trazados indican valores obtenidos por estudios en el Analizador Transitorio de Redes (TNA). (Ref. 20,21). Para valores grandes de $\frac{X_{co}}{X_m}$, la curva se aproxima a valores de $-1/2$, esto para el caso de no tener longitud de ramal. Con las fases b y c (por ejemplo) energizadas, el voltaje en la fase abierta será el promedio de uno de ellos el cual es $(-1/2)$ de la fase a, fase tomada como referencia.

Con valores bajos de $\frac{X_{co}}{X_m}$, el circuito se aproxima a ferresonancia entre X_{co} y X_m , como es para el caso de una fase energizada. Se observa también en este caso la posibilidad de obtener tres valores diferentes, para un mismo valor de $\frac{X_{co}}{X_m}$. (Ref. 20,21).

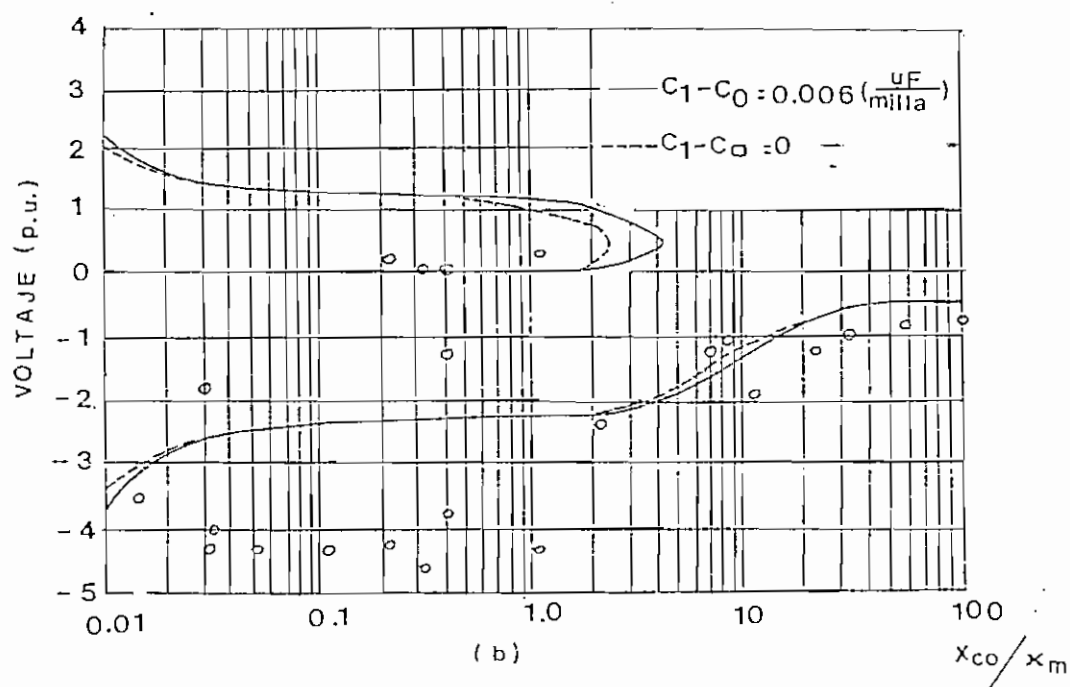
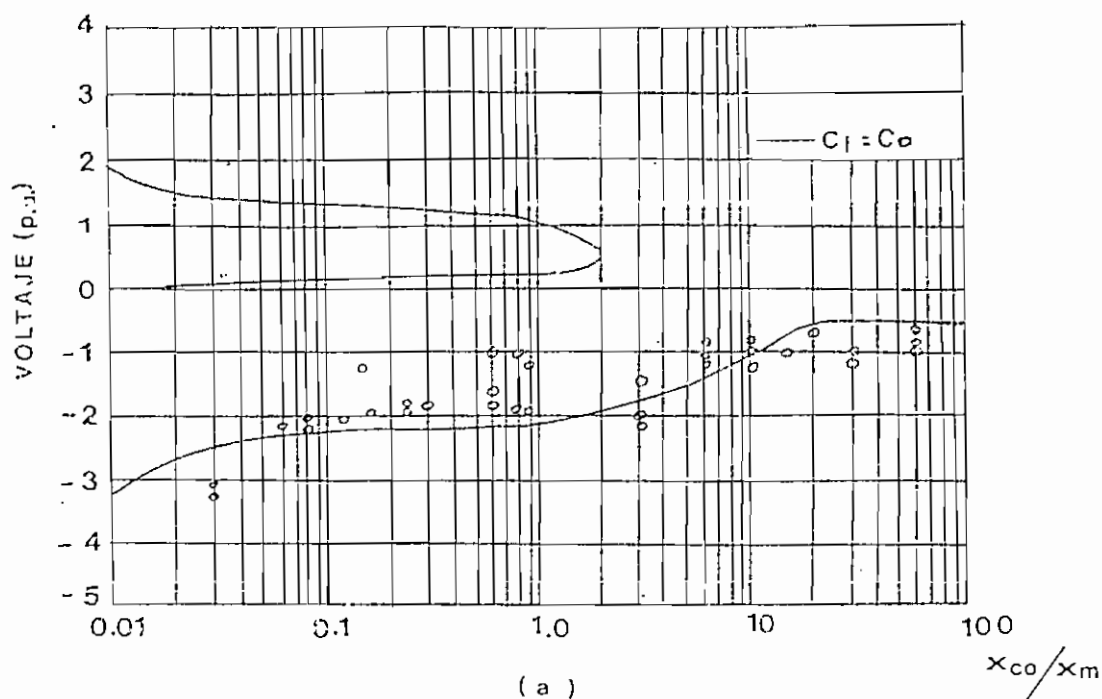


Fig. N°- III.15: Voltaje fase-tierra en una fase abierta, con dos fases energizadas.

a) Conexión $Y-\Delta$

b) Conexión $\Delta-Y$

III.3.2.1.2 Conexión $Y-Y$

El comportamiento bajo esta conexión es similar a las analizadas; cabe mencionar sin embargo su poco uso, debido a dificultades provenientes de la inestabilidad del neutro e interferencias.

El neutro del primario flotará, lo que produce una inestabilidad del mismo debido a que el flujo de la corriente de excitación no es el adecuado.

Las componentes armónicas producidas por el transformador pueden aparecer en las líneas de distribución y pueden inducir voltajes y corrientes en circuitos de comunicación cercanos.

Otra dificultad adicional en transformadores 3 ϕ es que con cargas desbalanceadas y monofásicas causa un flujo de corriente interna resultando un calentamiento del tanque, con el consiguiente peligro de daños si éste flujo es excesivo. (Ref.22)

III.3.2.1.3 Conexión $Y_{\text{ne}}-Y_{\text{ne}}$

(Tomado de la Ref.23)

Bajo condiciones especiales del sistema, pueden aparecer sobrevoltajes ferroresonantes; aunque muchos menores que los casos estudiados y que excepcionalmente están presentes.

La condición especial es la existencia de acoplamiento entre los devanados del transformador entre la (s) fase (s) energizada (s) y la(s) fase(s) abierta(s), el que conjuntamente con la capacitancia a tierra de la línea establece un complejo circuito no lineal, el cual puede producir sobrevoltajes. El acoplamiento existe, cuando el nú-

cleo magnético es de 5 columnas (4 ventanas), es decir, es del tipo -
acorazado.

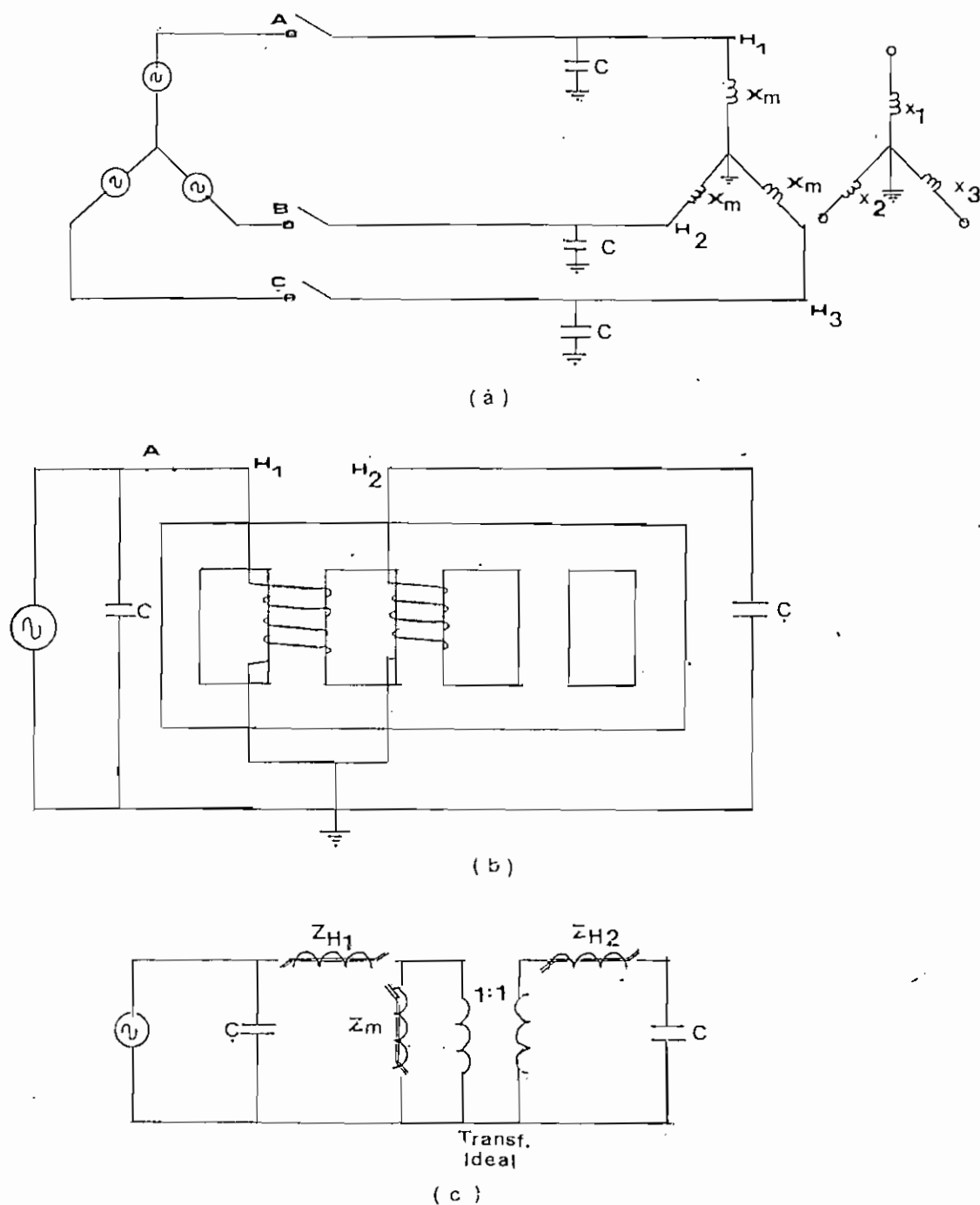


Fig. N° III.16: a) Maniobra remota de un transformador $\nabla \nabla$
 b) Sistema simplificado para la descripción del fenómeno
 c) Circuito equivalente aproximado.

En el circuito de la Fig. Nº III.18.c:

C capacitancia a tierra de la línea

Z_{H1} impedancia de pérdidas del devanado entre el terminal H_1 y tierra.

Z_{H2} Impedancia de pérdidas del devanado entre el terminal H_2 y tierra.

Z_m Impedancia de magnetización equivalente.

La ocurrencia del fenómeno se resume así:

Si se asume que el terminal H_1 está cerrado en la Fig. Nº III.16.a, y la línea de la fase C está desconectado del transformador en el terminal H_3 . En éstos términos, el devanado entre el terminal H_3 y tierra; y los devanados del secundario en circuito abierto pueden ser despreciados, puesto que esencialmente ninguna corriente fluye en ellos.

El circuito de la Fig. Nº III.16.b) confirma las asunciones destacadas antes. El transformador aparece como una unidad de dos devanados, con una relación de vueltas 1:1.

El voltaje del terminal H_1 está fijado por el del sistema, y el terminal H_2 del transformador está conectado a tierra a través de la capacitancia de la fase B.

Un circuito equivalente aproximado se muestra en la Fig. Nº III.16.c, donde: Z_{H1} representa la impedancia de pérdidas del devanado entre el terminal H_1 y tierra, Z_{H2} es la impedancia de pérdidas del devanado entre H_2 y tierra, Z_M corresponde a una impedancia de magnetización equivalente; de ésta manera es razonable pensar en la ocurrencia de ferrosancia con la capacitancia del cable.

Si las impedancias Z_{H1} , Z_{H2} , Z_M , son puramente inductivas, bilaterales y lineales; existirá un valor de capacitancia C_c al cual

se puede producir un voltaje de magnitud apreciable desde el terminal H_2 a tierra.

III.3.2.1.4 Ferroresonancia en Transformadores de Potencial.

Transformadores de potencial conectados Y- Δ abierto, algunas veces fallan en sistemas por efecto ferroresonante.

Fallas momentáneas a tierra u operaciones de maniobra son la causa de voltajes fase-tierra que se incrementan hasta valores mayores que el nominal y pueden mantener oscilaciones entre la reactancia de magnetización del transformador y la capacitancia a tierra del circuito, en otras palabras existe una condición ferroresonante.

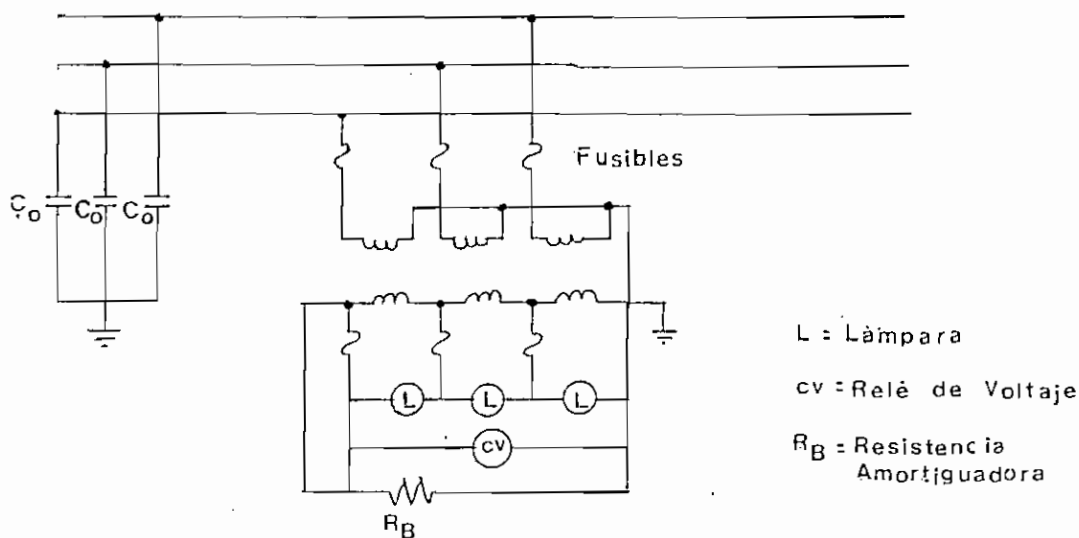


Fig. Nº III.17: Transformador de Potencial conectado Y - Δ abierto a una red de distribución.

La Fig. III.17, es un diagrama típico de un grupo de T/p usados en circuitos 3 $\emptyset$ para protección de fallas.

C representa la capacitancia fase-tierra de la línea. El relé de voltaje es usado para alarma automática y R_B es una resistencia que es usada para protección de los transformadores. (Ref.24).

III.3.3. Ferroresonancia debido a la red de Capacitancias Internas de los devanados de un transformador.

(Tomado de la Ref.16)

Cuando los niveles de voltaje de un sistema de distribución son más altos (como es el caso de 34.5/19.9 KV en el caso de redes ubicados en otros países U.S.A. por ejemplo), la red de capacitancias internas de un transformador puede reaccionar con las características de magnetización del mismo, resultando altos voltajes sostenidos por efecto de condiciones ferroresonantes. Bajo esta situación; puede o no estar involucrada la capacitancia de la línea que conecta al banco o transformadores 3 Ø.

La red de capacitancias internas del transformador está asociado con la capacitancia distribuida desde cada devanado a tierra (tanto el núcleo) o entre devanados; así como también entre espiras de cada devanado.

Para estudios de sobrevoltajes de maniobra; se asume que cada devanado es una superficie equipotencial, entonces no son tomados en cuenta la capacitancia entre espiras.

La Fig. Nº III.18.a, muestra un transformador 1 Ø de dos devanados; los valores de la capacitancia efectiva del devanado de alto voltaje a tierra y entre devanados; y del devanado de bajo voltaje a tierra.

La Fig. N° III.18.b, muestra los valores de capacitancia de la Fig. N° III.18.a, concentrados en los terminales de los devanados. Se observa que la mitad de cada valor es asignado a cada terminación de los devanados; se recalca la suposición de superficie equipotencial de los devanados.

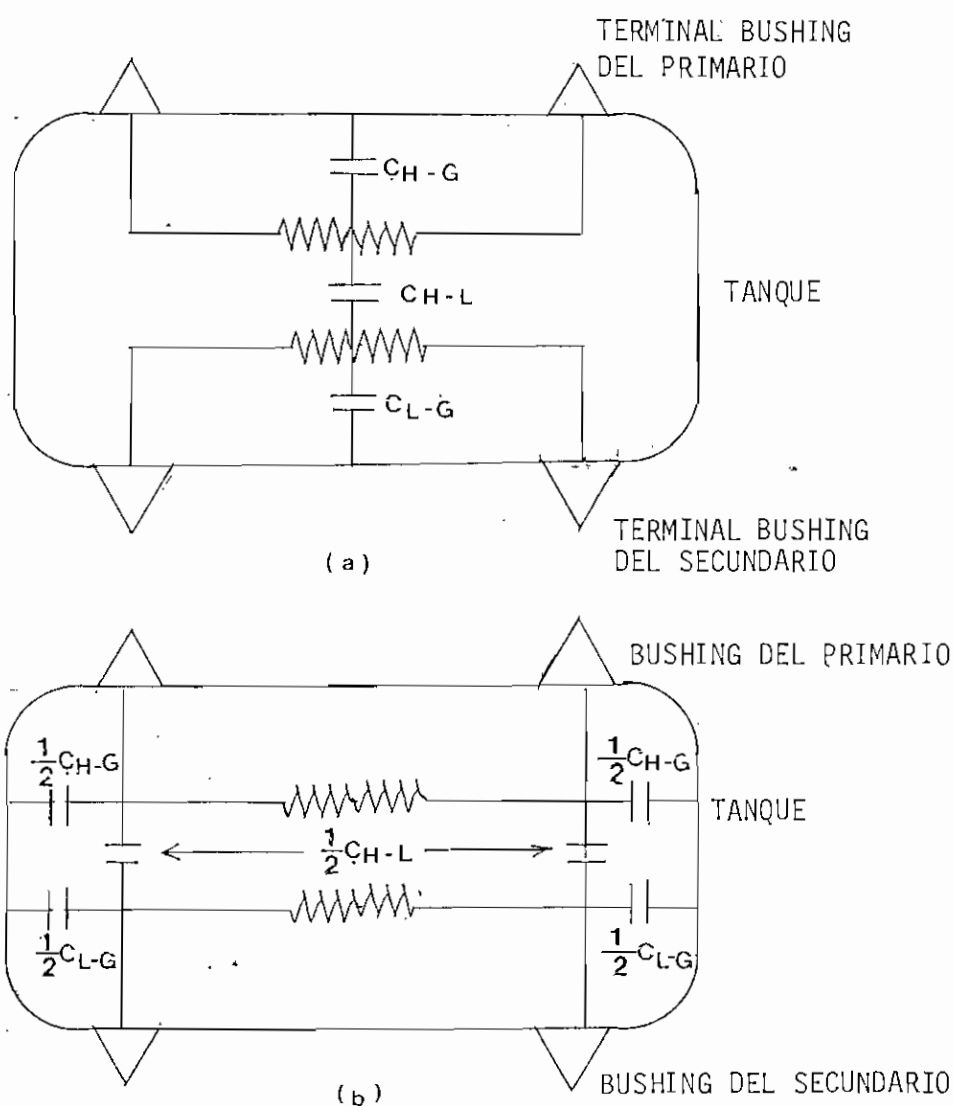


Fig. N° III.13: Transformadores de dos devanados

- a) Valor de capacitancia efectiva.
- b) Valores de capacitancia concentrada.

La Fig. Nº III.19, muestra al circuito de capacitancia obtenido a partir de la Fig. III.18.a

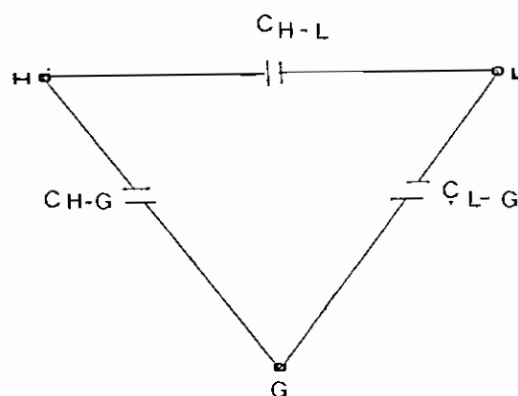


Fig. Nº III.19: Circuito de capacitancias simplificado de la Fig. Nº III.18.a

Se aprecia que, la capacitancia del Bushing del transformador se sumará directamente con el valor a tierra, con el cual está asociado (primario ó secundario).

III.3.4. Ferroresonancia en circuitos con compensación serie.

En los últimos años se ha ido aplicando combinaciones de condensadores en serie con Alimentadores Primarios, con la finalidad de reducir o eliminar las fluctuaciones de voltaje y las caídas de voltaje. (Ref. 25).

La Fig. Nº III.20, muestra una conexión típica de condensado-

res conectados en serie con un Alimentador Primario se aprecia que el condensador está en serie con el devanado del transformador.

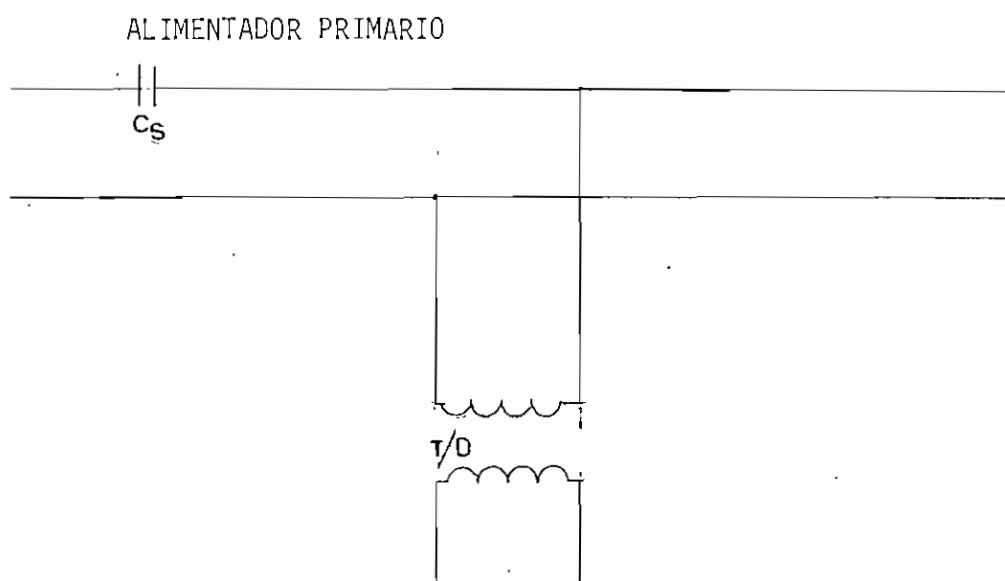


Fig. Nº III.20: Conexión de un condensador en serie con un transformador de Distribución.

El fenómeno se produce cuando se energiza el transformador de distribución y el condensador en serie. Es básicamente un fenómeno de ferresonancia, acompañado de oscilaciones subarmónicas sostenidas como resultado de la corriente de energización que almacena una carga en el condensador durante el primer ciclo de voltaje aplicado y la reacción consecuente del circuito a la disipación de esta carga. Si el flujo no se invierte en el próximo semiciclo no existe inversión de corriente, y de esta manera la carga permanece en el condensador. Usualmente existe una pequeña corriente que fluye, quitando parte de la carga.

Durante los ciclos siguientes: las oscilaciones de flujo y corriente disminuyen debido al decrecimiento natural del flujo y un efecto de disminución de la carga original en el condensador. Si durante estos pasos se descarga del condensador; una oscilación inversa de corriente; invierte el signo de la carga del mismo, entonces el núcleo del transformador se saturará en la dirección opuesta al del flujo original; cuando ésta condición comienza, oscilaciones grandes de corriente ocurrirán y el fenómeno será repetitivo y sostenido, y por lo tanto se ha hecho presente una condición ferresonante. (Ref.12).

CAPITULO IV

CRITERIOS Y METODOS DE CONTROL DE FERRORESONANCIA

IV.1. CRITERIOS GENERALES.

En la sección anterior se ha realizado el estudio de la ferroresonancia y, los casos más conocidos de su ocurrencia en Sistemas de Distribución bajo diferentes condiciones.

Aunque la probabilidad de que ocurra Ferroresonancia en un Sistema de Distribución es pequeña, en el caso de presentarse existe peligro de daños en el sistema como consecuencia de los sobrevoltajes; haciendo que ésta situación no deba ser ignorada; por lo tanto se hace necesario tomar medidas tendientes a controlar esta condición.

Es por ello que han sido propuestas diferentes medidas ó procedimientos para controlar, atenuar ó eliminar el efecto ferroresonante. Algunas de éstas medidas involucran al diseño de la Red de Distribución cuando se planifica su expansión; como es el caso de determinar la longitud apropiada del conductor primario entre los aparatos de maniobra monopolares y el transformador, el uso de carga secundaria adecuada, ó la inclusión de elementos de maniobra tripolares.

Otros procedimientos involucran la adopción de apropiadas secuencias de operación ó selección adecuada de las conexiones del banco de transformadores 1 $\emptyset$ o transformadores 3 $\emptyset$ en función de la carga a servirse.

A continuación se analiza detenidamente cada uno de los métodos y procedimientos de control más conocidos para control de ferresonancia.

IV. 2. EVALUACION DE LOS METODOS DE CONTROL.

Mientras existan condiciones para el aparecimiento del circuito Ferresonante en Redes de Distribución (sobre todo en niveles de voltaje primario altos, como son 22.8/12.3 KV. y 34.5/19.9 KV); es necesario basarse en éstas para poder analizar y evaluar los métodos de control tendientes a corregir los efectos que se producen por ésta causa (Ref.11).

IV.2.1. Métodos que involucran al diseño del circuito.

IV.2.1.1 Longitud apropiada del Alimentador Primario.

La longitud de línea, entre los elementos de maniobra 1Ø y el banco de transformadores 1Ø o transformador 3Ø no debería exceder un valor; el cual debe ser determinado como una función del voltaje nominal de línea, los KVA nominales del transformador y la corriente de magnetización del mismo.

Despreciando las pérdidas, la impedancia de magnetización - X_m de un Transformador está dado por (Ref. 20,21).

$$X_m = \frac{10^5 \text{ KV}^2}{I_{exc} \% \text{ KVA}} \quad (\text{IV.1})$$

Donde:

$I_{exc}\%$, es la corriente de magnetización en %

KV, es el voltaje nominal entre fases del alimentador

KVA, es la potencia nominal del transformador.

La reactancia capacitiva a tierra de secuencia cero del circuito primario es: (Ref. 20,21).

$$X_{Co} = \frac{10^6}{2 \pi f C_o \ell} \quad (IV.2)$$

Donde:

X_{Co} , es la reactancia capacitiva a tierra de secuencia cero

f , es la frecuencia del sistema (60 Hz).

C_o , es la capacitancia a tierra de secuencia cero en (uF/m)

ℓ , es la longitud del ramal en m.

Valores típicos de la capacitancia de secuencia cero, para rangos de voltaje en Sistemas de Distribución que están entre 6.3 KV y 34.5 KV., son (Ref.26).

- Construcción aérea: $C_o = 0.01$ (uF/milla)
- Cable protegido: $C_o = (0.25 - 0.40)$ (uF/milla).

Un valor promedio es: $C_o = 0.35$ (uF/milla) (Ref.26).

Si se desea un valor más aproximado de C_o , para líneas aéreas y cables conductores monopolares se pueden utilizar las relaciones que se dan en el Apéndice B.

Combinando las ecuaciones (IV.1) y (IV.2), se tiene:

$$\frac{X_{Co}}{X_m} = \frac{10^6}{2 \pi f C_o \ell} \times \frac{I_{exc\%} \text{ KVA}}{10^5 \text{ KV}^2} \quad (IV.3)$$

Resultando:

$$\ell = A \times \frac{I_{exc\%} \text{ KVA}}{\text{KV}^2} \quad (IV.4)$$

Donde:

$$A = \frac{0.02653}{\left(\frac{X_{Co}}{X_m} \right) C_o} \quad (IV.5)$$

Uno de los factores de control, con el fin de prevenir el calentamiento del núcleo es que el voltaje en los terminales de los devanados del transformador no debe exceder 1.1 veces el voltaje nominal. Las Figs. N° III.14 y III.15 muestran el valor que debe tener la relación X_{Co}/X_m para que aquello ocurra. (Ref. 20,21).

Otro de los factores de control, con el fin de prevenir fallas en el pararrayos, es que el voltaje a tierra en las fases abiertas debería estar limitado a 1.25 veces el voltaje nominal; éste criterio - asume que el sistema está efectivamente conectado a tierra ($R_o/R_l \leq 1$, y $X_o/X_l \leq 3$) (Ref. 20,21).

Si se refiere a la Fig. N° III.14.a, para conexiones de los devanados en $\nabla\Delta$, se puede observar que 1.25 veces el voltaje nominal a tierra ocurre cuando la relación X_{Co}/X_m es aproximadamente 30; y tiene magnitudes de voltaje menores para valores mayores de la relación X_{Co}/X_m .

De igual manera, de la Fig. N° III.14.b para conexiones en $\Delta-Y_{\frac{1}{2}}$, éste valor alcanzado es de aproximadamente 40 ($X_{Co}/X_m \simeq 40$). Esto es el resultado para cuando se tiene una fase energizada. Datos similares para dos fases energizadas permiten tener valores menores de 1.25 veces el voltaje nominal para la relación X_{Co}/X_m ; pero son las relaciones anteriores las que presentan las peores condiciones y por lo tanto éstas son las consideradas para el propósito (Ref. 20,21).

Con éstos criterios y para voltajes de Distribución ubicados entre 6.3 KV y 34.5 KV (Ref. 26), se puede obtener A (ecuación IV.5) con resultados que se indican en el Cuadro N° IV.1.

		$X_{co}/X_m \approx 30$	$X_{co}/X_m \approx 40$
Conexión Tipo de ramal		$Y-\Delta$	$\Delta-Y_{\pi}$
A	Cable Protegido	4.065	3.049
	Aéreo	143	106.7

Cuadro Nº IV.1: Valor de la constante A

Con los valores de la constante A, la ecuación IV.4 queda definida y, conociendo las características de los transformadores puede determinarse la longitud apropiada del ramal.

Las tablas Nº IV.1 y IV.2 muestran longitudes adecuadas de ramal para algunos transformadores de diferente potencia y distintos niveles de voltaje del Alimentador Primario. La Tabla Nº IV.1 es para transformadores conectados en $\Delta-Y_{\pi}$ y, la Tabla Nº IV.2 para una conexión en $Y-\Delta$. (Ref. 20,21).

TABLA N° IV.1: LONGITUD PERMITIDA DE RAMAL PRIMARIO, SIN OTRO METODO DE CONTROL ADICIONAL, PARA TRANSFORMADORES $\Delta - \frac{Y}{\frac{1}{2}}$

DATOS DEL TRANSFORMADOR			LONGITUD DEL RAMAL PRIMARIO EN m.	
KV.	KVA	I _{exc} %	CABLE	AEREO
13.8	160	1.0	2.6	90
	200	1.0	3.2	112
	200	1.0	4.0	140
	300	1.0	4.8	168
	500	1.0	8.0	280
	750	1.0	12.0	420
	1.000	1.0	16.0	560
	1.500	1.0	24.0	840
	2.000	1.0	32.0	1.121
	5.000	1.0	88.1	2.800
22.8	160	1.0	0.9	33
	200	1.0	1.2	41
	250	1.0	1.5	51
	300	1.0	1.8	63
	500	1.0	2.9	102
	750	1.0	4.4	154
	1.000	1.0	5.9	205
	1.500	1.0	8.8	308
	2.000	1.0	11.7	4.011
	5.000	1.0	29.3	1.056
34.5	300	1.0	0.8	27
	500	1.0	1.3	45
	750	1.0	1.9	67
	1.000	1.0	2.6	90
	1.500	1.0	3.8	134
	2.000	1.0	5.1	179
	5.000	1.0	12.8	450
	10.000	1.0	25.6	895

TABLA N° IV.2: LONGITUD PERMITIDA DE RAMAL PRIMARIO, SIN OTRO METODO DE CONTROL ADICIONAL, PARA TRANSFORMADORES $Y-\Delta$

DATOS DEL TRANSFORMADOR			LONGITUD DEL RAMAL PRIMARIO EN m.	
KV.	KVA	I _{exc} %	CABLE PROTEGIDO.	LÍNEA AEREA
13.8	160	1.0	3.4	120
	200	1.0	4.3	150
	250	1.0	5.3	188
	300	1.0	6.4	225
	500	1.0	10.7	375
	750	1.0	16.0	563
	1,000	1.0	21.3	751
	1,500	1.0	32.0	1 126
	2,000	1.0	42.7	1 502
	5,000	1.0	106.7	3 750
22.8	160	1.0	1.3	44
	200	1.0	1.6	55
	250	1.0	2.0	69
	300	1.0	2.4	83
	500	1.0	3.9	138
	750	1.0	5.9	206
	1,000	1.0	7.8	275
	1,500	1.0	11.7	412
	2,000	1.0	15.6	550
	5,000	1.0	39.3	1 375
34.5	300	1.0	1.0	36
	500	1.0	1.7	60
	750	1.0	2.6	90
	1,000	1.0	3.4	120
	1,500	1.0	5.1	180
	2,000	1.0	6.8	240
	5,000	1.0	17.0	600
	10,000	1.0	34.2	1 200

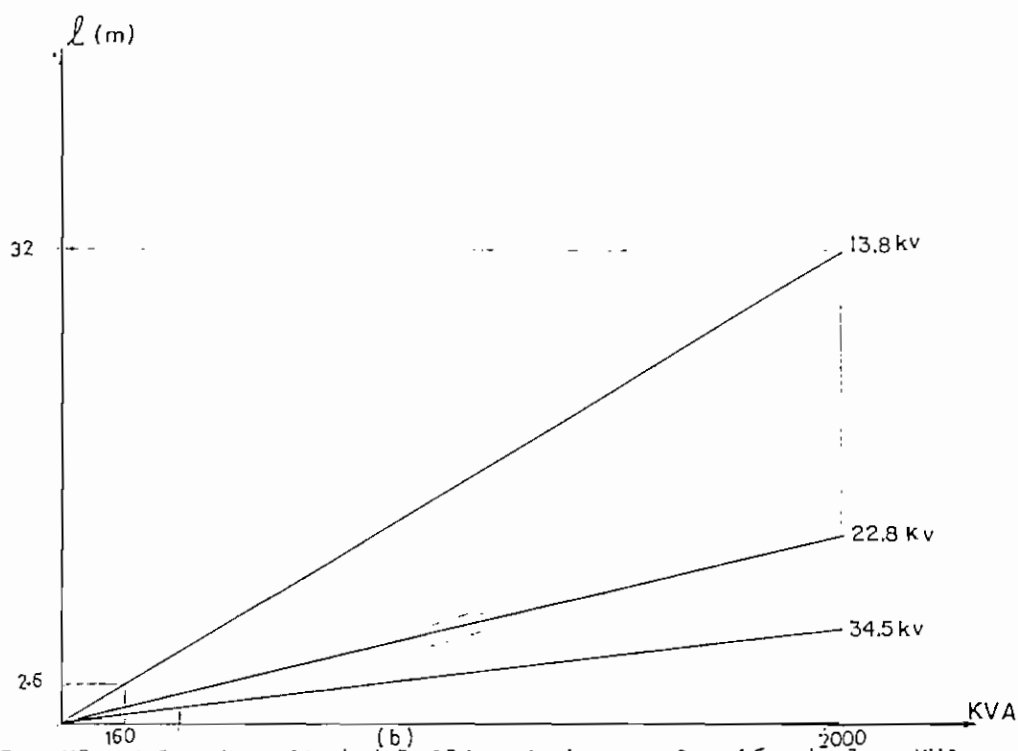
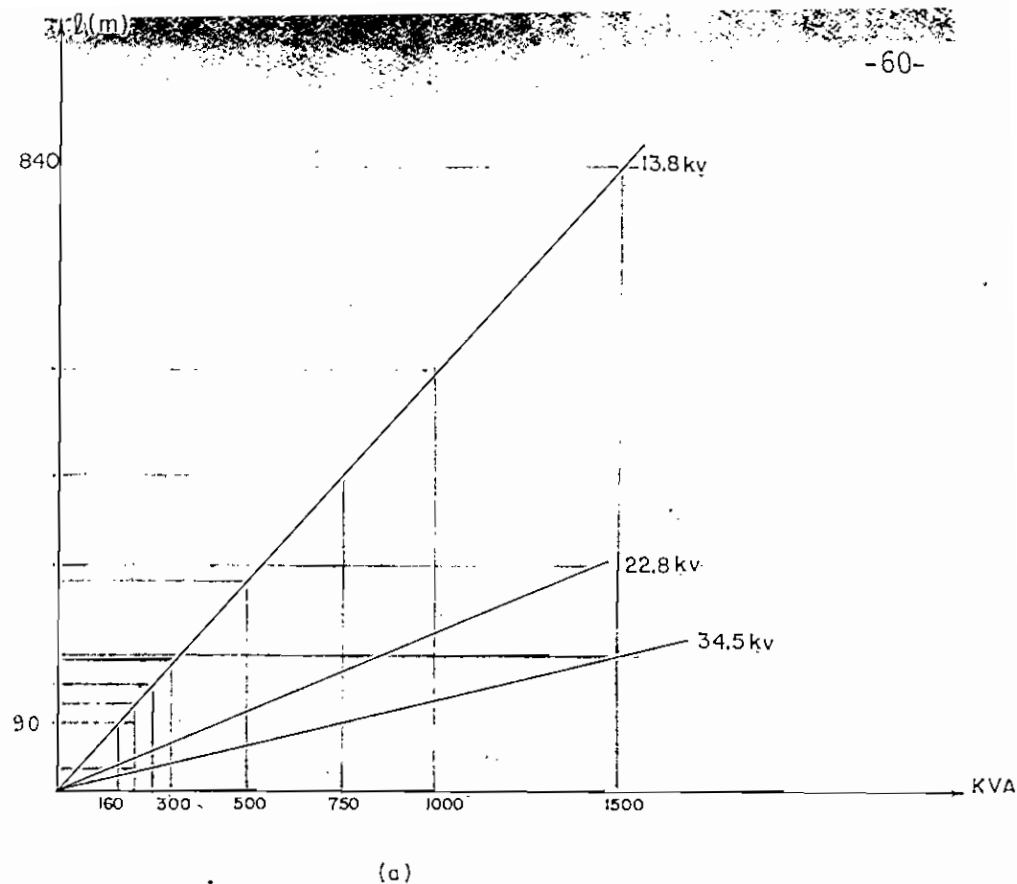


FIG. N° IV.1: Longitud del Alimentador en función de los KVA del transformador (Conexión $\Delta - Y_{\#}$)
a) Circuito aéreo
b) Cables.

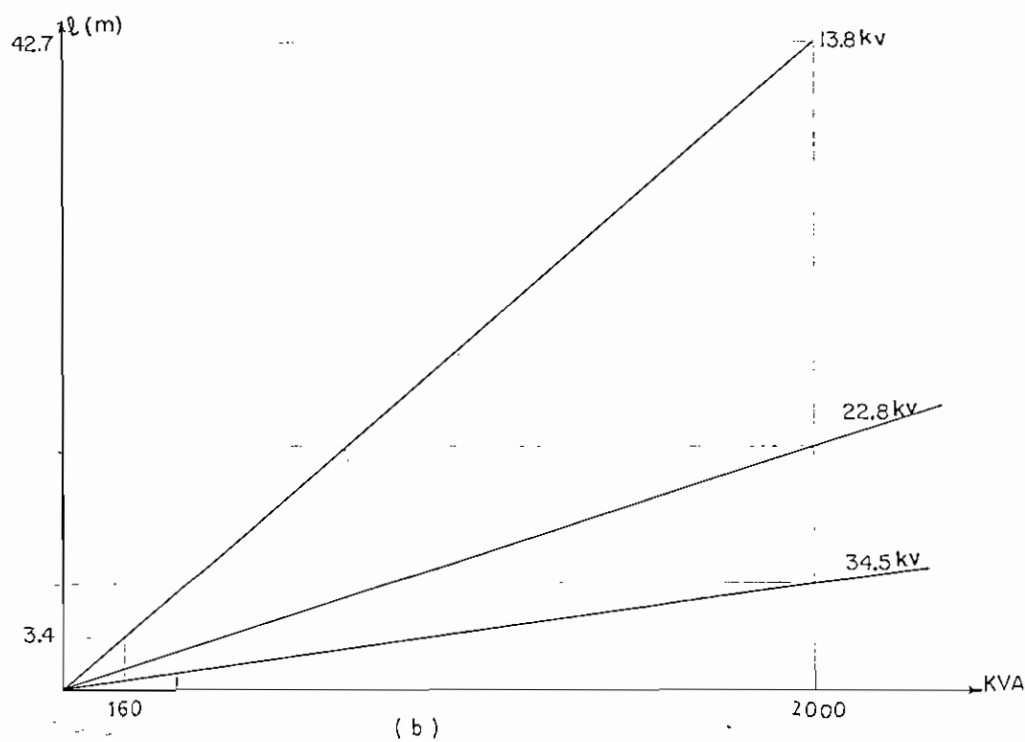
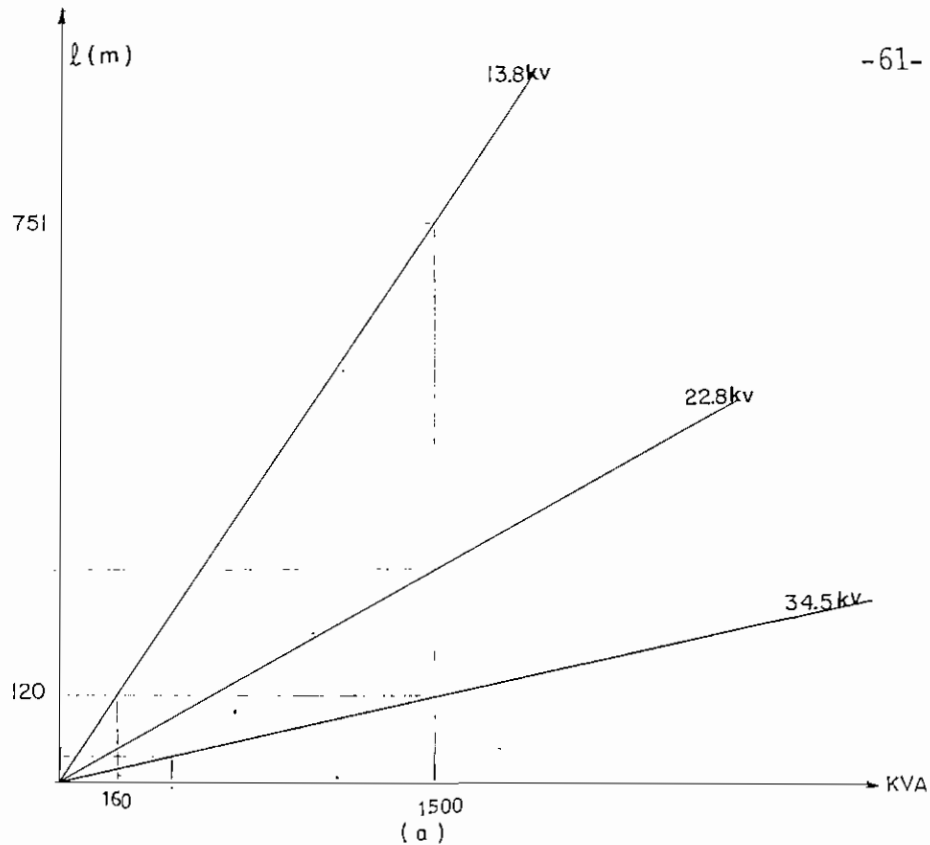


Fig. Nº IV.2: Longitud del Alimentador en función de los KVA del transformador (Conexión $\Upsilon-\Delta$).

- a) Circuito aéreo
- b) Cables

De las tablas Nº IV.1 y IV.2, se desprende que en algunos casos prácticos, la longitud apropiada de los cables conductores son cortas y que efectivamente los transformadores deben tener seccionamiento local.

En cambio, para líneas aéreas y para transformadores de relativamente mayor potencia hay una longitud considerable entre sus términales y los elementos de maniobra y seccionamiento.

Si los elementos de maniobra monopoles se ubican en la localidad del transformador, hay la posibilidad de que ellos fallen (falta de coordinación por ejemplo). Bajo éstas condiciones los elementos de maniobra que actúen serán lo que están lejos del transformador, lo cual puede ser una condición para el aparecimiento del efecto Ferreresonante.

Los resultados de las Tablas Nº IV.1 y IV.2, permiten obtener los diagramas de las Figs. Nº IV.1 y IV.2; en donde se muestra la longitud del ramal como una función de la Potencia del transformador. Si la corriente de excitación y el nivel de voltaje del Alimentador Primario, se mantienen constantes, entonces ésta longitud dependerá directamente de la potencia del transformador.

De estos diagramas igualmente se concluye que, mientras mayor es la potencia del transformador, la longitud entre él y los elementos de maniobra es mayor.

Estos diagramas, muestran también que la longitud es dependiente del voltaje del Alimentador Primario; a mayor voltaje la longitud apropiada entre elementos de maniobra y transformador es pequeña y cáso contrario.

IV.2.1.2 Interruptores Tripolares.

Estas medidas de control involucran el uso de aparatos de maniobra tripolares (interruptores, reconectadores, etc.) en Alimentadores Primarios. Fusibles de corte monofásico son reemplazados por Reconectadores, ó interruptores de vacío tripolares (Ref. 10).

En una operación de apertura éstos elementos deben ser capaces de interrumpir la corriente, la cual puede ser de pocos amperios - hasta miles de amperios independientemente de las características del circuito, de ser puramente inductivos hasta totalmente capacitivos.

En una operación de cierre el interruptor debe cerrar segura y rápidamente.

Estas características de comportamiento deben ser efectivas cuando a éstos aparatos se los llama a realizar una operación de maniobra cerrando ó abriendo casi simultáneamente los tres polos -previniendo con ello la ocurrencia de sobrevoltajes que muchas veces siguen a la apertura no sincronizada de los polos.(elementos de maniobra monopolares) (Ref. 10,27).

Este método es efectivo en la reducción de la probabilidad de ocurrencia de sobrevoltajes Ferroresonantes, pero no elimina completamente ésta posibilidad, ya que siempre es probable una apertura accidental de los conductores de fase del Alimentador Primario. Esto es particularmente verdadero en Sistemas de Distribución Subterráneos, - los cuales pueden tener muchos puntos de empalme de cables monopolares. (Ref. 10)

IV.2.1.3 Resistencias en el secundario.

Para el caso donde las longitudes de ramales mostrados en las Tablas N° IV.1 y IV.2 sean insuficientes y, si se asume que la maniobra tripolar en ocasiones no es económicamente atractiva; es deseable disponer de otros medios de control y prevención de sobrevoltajes ferresonantes.

Mediante estudios realizados en el Analizador Transitorio de Redes (TNA) se ha demostrado que la ubicación de resistencias/fase, en el secundario de un Banco de transformadores 1 Ø o transformador 3 Ø reduce la probabilidad de ocurrencia de Ferresonancia. De ésta manera el uso de resistencias de valores pequeños en el secundario del transformador se ha sugerido como una medida de control (Ref. 26).

El diagrama unifilar de la Fig. N° IV.3; ilustra a un Sistema de Distribución típico con ésta alternativa de control.

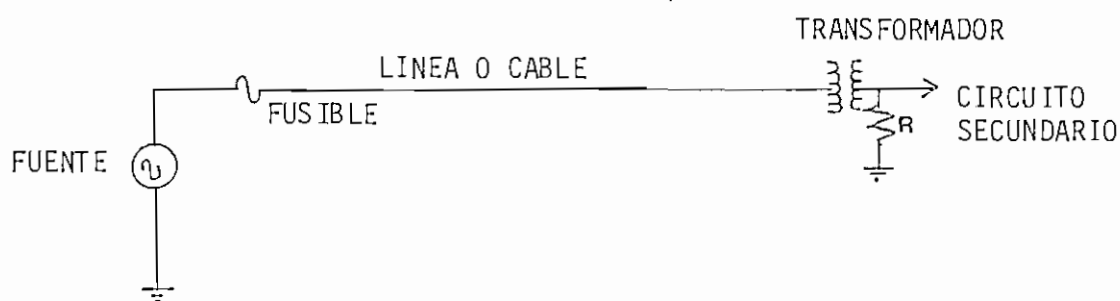


Fig. N° IV.3: Diagrama unifilar de un sistema de distribución típico con Resistencia/fase en el secundario del transformador.

La mayoría de estudios han sido realizados en el Analizador Transitorio de Redes y, para los rangos de X_{CO}/X_m mostrados en las Figs. N° III.14 y III.15 en base a los cuales se ha determinado la resistencia requerida para prevenir sobrevoltajes Ferresonantes (Ref.20,21).

Los resultados a los que se ha llegado se ilustran en las Figs. Nº IV.4 y IV.5 en términos de R/X_m , para transformadores con conexión en $Y-\Delta$ y $\Delta-Y$ respectivamente (Ref. 20,21).

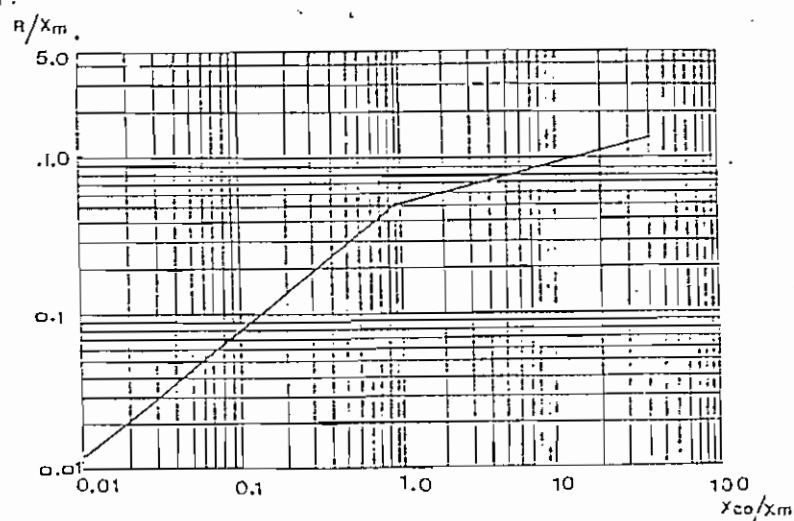


Fig. Nº IV.4: Requerimientos de R/X_m , para control de Ferroresonancia (Transformadores $Y-\Delta$)

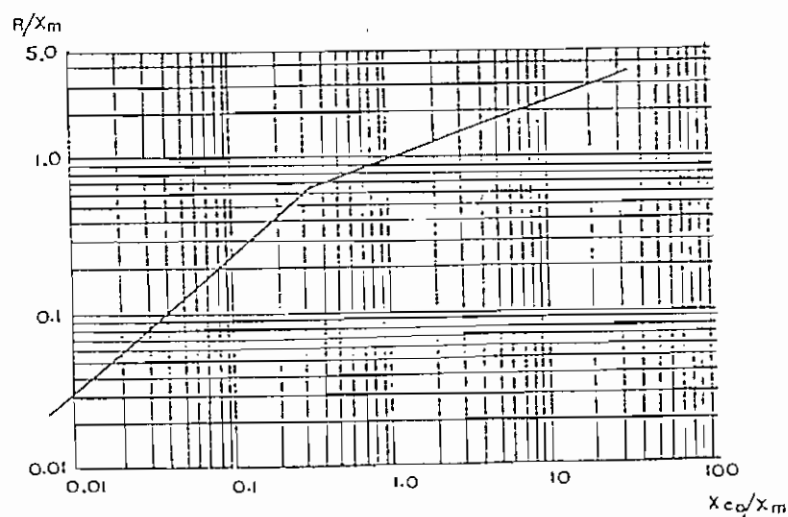


Fig. Nº IV.5: Requerimiento de R/X_m , para control de Ferroresonancia (Transformadores $\Delta-Y$)

Los diagramas de las Figs. Nº IV.4 y IV.5 han sido determinados en base a estudios en el TNA, en ellos se obtiene el valor de la relación R/X_m como una función de X_{Co}/X_m ; luego para un valor particular de X_{Co}/X_m inmediatamente queda determinado R/X_m .

En los diagramas descritos:

R , resistencia/fase a ubicarse en el secundario del Transformador.

X_m , reactancia de magnetización.

X_{Co} , reactancia capacitiva de secuencia cero.

- Determinación del porcentaje de carga Resistiva (I_R)

(Tomado de las Ref. 20,21)

$$I \text{ (carga total)} = \frac{KVA}{\sqrt{3} \text{ KV}} = \frac{1000 \text{ KV}}{\sqrt{3} \text{ ohmios (carga total)}} \quad (IV.6)$$

$$\text{Ohmios (carga total)} = \frac{1000 \times KV^2}{KVA} \quad (IV.7)$$

$$I_R = \frac{1000 \times KV}{\sqrt{3} R} \quad (IV.8)$$

$$R = \frac{R}{X_m} X_m \quad (IV.9)$$

Además:

Repitiendo la ecuación IV.1:

$$X_m = \frac{10^5 \times KV^2}{I_{exc\%} \cdot KVA}$$

$$\text{Resultando: } R = \frac{R}{X_m} \times \frac{10^5 \times KV^2}{I_{exc\%} \cdot KVA} \quad (IV.10)$$

Reemplazando la ecuación IV.10 en la IV.8:

$$I_R = \frac{I_{exc\%} \cdot KVA}{\sqrt{3} \cdot 10^2 \cdot KV \cdot (R/X_m)} \quad (IV.11)$$

Dividiendo la ecuación IV.11 para I (carga total):

$$\frac{I_R}{I \text{ (carga total)}} = \frac{\frac{I_{exc\%} \cdot KVA}{\sqrt{3} \cdot 10^2 \cdot KV \cdot (R/X_m)} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot KV}{KVA}}{\frac{I_{exc\%}}{100(R/X_m)}} \quad (IV.12)$$

I_R en función del % de la corriente de carga total:

$$\% I_R = \frac{I_{exc\%}}{(R/X_m)} \quad (IV.13)$$

De las relaciones anteriores:

R , resistencia/fase a ubicarse en el secundario del transformador.

$\%I_R$, corriente por la resistencia, en % de la corriente de carga total.

$I_{exc\%}$, corriente de excitación en %

KV , voltaje nominal entre fases.

Adicionalmente:

$$\frac{X_{Co}}{X_m} = \frac{10}{377} \times \frac{1}{Co\ell} \times \frac{I_{exc\%} \cdot KVA}{KV^2}$$

Donde:

Co , es la capacitancia a tierra de secuencia cero en (uf/m)

ℓ , longitud del ramal en m.

$I_{exc\%}$, corriente de excitación en %

KV , voltaje nominal entre fases

KVA , potencia nominal del transformador.

Las Tablas IV.3 y IV.4, muestran resultados obtenidos para transformadores de diferentes KVA, para ramales de 1.5 y 3.0 Km. de cable protegido. Las asumpciones que se han hecho para la obtención de las Tablas Nº IV.1 y IV.2, también se hacen aquí. Debido a ésta situación, los valores determinados son justificados para obtener un orden de magnitud de la resistencia involucrada. (Ref. 20,21).

TABLA Nº IV.3: PORCENTAJE DE CARGA RESISTIVA SECUNDARIA REQUERIDA PARA PREVENIR SOBREVOLTAJES FERRORESONANTES. TRANSFORMADORES Y-△

DATOS DEL TRANSFORMADOR			PARA RAMAL DE 1.5 Km.*		
KV.	KVA.	Iexc%	X_{co}/X_m	R/X_m	% I (R)
13.8	160	1.0	0.068	0.035	18.80
	200	1.0	0.085	0.070	14.29
	250	1.0	0.107	0.085	11.76
	300	1.0	0.128	0.090	11.11
	500	1.0	0.213	0.150	6.60
	750	1.0	0.32	0.195	5.13
	1,000	1.0	0.427	0.240	4.17
	1,500	1.0	0.640	0.350	2.86
	2,000	1.0	0.854	0.500	2.00
	5,000	1.0	2.134	0.580	0.58
22.8	150	1.0	0.025	0.025	40.00
	200	1.0	0.31	0.030	33.30
	250	1.0	0.039	0.036	27.80
	300	1.0	0.047	0.042	23.80
	500	1.0	0.078	0.062	16.10
	750	1.0	0.117	0.080	12.50
	1,000	1.0	0.156	8.550	9.30
	1,500	1.0	0.235	4.290	6.30
	2,000	1.0	0.313	3.195	5.20
	5,000	1.0	0.782	0.450	2.20
34.5	500	1.0	0.034	0.033	30.30
	750	1.0	0.051	0.045	22.22
	1,000	1.0	0.068	0.052	19.23
	1,500	1.0	0.102	0.077	12.99
	2,000	1.0	0.137	0.110	9.09
	5,000	1.0	0.342	0.220	4.50

* Asume $C_o = 0.35 \frac{\mu F}{\text{milla}}$ (Ref. 26)

TABLA Nº IV.4: PORCENTAJE DE CARGA RESISTIVA SECUNDARIA REQUERIDA PARA PREVENIR SOBREVOLTAJES FERRORESONANTES. TRANSFORMADORES Δ - Y_n

DATOS DEL TRANSFORMADOR			PARA RAMAL DE 1.5 Km.*		
KV.	KVA.	Iexc%	X_{Co}/X_m	R/X_m	I(R)
13.8	160	1.0	0.068	0.16	6.25
	200	1.0	0.085	0.19	5.26
	250	1.0	0.107	0.23	4.35
	300	1.0	0.128	0.24	4.16
	500	1.0	0.213	0.42	2.39
	750	1.0	0.320	0.62	1.61
	1,000	1.0	0.427	0.70	1.43
	1,500	1.0	0.640	0.82	1.22
	2,000	1.0	0.854	0.90	1.11
	5,000	1.0	2.134	1.30	0.80
22.8	160	1.0	0.025	0.06	18.2
	200	1.0	0.031	0.08	12.5
	250	1.0	0.039	0.09	11.11
	300	1.0	0.047	0.12	8.33
	500	1.0	0.078	0.18	5.56
	750	1.0	0.117	0.26	3.85
	1,000	1.0	0.156	0.31	3.23
	1,500	1.0	0.235	0.48	2.08
	2,500	1.0	0.313	0.62	1.61
	5,000	1.0	0.782	0.85	1.18
34.5	500	1.0	0.034	0.09	11.76
	750	1.0	0.051	0.15	6.9
	1,000	1.0	0.068	0.16	6.25
	1,500	1.0	0.102	0.23	4.35
	2,000	1.0	0.137	0.32	3.13
	5,000	1.0	0.342	0.65	1.54

* Se asume $C_o = 0.35 \frac{\mu F}{\text{milla}}$ (Ref. 26)

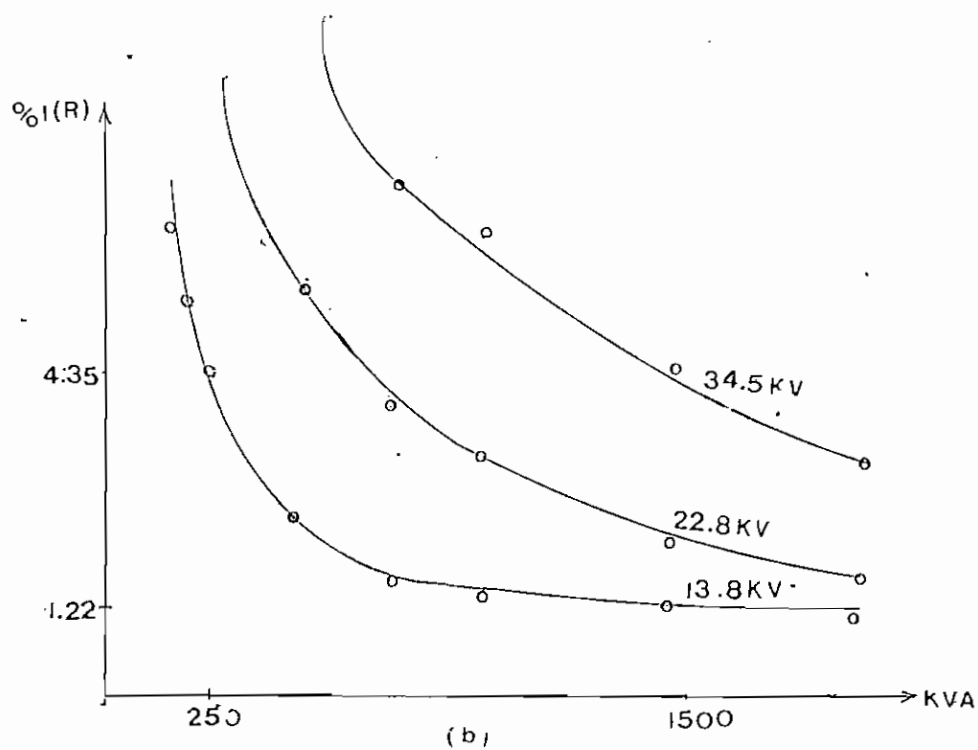
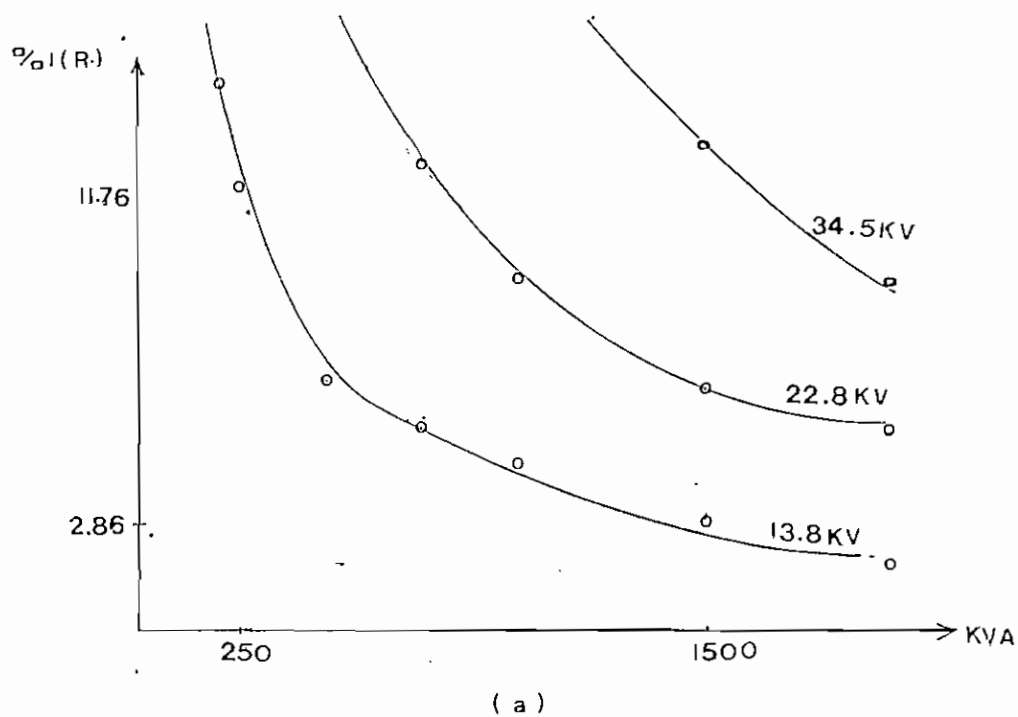


Fig. Nº IV.6: Porcentaje de carga resistiva como una función de la potencia del transformador, para 1.5 Km. de ramal.

- a) Conexión $Y-\Delta$
- b) Conexión $\Delta-Y$

De las Tablas Nº IV.3 y IV.4 se desprende que el porcentaje de carga resistiva (corriente que circula por la resistencia) depende de las características del transformador; siendo una función inversa de la potencia del transformador, es decir, el porcentaje de carga resistiva requerida es mayor para transformadores de menor potencia y va disminuyendo a medida que la potencia del transformador aumenta.

Así mismo, depende del nivel de voltaje del Alimentador primario, ya que, conforme aumenta el nivel de voltaje del Alimentador, el porcentaje de carga resistiva es mayor.

Para una mejor ilustración, los resultados de las Tablas Nº IV.3 y IV.4, se han reproducido en los diagramas de la Fig. Nº IV.6.- En éstos gráficos se ve claramente que a mayor potencia del transformador se requiere de menor porcentaje de carga resistiva y, caso contrario, de igual manera a mayor nivel de voltaje se requiere una carga resistiva mayor.

IV.2.2 MANIOBRA DE TRANSFORMADORES Y ALIMENTADORES PRIMARIOS.

IV.2.2.1 Secuencia de Maniobra.

Se puede evitar el apareamiento de condiciones ferroresonantes si el transformador de Distribución utiliza en sus terminales de alta tensión aparatos de maniobra monopolares (Seccionador-fusible), es decir, si están protegidos localmente y no a distancia como es la característica de los casos anteriores.

La posibilidad de sobrevoltajes Ferroresonantes se evita si los devanados del transformador y la capacitancia del Alimentador -

Primario no se energizan en serie. Un arreglo circuital para evitar la maniobra del transformador y la capacitancia a tierra de la línea en serie, se ilustra en la Fig. N° IV.7 (Ref. 11,19).

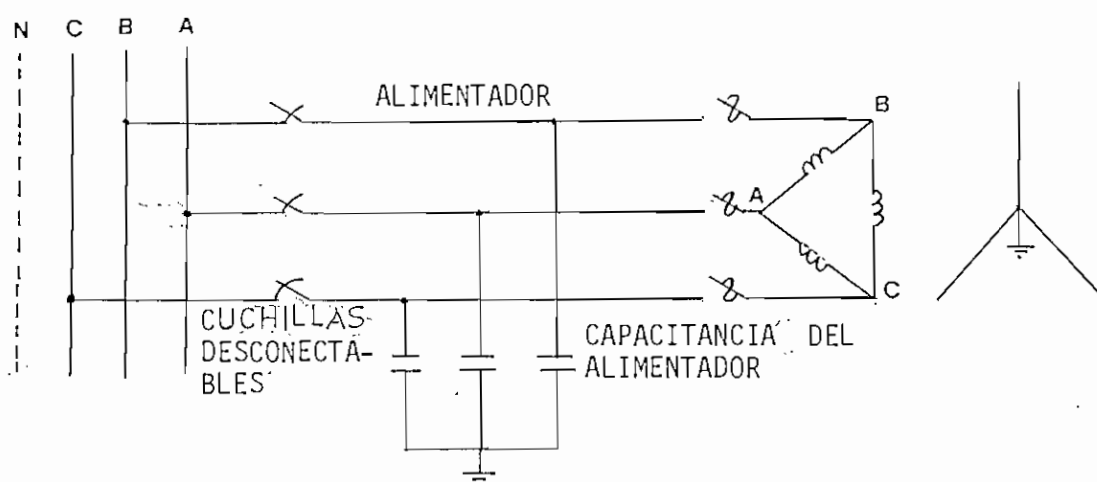


Fig. N° IV.7: Transformador 3Ø , con fusibles locales como elementos de maniobra monopolares.

Se debe tratar de utilizar una secuencia adecuada para evitar la maniobra de bancos de transformadores ó transformadores 3Ø descargados desde puntos remotos del transformador. La secuencia de maniobra luego involucra la energización primero del circuito primario y después el transformador con aparatos de maniobra locales, la secuencia inversa es apropiada en la desenergización del circuito primario y transformadores. Siguiendo esta secuencia se evita la maniobra del alimentador y transformador juntos. (Ref.10).

En este procedimiento de maniobra la capacitancia energizada en serie con los devanados del transformador, es solamente la debida a la que está presente entre devanados y de los devanados a tierra del transformador, la cual usualmente es baja para causar una condición de sobrevoltaje ferroresonante.

Si los elementos de seccionamiento ubicados en la localidad del transformador no operan; ésta situación puede ser causa para el apareamiento del efecto ferroresonante- si las condiciones de la red son críticas; y adicionalmente con niveles de voltaje altos en Sistemas de Distribución (34.5/19.9 KV) puede ocurrir ferroresonancia aún cuando se realice una operación de maniobra local en el transformador; la causa para que aquello ocurra es la capacitancia de los devanados del transformador, la cual en éstos casos es apreciable para una condición de ésta naturaleza. (Ref. 10,16).

IV.2.2.2. Coordinación de los elementos de maniobra del transformador y la línea.

Se debe coordinar adecuadamente los aparatos de maniobra del transformador y la línea de suministro, tal que los elementos de maniobra del transformador operen con fallas del mismo y con fallas del circuito secundario, sin crear una situación susceptible a ferroresonancia.

Esto significa que la selección de los aparatos de maniobra en cuanto a sus características, debe dimensionarse de tal manera que sean lo suficiente como para que exista coordinación con fusibles, reconectadores o interruptores hacia el lado de la fuente (Ref.19).

La fusión de los fusibles (elementos de protección local) de un transformador normalmente no iniciará ferroresonancia en Sistemas de Distribución. Mientras la operación de uno ó dos elementos de maniobra monopares ubicados a cierta distancia del transformador con los elementos de seccionamiento local; manteniéndose inactivos posiblemente cause una situación de esa naturaleza (ferroresonancia). (Ref.19)

IV.3 OTRAS ALTERNATIVAS.

Como se ha indicado, diferentes medidas de control se han propuesto para la condición Ferroresonante; pero existen otros procedimientos que tienen su base en: la conexión a tierra del neutro del primario del transformador; ó el uso de resistencias desde el neutro de la conexión Y a tierra en transformadores conectados $Y-\Delta$, ó el uso de una resistencia a través de un transformador conectado del neutro a tierra en conexiones $Y-\Delta$.

IV.3.1. Efecto de las conexiones de transformadores.

La conexión a tierra del neutro del Primario del banco de transformadores 1 $\emptyset$ o transformador 3 $\emptyset$ con conexión en Y ha sido encontrado como efectivo para el control de Ferroresonancia (Ref.10).

Sí se refiere a las Figs. N°-III.8.a y III.9.a, al conectar el neutro del primario del transformador a tierra, la capacitancia a tierra de la línea es cortocircuitada y el circuito ferroresonante desaparece, es decir, no se presenta.

IV.3.1.1. Transformadores conectados $Y_1 - Y_2$

Cuando el circuito consiste de cables conductores monopolares ó línea aérea y, el transformador conectado $Y_1 - Y_2$ está constituido por tres unidades 1 $\emptyset$, no aparecen sobrevoltajes durante una operación de maniobra monopolar remota; ya que no existe acoplamiento capacitivo ó inductivo entre los devanados del primario del banco; de ésta manera la maniobra monopolar no causa sobrevoltajes en las fases abiertas puesto que el acoplamiento entre fases no está presente. (Ref. 22).

Algunas unidades trifásicas que consisten de un ensamblaje de tres núcleos magnéticos $1\emptyset$ en un tanque común tendrán un acoplamiento capacitivo e inductivo que es despreciable entre devanados del transformador, por ello es razonable pensar que no ocurren sobrevoltajes Ferroresonantes en una fase abierta cuando existe una operación de maniobra $1\emptyset$ remota (Ref. 23)

IV.3.1.2 Transformadores conectados ∇ (abierto)- Δ (abierto)

Dos transformadores $1\emptyset$ pueden estar conectados a dos conductores de fase y al neutro del Alimentador Primario $3\emptyset$ y, como en el caso anterior, la conexión a tierra del neutro elimina la posibilidad de sobrevoltajes ferroresonantes, siendo por lo tanto, una buena respuesta para enfrentar éstos problemas en Sistemas de Distribución; puesto que no solamente disminuye la probabilidad de encontrar una condición ferroresonante, sino que también provee voltajes a nivel del circuito secundario a 240/120 V. que se desean en algunos sistemas (Ref. 10).

Esta conexión del banco no conviene para cargas grandes (motores de gran potencia por ejemplo); debido que aquella es una conexión desbalanceada y la aplicación de voltajes débilmente desbalanceados a motores $3\emptyset$ puede resultar en una corriente grande desbalanceada, la que a su vez puede causar sobrecalentamiento del motor o fallas dependiendo de la magnitud de la misma.

De tal manera que, éste tipo de conexión se ve limitado al servicio de cargas $1\emptyset$ relativamente no muy grandes, que pueden estar acompañados de una pequeña cantidad de carga $3\emptyset$ que no sobrepase

los 25 KV y, bajo estas condiciones la probabilidad de ocurrencia de ferroresonancia disminuye para este tipo de aplicaciones (Ref.10,28).

IV.3.2 Uso de resistencias desde el neutro a tierra en transformadores conectados en $Y-\Delta$

Una alternativa al método que involucra el uso de resistencias/fase en el secundario para prevenir ferroresonancia es el uso de resistencias de valores apropiados, conectados desde el neutro a tierra.

Estudios han sido realizados en el Analizador Transitorio de Redes (TNA) para determinar los requerimientos de Resistencia; sin carga conectada en el secundario.

Se ha llegado a la conclusión (Estudios en el TNA) que el valor adecuado de ésta resistencia es aproximadamente $0.005 X_m$; donde X_m , es la reactancia de magnetización del transformador (Ref.10,20).

En términos de la potencia del transformador y su corriente de excitación es:

$$R_N = \frac{5000}{I_{exc} \%} \times \frac{KV^2}{KVA} \quad (IV.13)$$

Donde:

R_N , es la resistencia entre el punto neutro de la conexión Y y tierra en ohmios.

La Tabla N° IV.5 ilustra a valores de R_N para transformadores de diferente potencia y diferente nivel de voltaje del alimentador primario. En el cuadro también se ilustra las pérdidas de potencia y el voltaje en la resistencia bajo las condiciones enunciadas; utilizando las siguientes relaciones: (Ref.20).

TABLA Nº IV.5: REQUERIMIENTOS DE RESISTENCIA EN TRANSFORMADORES $Y-\Delta$ A TRAVES DEL NEUTRO, PARA PREVENIR SOBREVOLTAJES FERRORES NANTES.

DATOS DEL TRANSFORMADOR			REQUERIMIENTOS DE RESISTENCIA				
KV	KVA	Iexc%	$R_N(\Omega)$	$R_N(p.u)$	Vn (V)	In (A)	$P_{R_N}(Kw)$
13.8	160	1.0	5.950	5.0	2.650	0.45	1.19
	200	1.0	4.760	5.0		0.56	1.48
	250	1.0	3.810	5.0		0.70	1.85
	300	1.0	3.175	5.0		0.84	2.22
	500	1.0	1.905	5.0		1.39	3.70
	750	1.5	845	3.33		3.14	8.34
	1.000	1.3	733	3.85		3.62	9.62
	1.500	1.2	529	4.17		5.02	13.32
	2.000	1.2	336	4.17		6.70	17.76
5.000	1.0	190	5.0	13.9	37.0		
22.8	160	1.9	16.245	5.0	4.390	0.27	1.15
	200	1.0	12.300	5.0		0.34	1.48
	250	1.0	10.940	5.0		0.40	1.85
	300	1.0	8.665	5.0		0.50	2.22
	500	1.0	6.200	5.0		0.84	3.7
	750	1.5	2.310	3.33		2.53	8.34
	1.000	1.3	2.000	3.85		2.19	9.62
	1.500	1.2	1.445	4.17		3.04	13.32
	2.000	1.2	1.085	4.17		4.05	17.76
	5.000	1.0	520	5.0		8.44	37.0
34.5	300	1.0	19.840	5.0	6.640	0.34	2.22
	500	1.0	11.900	5.0		0.56	3.70
	750	1.5	5.290	3.33		1.26	8.34
	1.000	1.3	4.580	3.85		1.46	9.62
	1.500	1.2	3.305	4.17		2.02	13.32
	2.000	1.2	2.480	4.17		2.69	17.76
	5.000	1.0	1.190	5.0		5.58	37.0
	10.000	1.0	595	5.0		11.2	74.0

$$V_{R_N} = \frac{1}{3} V_{\text{fase-neutro (nominal)}} \quad (\text{IV.14})$$

$$I_{R_N} = \frac{V_{R_N}}{R_N} \quad (\text{IV.15})$$

$$P_{R_N} = (I_{R_N}^2) R_N \quad (\text{IV.16})$$

De la tabla N° IV.5, se aprecia que la resistencia requerida es una función directa del nivel de voltaje del sistema e inversa de la potencia del transformador, su valor es mayor cuando el nivel de voltaje es más grande y disminuye a medida que la potencia del transformador aumenta. Esto en cuanto a valores en ohmios. Traduciendo éstos a valores en por unidad, los requerimientos para transformadores de toda potencia se mantienen en aproximadamente 5.0 p.u.

IV.3.3 Resistencia a través de un transformador.

Puesto que, relativamente un alto voltaje puede presentarse en la resistencia conectada del neutro a tierra bajo condiciones de falla del sistema, es deseable aislar a la resistencia del circuito primario con el uso de un transformador reductor. Este transformador sirve como una impedancia multiplicadora, puesto que el valor de la resistencia ubicada en el secundario, cuando se refleja al primario de un transformador, es igual al valor del secundario multiplicado por el cuadrado de la relación de transformación. Una ventaja adicional de este procedimiento es que la resistencia secundaria tiene un comparativamente bajo valor ohmico y puede ser de una construcción no muy refinada como es necesario en el caso anterior. (Ref. 10,20).

El diagrama de conexiones de un transformador neutro y resistencia secundaria asociada, se ilustra en la Fig. N° IV.8

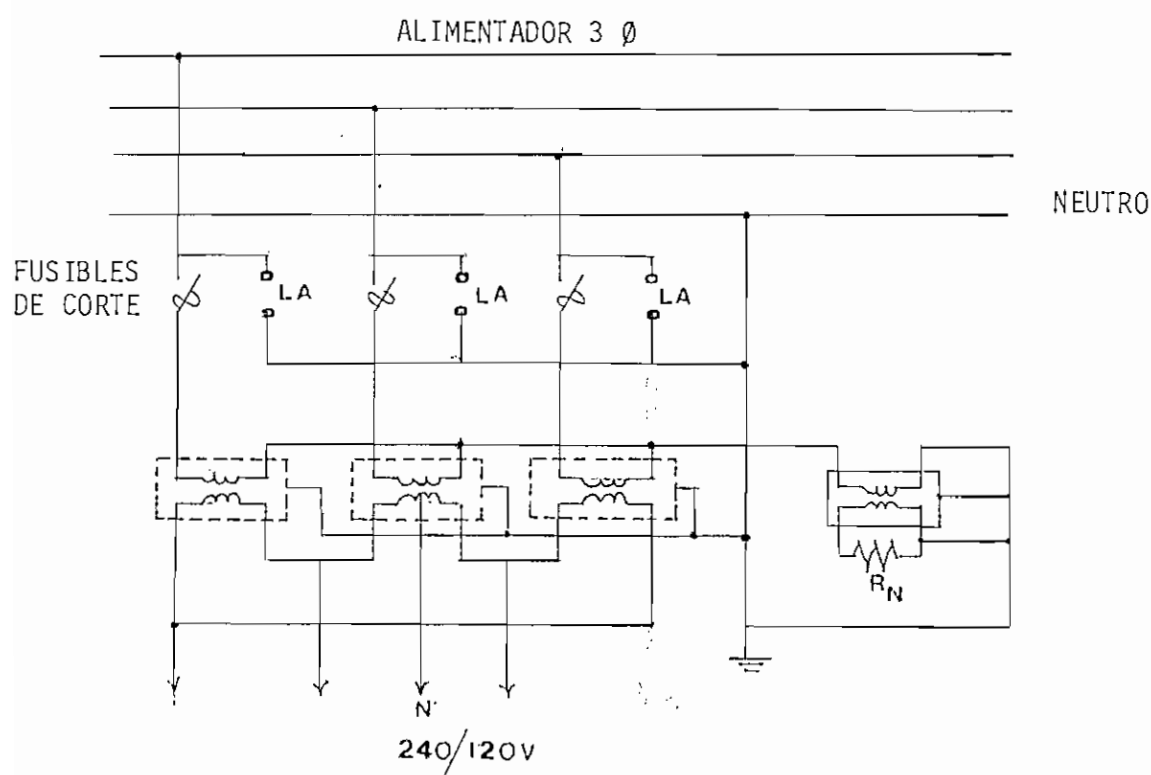


Fig. N° IV.8: Resistencia a través de un transformador en transformadores conectados en $Y-\Delta$

El transformador usualmente adecuado para la conexión a tierra desde el neutro de la conexión $Y-\Delta$ está en el orden de 3-5 KVA y la resistencia a ubicarse en su secundario está en el orden de 2-12 ohmios, dependiendo de las características del transformador (Ref.10).

CAPITULO V

EVALUACION ECONOMICA

V.1. GENERALIDADES

Al utilizar elementos y equipos para el control y/o reducción de sobrevoltajes Ferroresonantes, ó evitar su aparecimiento en la red (disminución de la probabilidad de ocurrencia), es necesario realizar una evaluación económica entre las alternativas técnicamente posibles y determinar cual de ellas es la más adecuada para el Sistema.

La evaluación económica considera los costos grabados a los equipos y elementos empleados para el control de Ferroresonancia y los costos de pérdidas asociados con éstos equipos; considerando a los mismos como una parte separada de la red.

La alternativa más económica deberá ser analizada a fin de establecer si es ó no una inversión adecuada desde el punto de vista de los requerimientos técnico-económico del sistema.

Las alternativas técnicamente factibles, han de seleccionarse en función de los criterios que se emiten al describir los Métodos de control y prevención de Ferroresonancia.

V.2 COSTOS DE MATERIALES Y EQUIPOS.

El objetivo fundamental es evaluar económicamente las alternativas, las cuales utilizan a elementos que resuelven en gran parte el problema de Ferroresonancia. Es de ésta manera importante tener un conocimiento adecuado de los costos inherentes a equipos y elemen-

tos que se utilizan para el propósito.

La evaluación económica de una alternativa técnicamente posible de control de Ferroresonancia, se lo puede hacer mediante la determinación de costos, como resultado de los siguientes:

V.2.1 Costos de Instalación.

Son rubros que representan al precio de compra de los elementos (condiciones comerciales), accesorios para el montaje y, además incluye el costo del trabajo empleado en la instalación (Ref.27).

V.2.2. Costos de operación y mantenimiento.

Los costos por operación y mantenimiento se los puede determinar con relativa exactitud en función de los siguientes factores. (Ref.27).

- Recomendaciones que dan los fabricantes para el mantenimiento
- Experiencia propia de las Empresas eléctricas.

Para efectos de evaluación, los valores de costo por operación y mantenimiento deben ser trasladados a valor presente, la misma que puede ser determinada con la siguiente relación: (Ref. 30)

$$C_n = \frac{C}{(1+i)^n} \quad (V.1)$$

Donde:

C_n , valor presente del costo para un cierto mantenimiento

C , costo del mantenimiento

i , es la tasa de interés

n , número de años.

V.2.3. COSTOS DE PERDIDAS.

Con la ayuda de la fórmula I^2R se puede calcular el costo de las pérdidas de energía en resistencias, cuando el control de Ferromagnetismo se realiza con éstos elementos.

Las pérdidas están dadas por:

$$PER = I^2R \quad (V.2)$$

Donde:

PER, pérdidas en la resistencia/fase en KW.

R, resistencia/fase en Ohmios

I, corriente que circula por la resistencia en amperios

Para el circuito 3Ø:

$$PER_T = 3I^2R \quad (V.3)$$

Donde:

PER_T , pérdidas totales en KW.

El costo de las pérdidas de energía viene dado por:

$$C_{PER_T} = PER_T \cdot t \cdot C \text{ (Kw-h)} \quad (V.4)$$

Donde:

C_{PER_T} , costo de las pérdidas de energía. (\$)

PER_T , pérdidas totales (KW)

t, tiempo durante el cual las resistencias están conectadas (h)

$C(Kw-h)$, costo del kilowatio-hora (\$)

El valor presente de las pérdidas de energía se determina por:

$$VPC_{PER_T} = \frac{C_{PER_T}}{(1 + i)^n} \quad (V.5)$$

Donde:

VPC_{PER_T} , valor presente del costo de las pérdidas de energía en (\$).

C_{PER_T} , costo de las pérdidas en energía en (\$).

n , número de años.

En análisis, para una evaluación económica adecuada se lo realiza tomando como referencia el período de vida útil de los elementos considerados. Para el efecto se asume un período de 20 años, con una tasa de interés del 12%.

V.3. OTROS COSTOS.

Adicionalmente a los costos enunciados, existen otros de muy difícil estimación; los cuales se basan mas bien en las estadísticas recopiladas a través de la experiencia de las Empresas Eléctricas, y principalmente son costos que se deben a:

- Costo en valor presente de un mantenimiento que no está programado.
- Costo adicional por funcionamiento del equipo en condiciones anormales de operación (fallas en el sistema).

Estos valores son de difícil evaluación, por lo tanto no se incluyen en el análisis (Réf. 27).

Con los criterios enunciados, el valor a compararse de entre las diferentes alternativas técnicamente factibles para control de Ferroresonancia queda definido como sigue:

$$VC = (CI + C_n + VPC_{PER_T}) \quad (V.6)$$

Donde: VC, valor a compararse en (\$).

CI, costo de la instalación en (\$)

C_n , valor presente del costo por operación y mantenimiento en (\$).

VPC_{PER_T} , valor presente de las pérdidas de energía en (\$)

CAPITULO VI

EJEMPLO DE APLICACION

VI.1 INTRODUCCION.

En el presente Capítulo se realiza un estudio de los sobrevoltajes que por Ferroresonancia pueden ocurrir en un Alimentador Primario escogido; así como se citan alternativas de control, las cuales disminuyen la posibilidad de su ocurrencia; y/o la magnitud de los mismos ubicándolos dentro de rangos tolerables. Además se realiza la evaluación económica de éstas alternativas que, permiten mostrar cual de ellas es más conveniente para el sistema.

Para el ejemplo de aplicación se ha tomado el Alimentador Primario "B" que parte de la Subestación de Distribución "Santa Rosa", ubicada al sur de la ciudad; el mismo que se analiza desde el punto de vista de ocurrencia de Ferroresonancia con alternativas que permiten controlar la presencia de éste efecto.

VI.2 DESCRIPCION DEL SISTEMA.

El Alimentador Primario, como se ha indicado, es el "B" que sale de la Subestación "Santa Rosa" ubicado al sur de la ciudad - (sector industrial), trifásico, aéreo, de sistema radial simple, a un voltaje nominal de 22.8 KV. entre fases, en un sistema estrella con el neutro puesto a tierra (Y_{tr}) en la Subestación de Distribución.

La Fig. Nº VI.1, muestra al diagrama unifilar del Alimentador Primario en estudio.

La capacidad del transformador de la Subestación "Santa Rosa" de Distribución es de 15/20 (OA/FA) MVA. La conexión del transformador es (Δ) en el lado de 46 KV. y, Υ efectivamente conectado a tierra (Υ_{g}) en el lado de 22.8 KV; con nivel de aislamiento en AT/BT, de 250 Kv - 150 KV.

La salida de éste alimentador está protegido con un Interruptor automático 3 $\emptyset$ para un voltaje nominal de 23 KV y una corriente nominal de 800 amperios (capacidad de interrupción de 500 MVA) y, además dispone de un seccionador de barra tripolar para voltaje nominal de 23 KV y una corriente nominal de 600 A.

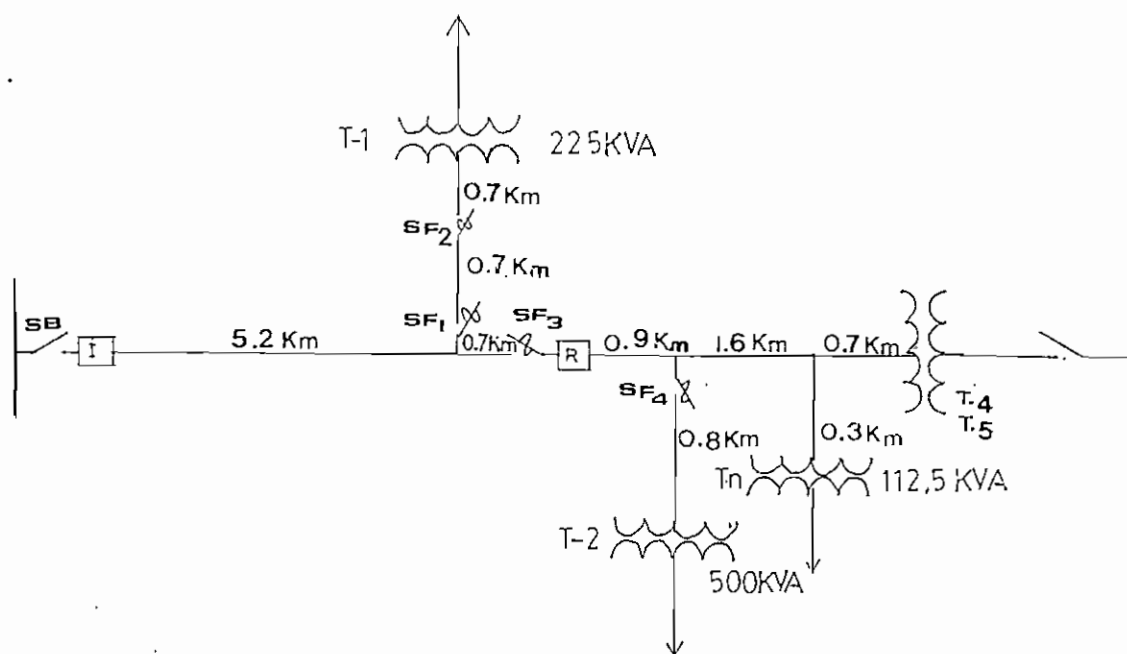


Fig. Nº VI.1: Diagrama unifilar del sistema en estudio.

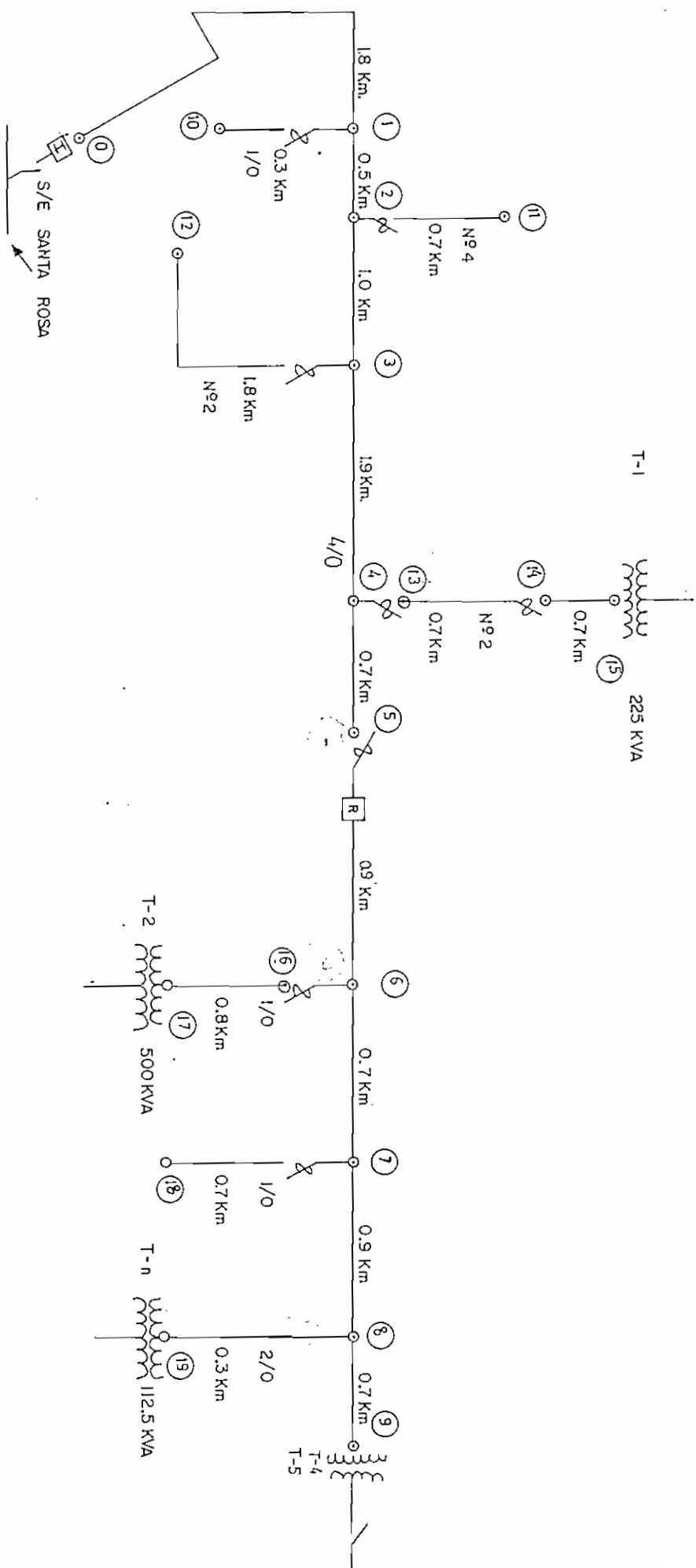
La Fig. Nº VI.2, muestra el diagrama esquemático del Sistema en estudio; en él se ha incluido los ramales que nacen en el troncal, lo cual permite realizar el análisis involucrado a la capacitancia de ellos en el cálculo de los sobrevoltajes Ferroresonantes.

El Alimentador está dividido en tramos y, las características de éstos se describen en la Tabla Nº VI.1.

TABLA Nº VI.1 CARACTERISTICAS DE LOS TRAMOS EN LOS QUE SE HA DIVIDIDO EL ALIMENTADOR PRIMARIO EN ESTUDIO.

TRAMO	DISTANCIA DEL TRAMO (Km.)	CALIBRE DEL CONDUCTOR	DIAMETRO DEL CONDUCTOR (cm.)
0-1	1.8	4/0	1.326
1-2	0.5	4/0	1.326
2-3	1.0	4/0	1.326
3-4	1.9	4/0	1.326
4-5	0.7	4/0	1.326
5-6	0.9	4/0	1.326
6-7	0.7	4/0	1.326
7-8	0.9	4/0	1.326
8-9	0.7	4/0	1.326
1-10	0.3	1/0	0.935
2-11	0.7	# 4	0.589
3-12	1.8	# 2	0.742
13-14	0.7	# 2	0.742
14-15	0.7	# 2	0.742
16-17	0.8	1/0	0.935
7-18	0.7	1/0	0.935
8-19	0.3	2/0	1.051

FIG. Nº VI.2 DIAGRAMA UNIFILAR ESQUEMATICO - SISTEMA EN ESTUDIO



VI.3 DATOS DEL SISTEMA

A continuación se describen los datos requeridos para el estudio.

- Alimentador Primario:

Nivel de voltaje: 22.8 KV (entre fases)

Longitud del troncal: 9.1 Km.

Tipo de conductor: Aleación de Aluminio (AAAC): 4/0, 2/0
1/0, # 2 y # 4.

- Altura promedio a tierra de los conductores de fase:

El Alimentador Primario utiliza postes de 11 m; con un empotramiento de 1.6 m (Ref. 31)

La altura promedio a tierra de los conductores de fase ($\bar{h}$) viene determinado por: (Ref.25)

$$\bar{h} = \frac{1}{3}(h_1+h_2+h_3) \quad (\text{VI.1})$$

Donde:

$\bar{h}$, altura promedio a tierra de los conductores de fase

h_1, h_2, h_3 , altura promedio a tierra de cada uno de los conductores de fase.

h_1, h_2 y h_3 , viene determinado por: (Ref.25)

$$h_i = h_{xi} - \frac{2}{3} f \quad (\text{VI.2})$$

Donde:

h_i , altura promedio a tierra de cada conductor de fase

h_{xi} , altura máxima a tierra de cada uno de los conductores de fase.

f , flecha.

Para el Alimentador Primario en estudio, la altura máxima a tierra de cada uno de los conductores de fase a tierra, se ilustra - en la Fig. N° VI.3 (Ref. 31)

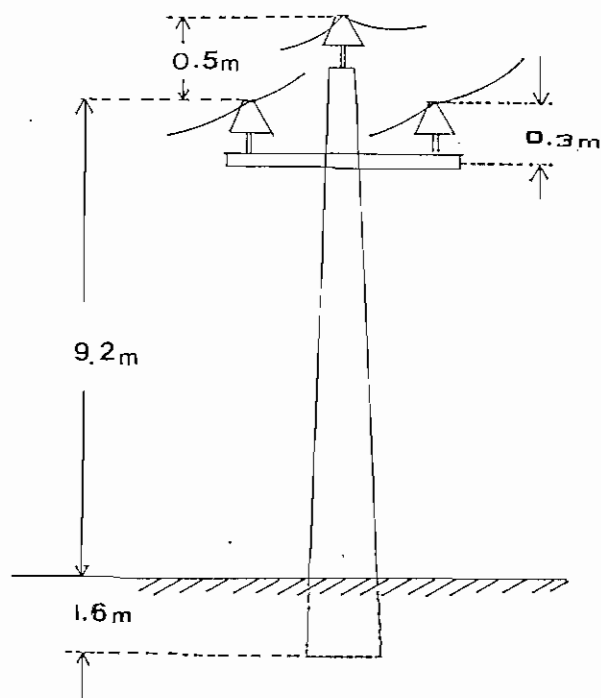


Fig. N° VI.3: Altura a tierra de los conductores de fase-Alimentador en estudio.

La flecha f es: (Ref. 32).

$$f = 0.8 \text{ m.}$$

Con los datos anteriores:

$$h_1 = 9.1667 \text{ m.}$$

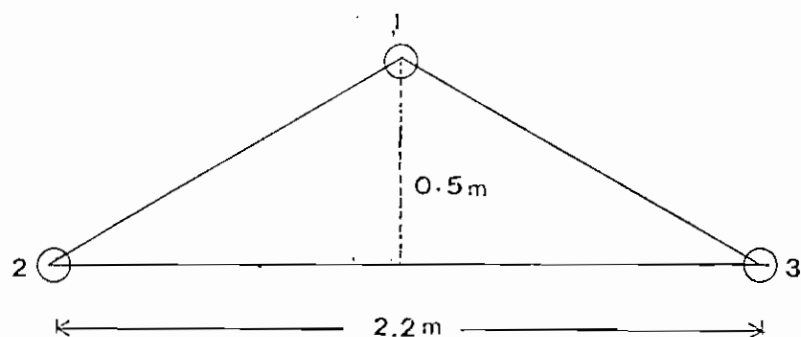
$$h_2 = h_3 = 8.6667 \text{ m.}$$

Consecuentemente:

$$\bar{h} = \frac{1}{3} (h_1 + h_2 + h_3).$$

$$\bar{h} = 8.83 \text{ m.}$$

- Distancia entre conductores de fase: Se describe en el siguiente diagrama: (Ref.31).



- Transformadores:

Los transformadores en estudio tienen las siguientes características: (Ref. 31)

DENOMINACION	Nº FASES	I _{exc} %	KVA _N	RELACION DE VOLTAJE	CONEXION
T ₁	3	2.0	225.0	22.8 KV-220/127V.	$\Delta-Y_{\frac{1}{2}}$
T ₂	3	2.0	500.0	22.8 KV-220/127V.	$\Delta-Y_{\frac{1}{2}}$
T _n	3	2.5	112.5	22.8 KV-220/127V.	$\Delta-Y_{\frac{1}{2}}$
T ₄	3	2.0	1000.0	22.8 KV-220/127V.	$\Delta-Y_{\frac{1}{2}}$
T ₅	3	1.2	1500.0	22.8 KV-220/127V.	$\Delta-Y_{\frac{1}{2}}$

- Elementos de seccionamiento instalados (Ver Fig. Nº VI.1)

EQUIPO	Nº FASES	I _{NOMINAL} (A.)	Nº UNIDADES	KV _N
SB	3	600	1 - trip	23
I	3	800	1 - trip	23
SF ₁	3	100	3	23
SF ₂	3	100	3	23
SF ₃	3	300	3	23
R	3	135	1 - trip	23
SF ₄	3	300	3	23

Donde: SB, Seccionador de Barra

I, Interruptor automático

SF₁, SF₂, SF₃, SF₄, seccionadores-fusibles

R, Reconectador.

VI.4 CALCULO DE SOBREVOLTAJES POR FERRORESONANCIA.

Para el análisis se asume que el Sistema está en vacío. El estudio se lo realiza por separado para cada uno de los transformadores escogidos y que están instalados en el Alimentador Primario (T_1, T_2 y T_n). Luego con la finalidad de sacar importantes conclusiones, se hará la suposición de que en el último punto del ramal principal del Alimentador escogido se tienen a transformadores de potencia considerable (T_4 y T_5) y bajo estas condiciones se discute el comportamiento ferresonante del Alimentador Primario.

Con los datos descritos en el numeral VI.3, se procede a realizar los cálculos de Sobrevoltajes por Ferroresonancia para el Alimentador Primario en estudio.

VI.4.1 Apertura de uno y dos conductores de fase.

En el Diagrama esquemático de la Fig.Nº VI.2 se aprecia los posibles puntos de apertura de conductores y son principalmente aquellos en donde se puede dar la apertura unipolar de los elementos de seccionamiento monoplares. Además para el estudio se ha escogido a puntos intermedios; donde se puede producir la apertura accidental de un con-

ductor y, principalmente con la finalidad de sacar conclusiones sobre el trabajo.

Se consideran los siguientes casos:

Caso 1:

Apertura de uno y dos conductores de fase, sin inclusión de la capacitancia de los ramales y transformador.

Caso 2:

Apertura de uno y dos conductores de fase; sin inclusión de la capacitancia de los ramales, pero involucrando a la de los transformadores.

Caso 3:

Apertura de uno y dos conductores de fase, incluyendo la capacitancia de los ramales, pero no la del transformador.

Caso 4:

Apertura de uno y dos conductores de fase, incluyendo la capacitancia de los ramales y el transformador.

Cálculos:

Para el cálculo de sobrevoltajes por Ferioresonancia, es necesario determinar la reactancia capacitiva de secuencia del Alimentador Primario desde el punto de apertura hasta el transformador involucrado. También se requiere conocer la reactancia de magnetización de los transformadores escogidos para el análisis.

El procedimiento de cálculo para la reactancia capacitiva se ilustra en el Apéndice B y, los resultados para el Alimentador escogido se indican en el Anexo B. De igual manera los pasos a seguirse para la determinación de la impedancia de magnetización se ilustra en el

Apéndice C y, los resultados para los transformadores involucrados se indican en el Anexo C.

Los valores a los que se ha llegado, se los describe a continuación:

- Reactancia capacitiva de secuencia.		Calibre del conductor.
Ceo (X_{Co}) (ohmios.Km)	Positiva (X_C) (ohmios.Km)	
614 032	257 956	4/0
625 125	269 049	2/0
630 706	274 630	1/0
641 741	285 665	# 2
652 762	296 686	# 4
- Impedancia de magnetización (X_m)		
Transformador	KVA _N	X_m (ohmios)
T ₁	225.0	117 639
T ₂	500.0	52 501
T _n	112.5	189 340
T ₄	1 000.0	26 258
T ₅	1 500.0	29 290

Con estas condiciones, se procede al cálculo de sobrevoltajes por Ferromagnetismo.

- Procedimiento de cálculo de los sobrevoltajes por apertura de conductores.

Es válido para los casos, del 1 al 4.

El cálculo de sobrevoltajes por apertura de uno y dos conductores de fase, utilizan las relaciones III.19 y III.20 respectivamente (Ver Capítulo III, numerales III.3.1 y III.3.2), las cuales se describen a continuación:

$$E_{ay} = \frac{X_C X_m - X_{Co} (X_m - X_C)}{X_C X_m + 2X_{Co} (X_m - X_C)} E_1 \quad (\text{III.19})$$

$$E_{by} = E_{cy} = \frac{X_{Co} (X_C - X_m) + X_C X_m}{X_{Co} (X_C - X_m) - 2X_C X_m} E_1 \quad (\text{III.21})$$

Donde:

X_C , reactancia capacitiva de secuencia positiva.

X_{Co} , reactancia capacitiva de secuencia cero.

X_m , impedancia de magnetización (igual para todas las secuencias)

E_1 , voltaje generado de secuencia positiva (se asume 1.0 p.u.)

E_{ay} , magnitud del sobrevoltaje en la fase abierta con respecto a tierra (apertura de un conductor de fase).

E_{by}, E_{cy} , magnitud del sobrevoltaje en la(s) fase(s) abierta(s) con respecto a tierra (apertura de dos conductores de fase).

Para ilustrar el procedimiento de cálculo, en el diagrama de secuencias interconectado de la Fig. N° VI.4 (apertura de un conductor) y, Fig. N° VI.5 (apertura de dos conductores), se indican los datos de X_{Co} , X_C , y X_m que se tienen en el punto 13 (transformador involucrado T_1); con éstos valores y aplicando las relaciones III.19 y III.20 se determinan los sobrevoltajes respectivos.

Siguiendo éste procedimiento se determinan los sobrevoltajes en el resto de puntos.

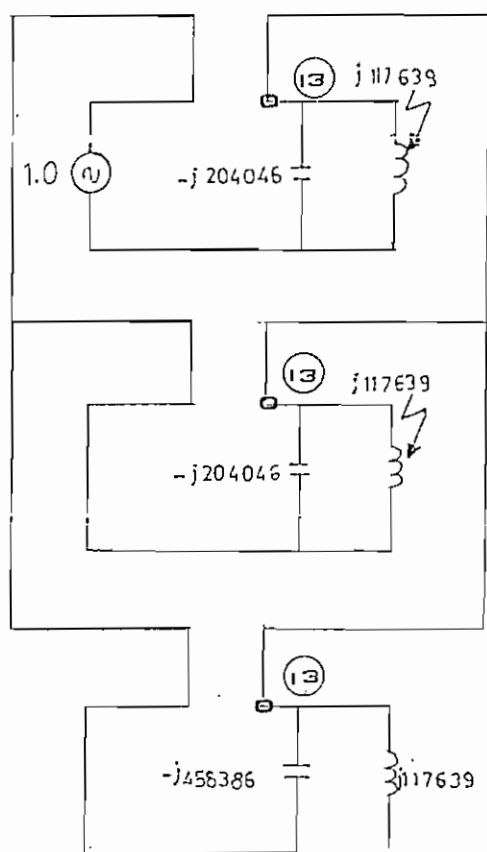


Fig. Nº VI.4: Diagrama de secuencias interconectado con valores de X_{Co} , X_C y X_m

(Apertura de un conductor, éste se abre en el punto 13)

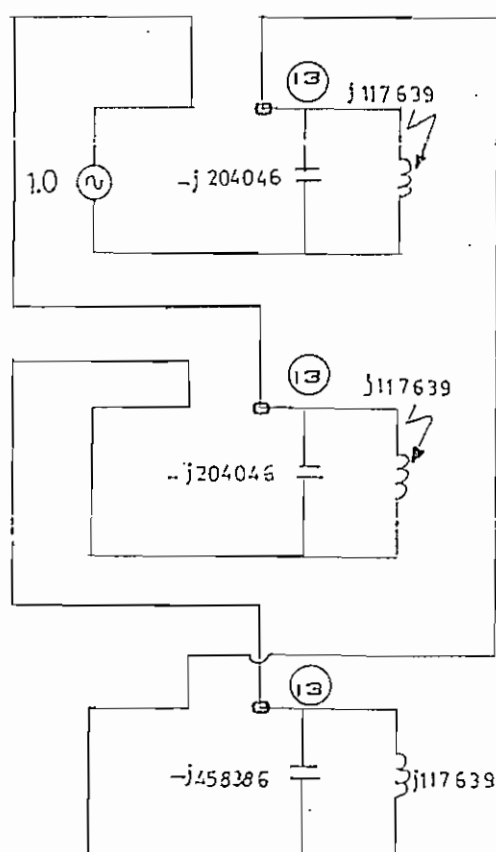


Fig. Nº VI.5: Diagrama de secuencias interconectado con valores X_{Co} , X_C y X_m

(Apertura de dos conductores, éste se abre en el punto 13)

Para cuando se incluya el efecto de la capacitancia de los devanados de los transformadores (Casos 2 y 4.); ésta se añade a la del alimentador; se determina la reactancia capacitiva bajo estas condiciones y nuevamente se aplican las relaciones III.19 y III.20 - para conocer los sobrevoltajes ferroresonantes por apertura de conductores.

A continuación se resume los valores de la capacitancia

de los devanados del transformador involucrada en el comportamiento ferroresonante, para los transformadores escogidos y, al nivel de voltaje que se quiere determinar ésta influencia (22.8/13.2 KV).

(tomado de la Ref. 33).

TRANSFORMADOR	KVA _N	CAPACITANCIA INVOLUCRADA (pF)	REACTANCIA CAPACITIVA(X_C) (ohmios)
T ₁	225	425	6'241 223
T ₂	500	522	5'081 456
T _n	112.5	392	6'766 632
T ₄	1000	690	3'844 232
T ₅	1500	890	2'980 359

Inmediatamente se analiza a cada uno de los transformadores.

VI.4.1.1 ANALISIS DEL TRANSFORMADOR T₁ (225.0 KVA)

Siguiendo el procedimiento de cálculos mostrado en VI.4.1 los valores a los que se ha llegado se ilustran en las Tablas de la Fig. VI.2 a la N° VI.5, para los casos que se discute.

TABLA Nº VI.2: SOBREVOLTAJES POR APERTURA DE CONDUCTORES -Caso 1.-

PUNTO DE APERTURA	DISTANCIA AL TRANSF. (km.)	X_{Co} (ohmios)	X_c (Ohmios)	SOBREVOLTAJES (p.u.)	
				1 conductor abierto	2 conductores abiertos
14	0.7	916.773	408.093	-0.649	1.847
13	1.4	458.386	204.046	-1.153	-7.527
3	3.3	155.863	66.755	-0.003	0.003
2	4.3	124.309	53.031	-0.081	0.088
0	6.6	84.816	36.006	-0.149	0.175

TABLA Nº VI.3: SOBREVOLTAJES POR APERTURA DE CONDUCTORES -Caso 2.-

PUNTO DE APERTURA	DISTANCIA AL TRANSF. (Km.)	X_{Co} (Ohmios)	X_c (Ohmios)	SOBREVOLTAJES (p.u.)	
				1 conductor abierto	2 conductores abiertos
15	0.0	6'241.223	6'241.223	-0.515	1.060
14	0.7	799.355	383.046	-0.678	2.109
13	1.4	427.023	197.586	-1.276	-4.629
3	3.3	152.065	66.049	-0.003	0.003
2	4.3	121.881	52.584	-0.079	0.086
0	6.6	83.679	35.799	-0.147	0.173

TABLA Nº VI.4: SOBREVOLTAJES POR APERTURA DE CONDUCTORES -Caso 3.-

PUNTO DE APERTURA	DISTANCIA AL TRANSF. (Km.)	X_{Co} (Ohmios)	X_c (Ohmios)	SOBREVOLTAJES (p.u.)	
				1 conductor abierto	2 conductores abiertos
14	0.7	916.773	408.093	-0.649	1.847
13	1.4	458.386	204.046	-1.153	-7.527
3	3.3	57.836	24.837	-0.179	0.218
2	4.3	50.022	21.506	-0.188	0.231
0	6.6	41.300	17.687	-0.198	0.247

TABLA N° VI.5: SOBREVOLTAJES POR APERTURA DE CONDUCTORES -Caso 4.

PUNTO DE APERTURA	DISTANCIA AL TRANSFORMAD. (km.)	X_{Co} (ohmios)	X_C (ohmios)	SOBREVOLTAJES (p.u.)	
				1 conductor abierto	2 conductores abiertos
15	0.0	6'241-223	6'241-223	-0.515	1.060
14	0.7	799.355	383.046	-0.678	2.109
13	1.4	427.023	197.586	-1.276	-4.629
3	3.3	57.304	24.739	-0.178	0.217
2	4.3	49.624	21.432	-0.187	0.230
0	6.6	41.029	17.677	-0.198	0.246

VI.4.1.2 ANALISIS DEL TRANSFORMADOR T_2 (500.0 KVA)

Siguiendo el procedimiento de VI.4.1, los valores alcanzados se ilustran de las Tablas N° VI.6 a la N° VI.9, para los casos que se discute.

TABLA N° VI.6: SOBREVOLTAJES POR APERTURA DE CONDUCTORES -Caso 1.

PUNTO DE APERTURA	DISTANCIA AL TRANSFORMAD. (Km.)	X_{Co} (ohmios)	X_C (ohmios)	SOBREVOLTAJES.(p.u.)	
				1 conductor abierto	2 conductores abiertos
16	0.8	783.383	343.288	-0.560	1.280
5	1.7	143.683	60.852	5.503	-0.846
3	4.3	89.333	37.718	0.143	-0.125
2	5.3	77.906	32.906	0.046	-0.040
0	7.6	60.356	25.441	-0.065	0.069

TABLA N° VI.7: SOBREVOLTAJES POR APERTURA DE CONDUCTORES -Caso 2.

PUNTO DE APERTURA	DISTANCIA AL TRANSFORMADOR (Km.)	X_{Co} (ohmios)	X_C (ohmios)	SOBREVOLTAJES (p.u.)	
				1 conductor abierto	2 conductores abiertos
17	0.0	5'081.456	5'081.456	-0.508	1.032
16	0.8	682.494	321.564	-0.572	1.338
5	1.7	138.732	60.132	4.100	-0.804
3	4.3	87.790	37.440	0.139	-0.122
2	5.3	76.808	32.694	0.041	-0.039
0	7.6	59.648	25.314	-0.064	0.068

TABLA N° VI.8: SOBREVOLTAJES POR APERTURA DE CONDUCTORES -Caso 3.

PUNTO DE APERTURA	DISTANCIA AL TRANSFORMADOR (Km.)	X_{Co} (ohmios)	X_C (ohmios)	SOBREVOLTAJES (p.u.)	
				1 conductor abierto	2 conductores abiertos
16	0.8	788.383	343.288	-0.561	1.280
5	1.7	123.921	52.681	1.023	-0.508
3	4.3	57.836	24.837	-0.066	0.070
2	5.3	50.022	21.506	-0.100	0.111
0	7.6	41.300	17.697	-0.134	0.154

TABLA N° VI.9: SOBREVOLTAJES POR APERTURA DE CONDUCTORES -Caso 4.

PUNTO DE APERTURA	DISTANCIA AL TRANSFORMADOR (Km.)	X_{Co} (ohmios)	X_C (ohmios)	SOBREVOLTAJES (p.u.)	
				1 conductor abierto	2 conductores abiertos
17	0.0	5'081.456	5'081.456	-0.508	1.032
16	0.8	682.494	321.564	-0.572	1.338
5	1.7	120.971	52.140	0.952	-0.488
3	4.3	57.185	24.716	-0.065	0.070
2	5.3	49.534	21.415	-0.099	0.110
0	7.6	40.997	17.635	-0.133	0.153

VI.4.1.3 ANALISIS DEL TRANSFORMADOR T_n (112.5 KVA)

Se sigue el procedimiento de VI.4.1 y, los resultados se indican en las Tablas de la Nº VI.10 a la Nº V.13

TABLA Nº 10: SOBREVOLTAJES POR APERTURA DE CONDUCTORES -Caso 1.-

PUNTO DE APERTURA	DISTANCIA AL TRANSFORMADOR. (Km.)	X_{Co} (Ohmios)	X_C (Ohmios)	SOBREVOLTAJES (p.u.)	
				1 conductor abierto.	2 conductores abiertos
8	0.3	2'083.750	836.827	-0.592	1.449
7	1.2	324.083	136.636	0.147	-0.128
5	2.8	175.705	73.963	-0.115	0.130
3	5.4	100.749	42.372	-0.180	0.220
2	6.4	86.548	36.395	-0.190	0.235
0	8.7	65.359	27.478	-0.204	0.256

TABLA Nº VI.11: SOBREVOLTAJES POR APERTURA DE CONDUCTORES -Caso 2.-

PUNTO DE APERTURA	DISTANCIA AL TRANSFORMADOR. (Km.)	X_{Co} (ohmios)	X_C (Ohmios)	SOBREVOLTAJES (p.u.)	
				1 conductor abierto	2 conductores abiertos
19	0.0	6'766.632	6'766.632	-0.422	1.092
8	0.3	1'593.148	791.875	-0.627	1.681
7	1.2	309.271	133.951	0.138	-0.121
5	2.8	171.258	73.163	-0.113	0.127
3	5.4	99.271	42.108	-0.179	0.217
2	6.4	85.455	36.200	-0.189	0.233
0	8.7	64.734	27.367	-0.203	0.254

TABLA Nº VI.12: SOBREVOLTAJES POR APERTURA DE CONDUCTORES -Caso 3.

PUNTO DE APERTURA	DISTANCIA AL TRANSFORMADOR. (Km.)	X_{Co} (ohmios)	X_C (ohmios)	SOBREVOLTAJES (p.u.)	
				1 conductor abierto	2 conductores abiertos
8	0.3	617.318	261.187	-2.390	-1.719
7	1.2	238.351	101.353	-0.029	0.030
5	2.8	123.921	52.681	-0.159	0.189
3	5.4	57.836	24.837	-0.203	0.254
2	6.4	50.022	21.506	-0.207	0.261
0	8.7	41.300	17.697	-0.213	0.271

TABLA N° VI.13: SOBREVOLTAJES POR APERTURA DE CONDUCTORES Caso 4.

PUNTO DE APERTURA	DISTANCIA AL TRANSFORMADOR (Km)	X_{Co} (ohmios)	X_C (ohmios)	SOBREVOLTAJES (u.p.)	
				1 conductor abierto	2 conductores abiertos
19	0.0	6'766.632	6'766.632	-0.522	1.092
8	0.3	565.709	231.480	-3.648	-1.378
7	1.2	230.241	99.857	-0.028	0.029
5	2.8	121.692	52.274	-0.157	0.186
3	5.4	57.346	24.746	-0.202	0.253
2	6.4	49.655	21.438	-0.206	0.260
0	8.7	41.049	17.651	-0.213	0.270

VI.4.1.4 ANALISIS DE TRANSFORMADORES: T_4 (1000 KVA) y T_5 (1500 KVA)TABLA N° VI.14: SOBREVOLTAJES POR APERTURA DE CONDUCTORES .- Caso 1
TRANSFORMADORES: T_4 (1000 KVA) y T_5 (1500 KVA)

Punto de Apertura	Distancia al Trans. (Km)	X_{Co} (ohmios)	X_C (ohmios)	SOBREVOLTAJES (p.u.)			
				1.000 KVA.		1.500 KVA.	
				1 cond.ab	2 con.ab.	1 cond.ab	2 cond.ab
8	0.7	877.189	368.509	-0.525	1.103	-0.528	1.117
7	1.6	324.083	136.656	-0.579	1.337	-0.592	1.448
5	3.2	175.705	73.963	-0.697	2.297	-0.740	2.847
3	5.8	100.749	42.372	-1.285	-4.513	-1.834	-2.199
2	6.8	86.548	36.395	-2.307	-1.765	-10.221	-1.108
0	9.1	65.359	27.478	-1.415	-0.586	-0.659	-0.397

TABLA N° VI.15: SOBREVOLTAJES POR APERTURA DE CONDUCTORES -Caso 2.
TRANSFORMADOR: T_4 (1.000 KVA)

PUNTO DE APERTURA	DISTANCIA AL TRANSFORMADOR (Km)	X_{Co} (ohmios)	X_C (ohmios)	SOBREVOLTAJES (p.u.)	
				1 conductor abierto	2 conductores abiertos
9	0.0	3'844.232	3'844.232	-0.505	1.021
8	0.7	714.217	336.274	0.531	1.130
7	1.6	298.886	131.965	-0.587	1.422
5	3.2	168.025	72.567	-0.710	2.444
3	5.8	98.176	41.910	-1.340	-3.940
2	6.8	84.642	36.054	-2.511	-1.662
0	9.1	64.266	27.283	1.329	-0.571

TABLA Nº VI.16: SOBREVOLTAJES POR APERTURA DE CONDUCTORES.- Caso 2.
TRANSFORMADOR: T₅ (1.500 KVA)

PUNTO DE APERTURA	DISTANCIA AL TRANSFORMADOR (Km.)	X _{Co} (ohmios)	X _C (Ohmios)	SOBREVOLTAJES (p.u.)	
				1 conductor abierto	2 conductores abiertos.
9	0.0	2'980.359	2'980.359	-0.507	1.030
8	0.7	677.720	327.958	-0.536	1.157
7	1.6	292.299	139.665	-0.604	1.522
5	3.2	165.923	72.172	-0.762	3.196
3	5.8	97.445	41.778	-2.015	-1.985
2	6.8	84.106	35.956	-23.471	-1.045
0	9.1	63.956	27.227	-0.628	-0.386

TABLA Nº VI.17: SOBREVOLTAJES POR APERTURA DE CONDUCTORES -Caso 3.
TRANSFORMADOR: T₄ (1000 KVA) y T₅ (1500 KVA)

Punto de apertura.	Distancia al transf (km.)	X _{Co} (ohmios)	X _C (ohmios)	SOBREVOLTAJES			
				1000 KVA.		1500 KVA	
				1. conduc. abierto	2. conduc. abiertos	1. conduc. abierto	2. conduc. abiertos
8	0.7	617.318	261.187	-0.536	1.157	-0.541	1.179
7	1.6	238.351	101.353	-0.621	1.636	-0.642	1.792
5	3.2	123.921	52.681	-0.903	9.266	-1.040	-23.785
3	5.8	57.838	24.837	0.694	-0.410	0.378	-0.275
2	6.8	50.022	21.506	0.313	-0.238	0.171	-0.146
0	9.1	41.300	17.697	0.094	-0.086	0.027	-0.026

TABLA N° VI.18: SOBREVOLTAJES POR APERTURA DE CONDUCTORES
TRANSFORMADOR: T₄ (1000 KVA)

Caso 4.

PUNTO DE APERTURA	DISTANCIA AL TRANSFORMADOR (Km)	X _{Co} (ohmios)	X _C (ohmios)	SOBREVOLTAJES (p.u.)	
				1 conductor abierto	2 conductores abiertos.
9	0.0	3'844,232	3'844,232	-0.505	1.021
8	0.7	531.903	244.570	-0.543	1.187
7	1.6	224.435	98.749	-0.630	1.703
5	3.2	120.051	51.969	-0.927	12.632
3	5.8	56.979	24.678	0.670	-0.401
2	6.8	49.379	21.386	0.306	-0.235
0	9.1	40.860	17.616	0.093	-0.085

TABLA N° VI.19: SOBREVOLTAJES POR APERTURA DE CONDUCTORES.

Caso 4.

TRANSFORMADOR: T₅ (1500 KVA)

PUNTO DE APERTURA	DISTANCIA AL TRANSFORMADOR (Km)	X _{Co} (Ohmios)	X _C (Ohmios)	SOBREVOLTAJES (p.u.)	
				1 conductor abierto	2 conductores abiertos
9	0.0	2'980.359	2'980.359	-0.507	1.030
8	0.7	511.394	240.142	-0.551	1.225
7	1.6	220.701	98.020	-0.657	1.913
5	3.2	118.974	51.766	-1.093	-11.713
3	5.8	56.735	24.632	0.366	- 0.268
2	6.8	49.196	21.352	0.167	- 0.143
0	9.1	40.736	17.593	0.026	- 0.026

VI.4.2. ANALISIS DE RESULTADOS.

Para efectos de comparación y análisis de resultados, en la Tabla N° VI.20, se describen los máximos valores de voltaje alcanzados por apertura de uno y, dos conductores de fase.

TABLA N° VI.20: MAXIMOS VALORES DE VOLTAJE ALCANZADOS POR APERTURA DE UNO Y DOS CONDUCTORES DE FASE, PARA LOS TRANSFORMADORES ANALIZADOS.

TRANSFOR MADOR.	KVA	MAXIMO VALOR DE VOLTAJE (p.u.)					
		1 Conductor abierto			2 conductores abiertos		
		Pto. de apertu- ra.	caso anali- zado	Volta- je.	Pto. de Apertu- ra.	Caso analiza- do.	Volta- je.
T ₁	225.0	13	1	-1.276	13	1	-7.529
T ₂	500.0	5	1	5.503	16	4	1.338
T _n	112.5	8	4	-3.648	8	3	-1.719
T ₄	1.000.0	2	2	-2.511	5	4	12.632
T ₅	1.500.0	2	2	-23.047	5	3	-23.785

De las Tablas, de la N° VI.2 a la N° VI.19 se pueden extraer los siguientes comentarios:

- Para los Transformadores analizados, los valores de sobrevoltaje alcanzados por apertura de uno y dos conductores de fase son variados; llegando a valores tan altos como -23.785 p.u. (Ver Tabla N° VI.20), ó aproximándose a 0.0 por unidad, como 0.003 p.u. (Ver Tabla N° VI.2). Esta diversidad de resultados se justifica en el sentido de que los valores que adquiere la reactancia capacitiva de secuencia cero y, positiva en los puntos analizados del Alimentador Primario en estudio son tales que, ésta, en combinación con la reactancia de magnetización del transformador dan una condición Ferresonante, que como se ve en algunos puntos es crítico.

- Para un caso específico analizado (Transformador T_1 por ejemplo) la impedancia de magnetización es constante y, el parámetro variable dependiendo del punto que se discuta en la reactancia capacitiva de secuencia cero y, positiva; de igual manera ésta reactancia varía de acuerdo al caso que se estudie, pues, en unos se incluye la capacitancia de los ramales ó en otro la capacitancia de los devanados del transformador analizado; esta circunstancia hace posible encontrar una gran diversidad de sobrevoltajes por apertura de uno y dos conductores de fase.
- Para transformadores de relativamente pequeña capacidad (112.5 KVA) por ejemplo, ubicados en el Alimentador Primario en estudio, no hay problema de Ferresonancia, pues, los sobrevoltajes determinados son bajos y, en la mayor parte de los puntos en discusión son menores que 1.0 por unidad (Ver Tablas, de la N° VI.10 a la N° VI.13); en cambio con transformadores de mayor potencia (225.0 KVA ó 500 KVA) el problema de Ferresonancia ya es considerable, pues, en algunos puntos en discusión se presentan voltajes tan altos como -7.527 por unidad en el punto 13 para cuando se analiza al transformador de 225.0 KVA ó de 5.503 p.u. en el punto 5 para cuando se estudia al transformador de 500.0 KVA. Finalmente para transformadores de mayor potencia como 1000 KVA ó 1500 KVA el problema de Ferresonancia, en el Alimentador Primario en estudio es grave, pues los sobrevoltajes determinados son mayores que los anteriores (Ver Tabla N° VI.20) y, consecuentemente los problemas son críticos para la Red en estudio; principalmente para los transformadores puesto que el aislamiento de ellos se verá afectado, con el consecuente daño que esto implica.

- Para cuando los sobrevoltajes determinados sin la inclusión de la capacitancia de ramales y transformador son pequeños o están en alrededor de 1.0 p.u. el efecto de la capacitancia de los ramales y transformador no es apreciable, pero cuando los sobrevoltajes son mayores ésta diferencia se acentúa. Esta situación se puede observar en las Tablas de la Nº VI.2 a la Nº VI.19.
- En la Tabla Nº VI.20 se ha resumido los máximos valores de voltaje alcanzados para cada uno de los transformadores analizados y, se aprecia que mientras mayor es la potencia del transformador los sobrevoltajes son igualmente mayores; también se desprende que la inclusión de la capacitancia de los ramales y transformador son factores preponderantes para el apareamiento de una condición Ferresonante crítica.

VI.4.3. Sobrevoltajes Ferresonantes por maniobra de Transformadores

Se presentan sobrevoltajes ferresonantes cuando se energiza una sola fase ó dos fases del Alimentador Primario con elementos de maniobra y seccionamiento 1 Ø y, los sobrevoltajes pueden aparecer - tanto en los devanados del transformador como en la capacitancia de la línea.

En el diagrama de la Fig. Nº VI.2 se observa los posibles puntos de maniobra del Alimentador escogido. Para cuando el elemento de maniobra sea Tripolar se asumirá una maniobra no 3 Ø (punto 0).

Los sobrevoltajes a ser determinados se los realiza tomando como base las curvas de línea sólida de las Figs. Nº III.14.b y, III.15 b, las cuales dan el voltaje fase-tierra en una fase abierta; con una y dos fases energizadas respectivamente.

Los valores de sobrevoltaje a ser obtenidos son aproximados por cuanto las únicas curvas disponibles han sido determinadas para una relación de capacitancias de: $C_1 - C_0 = 0.0$ (Curva de línea a trazos) y $C_1 - C_0 = 0.006 \text{ uF/milla}$ (Curva de línea sólida); siendo ésta última la más aproximada para el propósito que se persigue.

Con estos antecedentes, el procedimiento para determinar los sobrevoltajes es el siguiente: Una vez conocido el valor de la relación X_{Co}/X_m en un punto de maniobra, éste valor permite trasladarse a las curvas N° III.14.b y III.15.b para el caso de voltaje en una fase abierta con una fase energizada y, voltaje en una fase abierta con dos fases energizadas respectivamente. De tal manera que conociendo X_{Co}/X_m directamente se obtiene el sobrevoltaje.

Como se ha indicado anteriormente la capacitancia de los ramales y el transformador son factores importantes en el comportamiento ferresonante del Alimentador Primario en estudio; con éste criterio el cálculo de los sobrevoltajes por maniobra se hará para los siguientes casos:

- Caso 5. Maniobra de transformadores (Una y dos fases energizadas), incluye la capacitancia del transformador pero no la de los ramales.
- Caso 6. Maniobra de transformadores (una y dos fases energizadas), incluye la capacitancia del transformador y la de los ramales.

Los valores determinados de sobrevoltajes por maniobra de transformadores (los involucrados en el estudio) para los diferentes puntos en discusión se ilustran en las Tablas N° VI.21 y VI.22

TABLA N° VI.21: SOBREVOLTAJES POR MANIOBRA.- Caso 5.

PUNTO DE MANIOBRA	DISTANCIA AL TRANSFORMADOR (Km)	TRANSFORMADOR.	X_{Co} (Ohmios)	X_{co}/X_m (Ohmios)	SOBREVOLTAJES (p.u)	
					Una fase* energizada.	Dos fases* energizadas.
14	0.7	T_1	799.355	6.79	2.70	-1.80
13	1.4		427.023	3.63	2.80	-1.90
0	6.6		83.679	0.71	3.00	-2.25
16	0.8	T_2	682.494	13.00	2.50	-1.30
5	1.6		139.732	2.66	2.85	-2.05
0	7.6		59.648	1.44	2.99	-2.20
5	2.8	T_n	171.258	0.90	3.00	-2.25
0	8.7		64.734	0.34	3.10	-2.35
5	3.2	T_4	168.025	6.39	2.70	-1.80
0	9.1		64.266	2.45	2.85	-2.05
5	3.2	T_5	165.923	5.67	2.75	-1.80
0	9.1		63.956	2.18	2.85	-2.10

(*) El sobrevoltaje se produce en la(s) fase(s) no energizada(s)

TABLA N° VI.22: SOBREVOLTAJES POR MANIOBRA.- Caso 6

PUNTO DE MANIOBRA.	DISTANCIA AL TRANSFORMADOR (Km)	TRANSFORMADOR.	X_{Co} (ohmios)	X_{Co}/X_m (ohmios)	SOBREVOLTAJES (p.u)	
					1 fase * energizada.	2 fases * energizadas.
14	0.7	T_1	799.355	6.79	2.70	-1.80
13	1.4		427.023	3.63	2.80	-1.90
0	6.6		41.029	0.35	3.10	-2.30
16	0.8	T_2	682.494	13.0	2.50	-1.30
5	1.6		120.971	2.48	2.80	-2.05
0	7.6		40.997	0.93	3.00	-2.20
5	2.8	T_n	121.692	0.64	3.00	-2.25
0	8.7		41.049	0.22	3.15	-2.40
5	3.2	T_4	120.051	4.57	2.75	-1.85
0	9.1		40.860	1.55	2.90	-2.20
5	3.2	T_5	118.974	4.06	2.75	-1.90
0	9.1		40.736	1.39	2.95	-2.20

(*) El sobrevoltaje se produce en la(s) fase(s) abierta(s)

De las Tablas N° VI.21 (Caso 5) y N° VI.22 (Caso 6) los sobrevoltajes no pasan de 3.50 p.u. en valor absoluto. Para el caso de una fase energizada el voltaje fase-tierra en la(s) fase(s) abierta - (s) tienen la característica de ser positivos y, para el caso de dos fases energizadas, son negativos existiendo bajo ésta condición una inversión de fase.

Las curvas, en las cuales se basa el cálculo de los sobrevoltajes en condiciones de maniobra tienen la posibilidad de, para un mismo valor de X_{Co}/X_m , obtenerse tres valores distintos de sobrevoltaje. En las tablas descritas se ha ilustrado los valores más altos posibles; pero se menciona la posibilidad antedicha.

- Se aprecia que para valores altos de la relación X_{Co}/X_m los voltajes fase-tierra en la(s) fase(s) abierta(s), para cuando se tiene una y dos fases energizadas, son los menores (2.50 y 1.30 p.u. respectivamente); mientras que para valores bajos de X_{Co}/X_m , como es el punto 0 (transformador T_n , Caso 6.) donde se tiene - que $X_{Co}/X_m = 0.22$, los voltajes en éste caso son de 3.15 y 2.40 respectivamente; se concluye que, mientras menor es el valor de la relación X_{Co}/X_m mayor es el voltaje obtenido (Ver Tablas Nº VI.21 y VI.22).

VI.5. ALTERNATIVAS DE CONTROL DE FERRORESONANCIA.

A continuación se hace una evaluación de alternativas de control de Ferroresonancia ilustrativa, escogiendo para ello a un solo transformador; de los que están siendo analizados y, los resultados a los que se llegue serán igualmente válidos para el resto. Se discutirá alternativas para el transformador T_1 (225 KVA).

De las Alternativas técnicamente factibles para prevención y control de Ferroresonancia, las que se analizan desde ese punto de vista son:

Alternativa 1. Protección local del transformador (Seccionador-fusible) Alimentador Primario y , protección (Reconectador).

Alternativa 2. Ninguna protección local en el transformador, Alimentador Primario, protección (Seccionador-fusible) y, resistencias/fase en el secundario del transformador.

Estas alternativas técnicamente factibles se han seleccionado en función de los criterios emitidos al describir los Procedimientos y Métodos de control de Ferroresonancia. Luego, estas alternativas de Control se comparan económicamente, a fin de que de dicha comparación se pueda seleccionar aquella más conveniente y que a su vez satisfagan los requerimientos técnicos.

VI.5.1 ANALISIS DE ALTERNATIVAS.

Alternativa 1. Protección local del transformador (seccionador-fusible), Alimentador Primario y, Protección (Reconectador)

El diagrama unifilar de la Fig. N° VI.6, ilustra a ésta alternativa

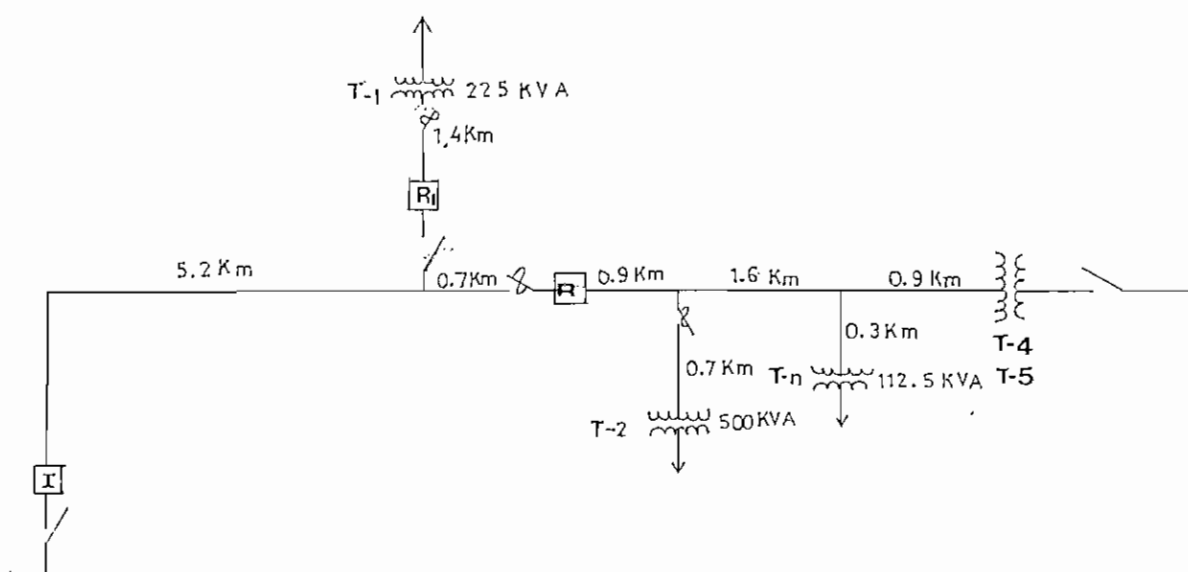


Fig. N° VI.6: Diagrama Unifilar - Alternativa 1.

- Justificación de los elementos incluidos en esta Alternativa.

Los elementos de protección local del transformador T_1 (225 KVA) se justifican en el sentido de que ellos impiden el apareamiento del circuito Ferroresonante (Ver Capítulo IV, numeral IV.2.2).

El reconectador R_1 se justifica por cuanto éste ramal es uno de los más largos (1.4Km) con respecto a otros y termina en un transformador de 225 KVA (T_1) y, principalmente debido a que en cálculo de los Sobrevoltajes Ferroresonantes por apertura de dos conductores de fase se ha obtenido uno de -7.527 por unidad (Ver Tabla Nº - VI.2), siendo necesario por ello preveer esta condición.

Al tener transformadores con Protección local (Seccionadores-Fusibles); la apertura accidental o por efectos de maniobra, la apertura por una falla interna del transformador, o por una falla en el circuito secundario de una o dos fases (se funden los fusibles) hace que la capacitancia involucrada en el comportamiento Ferroresonante se deba a la existente entre devanados y la de los devanados a tierra, la cual influye en el apareamiento de voltajes no muy altos en la localidad del transformador. El efecto de esta capacitancia se ve reflejado en la capacitancia a tierra del Alimentador Primario y, ésta influencia se refleja en los sobrevoltajes que se obtienen por apertura de uno y dos conductores de fase, bajo condiciones ferroresonantes.

Hacia el lado de la Alimentación, se ha ubicado un Reconectador Tripolar, como elemento de protección y maniobra, fundamentalmente porque tiene una mayor rapidez de respuesta en el cierre o apertura de los contactos de los polos; lo que hace que ésta característica de comportamiento sea efectiva cuando éstos aparatos realizan una

operación de maniobra en condiciones de falla, cerrando o abriendo casi simultáneamente los tres polos, con lo cual se previene la ocurrencia de sobrevoltajes Ferroresonantes que en ocasiones sigue a la maniobra no sincronizada de los polos (elementos de maniobra monopolares); con ésto se reduce la probabilidad de ocurrencia de un comportamiento Ferroresonante.

Adicionalmente cuando la protección local del transformador falla; el elemento llamado a operar es el Reconectador abriendo los contactos de los polos en un tiempo muy corto; con lo cual se evita el aparecimiento del circuito Ferroresonante.

Los seccionadores ubicados junto al Reconectador se justifican por efectos de mantenimiento.

Alternativa 2. Ninguna protección local en el transformador, Alimentador Primario, Protección (Seccionador-Fusible) y, Resistencia/fase en el secundario del transformador.

El Diagrama unifilar de la Fig. N° VI.7, describe a ésta alternativa.

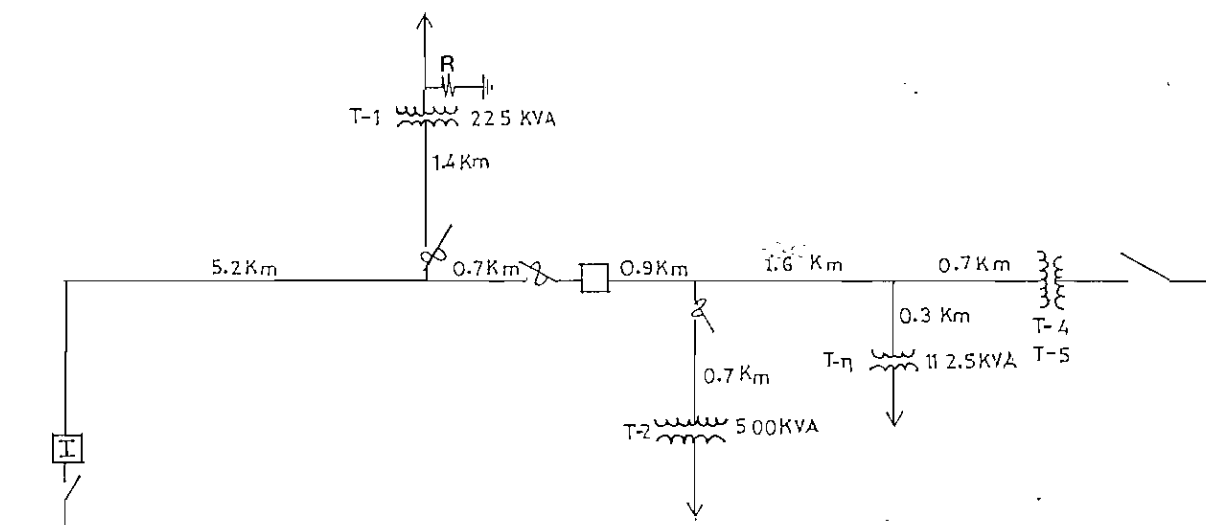


Fig. N° VI.7: Diagrama Unifilar - Alternativa 2.

En esta Alternativa se ha eliminado la protección local (Seccionador Fusible) del transformador, introduciéndose como una opción de control de Ferroresonancia, a Resistencias/fase en el Secundario del transformador. La inclusión de ellas en el secundario previene la ocurrencia de Ferroresonancia.

Los elementos de Protección del transformador, están ubicados a una cierta distancia del mismo.

- Máxima longitud entre transformador y elementos de protección.

La ecuación a utilizarse para determinar esta longitud es la IV.4 (Ver Capítulo IV, numeral IV.2.1.1), la cual se describe a continuación:

$$\ell = 106.7 \frac{I_{exc\%} \cdot KVA}{(KV)^2} \quad (IV.4)$$

Donde:

ℓ , máxima longitud permisible (m), entre el transformador y los elementos de protección.

$I_{exc\%}$, Corriente de excitación del transformador en %

KVA, Potencia nominal del transformador

KV, Voltaje nominal del Alimentador Primario (entre fases)

Para el transformador analizado ésta distancia es:

$$\ell = 92.4 \text{ m.}$$

Esta distancia determinada es la máxima longitud permisible entre los elementos de protección y el transformador, sin que haya necesidad de ubicar Resistencias/fase en el secundario del transformador. Si los elementos de protección se encuentran a una distancia mayor que la des

crita, se ve necesario ubicar Resistencias/fase en el secundario del transformador.

Para la Alternativa que se discute se ha escogido una distancia de 1.4 Km. entre el transformador T_1 y los elementos de seccionamiento (Inicio de ramal). En base a ésta Distancia se determinan el valor de la Resistencia/fase a ubicarse en el secundario del transformador.

- Cálculo del valor de Resistencia a utilizarse.

Para el cálculo de los valores de Resistencia/fase a ubicarse en el secundario del transformador involucrado (T_1), es necesario referirse a la Fig. N° IV.5 (Ver Capítulo IV, numeral IV.2.1.3), en donde las curvas dan el valor de R/X_m en términos de X_{Co}/X_m y, como se tiene el valor de X_m , inmediatamente queda determinado el valor de R .

De la Fig. N° IV.5 y para la longitud de línea escogida - (1.4 Km) entre los elementos de seccionamiento y el transformador se tiene:

X_{Co} (ohmios)	X_m (ohmios)	X_{Co}/X_m	R/X_m	R (p.u.)	R (ohmios)	Potencia (KW.)
458.386	117.693	3.89	1.65	6.42	17.74	0.909

Del valor de Resistencia encontrado, se aprecia que la misma tiene la característica de ser de bajo valor ohmico y de gran capacidad de corriente. Con éstas Resistencias ubicadas en el secundario del transformador; la condición Ferrosresonante, si ésta aparece, se ve limitada a rangos permitidos.

VI.5.2. Comparación de Alternativas.

Comparando Alternativas, se manifiesta, no sólo desde el punto de vista de Ferroresonancia; sino también de todas las fallas que pueden ocurrir en una Red que, la Alternativa 1 es técnicamente la más aconsejable; ya que la ubicación de Reconectores en el Alimentador Primario además de ser un elemento adecuado para la Prevención de Ferroresonancia, es un elemento seguro de protección contra fallas, además de que discrimina entre fallas permanentes y transitorias (las más comunes en una Red de Distribución).

Adicionalmente, la protección local de transformadores le da una mayor confiabilidad al Sistema, por cuanto, una falla interna en el transformador o en el circuito secundario inmediatamente hace que actúe ésta protección, quedando fuera de servicio solamente esta parte del sistema.

La ubicación de Reconectores en el Alimentador Primario incrementa la confiabilidad del mismo, debido a que es un elemento que discrimina entre una falla permanente y una transitoria (aproximadamente el 80% de todas las fallas en una Red de Distribución tienen esta característica. Ref. 25); en este último caso el servicio se renueva después de que esta falla ha desaparecido.

La Alternativa 2 en cambio es de menor confiabilidad, pues los elementos de protección incluidos en ella no discriminan entre fallas permanentes y transitorias; pero aquella es una alternativa técnicamente posible para prevención y control de Ferroresonancia.

VI.6 EVALUACION ECONOMICA.

Las alternativas técnicamente factibles para prevención y control de Ferroresonancia se comparan económicamente, a fin de que de dicha comparación se pueda seleccionar aquella alternativa que por ser económica sea la más adecuada y, cumple con los requisitos técnicos.

Para efectos de una evaluación económica adecuada se asume lo siguiente:

- Se considera que el Alimentador Primario está diseñado para satisfacer diferentes niveles de demanda y preveer su crecimiento, hasta el año de proyección (período de vida útil).
- Los elementos para control y/o prevención de Ferroresonancia son especificados tal que al año proyectado, siguen manteniendo sus características nominales de operación.
- Los costos por operación y mantenimiento, son básicamente los costos que representan al denominado grupo (cuadrilla), el cual consta de: 3 personas, 1 vehículo; accesorios para subir/bajar/sacar a un lado a los elementos y/o equipos de protección. Se ha estimado el costo del grupo/hora en 6800 sucres (Ref. 31).

Con estos antecedentes, se procede a determinar los costos grabados a los elementos de Control de Ferroresonancia.

VI.6.1. Costos de los elementos involucrados.

1. Costo de instalación:

Los rubros corresponden al precio de compra de los elementos (condiciones comerciales), accesorios para montaje y, el costo del trabajo de la instalación al inicio del período de evaluación (año 0). Estos

Los costos por operación y mantenimiento pueden ser trasladados a valor presente utilizando la relación V.1; y éstos se resumen en la Tabla Nº VI.23.

TABLA Nº VI.23: VALOR PRESENTE DEL COSTO POR OPERACION Y MANTENIMIENTO

A Ñ O	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2
0	40.800	13.600
2	32.526	10.841
4	25.292	8.643
6	20.671	6.890
8	16.478	5.430
10	13.137	4.379
12	10.472	3.491
14	8.349	2.783
16	6.655	2.218
18	5.306	1.769
20	<u>4.230</u>	<u>1.410</u>
TOTAL:	\$/. 184.553	\$/. 61.454

3. Costo de pérdidas de Energía.

Las Resistencias/fase a ser instaladas en el secundario del transformador tienen la característica de estar conectadas al Sistema continuamente; por lo tanto las pérdidas en éstos elementos independientemente del crecimiento total de la carga en la Red, van a ser constantes durante todos los años de vida útil de los elementos.

costos son:

Alternativa 1:

ELEMENTO	Nº	COSTO/INSTALACION	TOTAL
Reconectador(ref.34)	1	1'300.000	1'300.000
Seccionador-fusible	6	36.000	216.000
Resistencia/fase	-	-	-
			\$/ 1'516.000

Alternativa 2:

ELEMENTO	Nº	COSTO/INSTALACION	TOTAL
Reconectador	-	-	-
Seccionador-fusible	3	36.000	108.000
Resistencia/fase(Ref.35)	5	120.000	360.000
			\$/ 468.000

2. Costos por operación y mantenimiento.-

Se asume para efectos de análisis lo siguiente:

Reconectador: Cada dos años, su mecanismo debe ser Revisado, el aceite debe ser probado/limpiado, y los contactos principales revisados.

El total del trabajo se estima en 4 grupos/hora.

Seccionador-Fusible.- Cada dos años su mecanismo debe ser revisado y limpiado (incluye el reemplazo de tirafusibles). El trabajo se estima en 1 grupo/hora/seccionador-fusible.

Resistencias.- Cada dos años deben ser revisadas, limpiadas. El trabajo se estima es 1 grupo/hora/3 resistencias.

El costo de pérdidas de energía viene dado por la relación V.4, la cual se describe a continuación:

$$C_{PER_T} = PER_T \cdot t \cdot C(Kw-h)$$

Donde:

C_{PER_T} , costo de las pérdidas totales de energía (\$.)

PER_T , pérdidas totales (Kw).

t, tiempo durante el cual las resistencias están conectadas al sistema.

$C(Kw-h)$, costo del kilowatio-hora.

Para la evaluación de estos costos se asume que el Alimentador Primario escogido queda fuera de servicio aproximadamente un promedio de 60 horas por año (Ref. 31).

Con estos antecedentes las pérdidas anuales de energía en las Resistencias es:

Nº de Resistencias	Pérdidas/resistencias (Kw)	Pérdidas totales (Kw)	Costo de las Pérdidas de energía (Kw-h)/año (\$.)
3	0.909	2.727	166.074

Para efectos de evaluación económica, se considera que el costo promedio de energía es de S/. 7.0/Kw-h (Ref. 31), para el momento en que se hace el estudio (año 1987).

El valor presente de los costos de pérdidas de energía están dados por la relación V.5; la cual se describe a continuación:

$$VPC_{PER_T} = \frac{C_{PER_T}}{(1 + i)^n}$$

Donde:

VPC_{PER_T} , valor presente del costo de las pérdidas de energía (S/.

C_{PER_T} , costo de las pérdidas de energía. (S/.)

n , número de años (se asume 20).

i , tasa de interés (se asume el 12%)

Con estos antecedentes, el valor presente de los costos de pérdidas de energía (VPC_{PER_T}) para el período que se analiza (20 años) es:

$$VPC_{PER_T} = S/. 1'406.555$$

VI.6.2 EVALUACION ECONOMICA.

La evaluación económica está orientada a comparar los costos que se incluyen en cada una de las alternativas. Para ello se aplica la relación V.6, la cual se describe a continuación:

$$VC = (CI + VP_C + VPC_{PER_T}) \quad (v.6)$$

Donde:

CI , costo de la instalación

VP_C , valor presente del costo por operación y mantenimiento.

VPC_{PER_T} , valor presente del costo de las pérdidas de energía.

Para cada una de las Alternativas se tiene:

VALOR PRESENTE DE COSTOS	ALTERNATIVA 1.	ALTERNATIVA 2.
- Instalación:	1'516.000,00	468.000
- Operación y Mantenimiento-	184.553,00	61.454
- Pérdidas de energía:	-	1'406.555
TOTAL:	1'700.553,00	1'936.009

Comparando resultados se aprecia que la Alternativa 1. es la más económica que la Alternativa 2, y, por lo tanto es la más conveniente .

El costo por pérdidas de energía en las resistencias es muy significativa, por cuanto éstos elementos están constantemente conectados al circuito consumiendo energía; esta situación establece la diferencia económica entre las dos alternativas.

Se concluye, pues, que tanto técnica como económicamente la Alternativa 1. es la más apropiada y adecuada. Esto significa que la inclusión de elementos de protección en la localidad del transformador, la ubicación de Reconectores hacia el lado de la Alimentación, no sólo que es una solución atractiva para prevención de Ferroresonancia, sino que además es una apropiada para diferentes tipos de fallas, (condiciones que pueden aparecer en la red), lo cual evidentemente es un beneficio para las empresa, pues la confiabilidad del sistema se ve incrementada.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Se enuncian las siguientes:

- En el Alimentador Primario analizado y de manera general en todo Alimentador, el problema de Ferroresonancia no ocurre cuando todas las fases del mismo están energizadas desde la fuente de alimentación y se ha encontrado que los mayores problemas debido a este fenómeno son por apertura de dos conductores y sin carga en el circuito secundario; en estos casos se ha encontrado voltajes tan altos como -23.785 por unidad (Ver Tabla N° VI.20, Capítulo VI).
- Se ha comprobado con el análisis realizado que a 22.8 KV como nivel de voltaje del Alimentador Primario el problema de Ferroresonancia es significativo y, la capacitancia del transformador es parámetro determinante especialmente con transformadores de gran potencia (1500 KVA por ejemplo), ésta situación influye en el comportamiento Ferroresonante del sistema.
- Se desprende que la ubicación de transformadores de gran potencia en determinados puntos del Alimentador Primario en estudio serán causa de problemas por Ferroresonancia; especialmente si se ubican al final del Troncal, a transformadores de 1000 KVA y 1500 KVA; pues esto determina que si por alguna circunstancia se abre uno o

dos conductores de fase y, no hay carga en el secundario; en los puntos 1, 2 ó 5, se tendrán voltajes muy altos (Ver Tabla Nº VI.20). En éstos puntos la impedancia de magnetización es lo suficientemente comparable con la capacitancia de la línea como para provocar este efecto.

- Debido a que en la red analizada los voltajes obtenidos por efecto ferresonante son de gran magnitud, teniendo la característica de ser sostenidos; cuando éstas se establecen son causa del deterioro del aislamiento del transformador, es de esta manera necesario buscar mecanismos de control contra este efecto.
- Se aprecia que una medida acertada para controlar este tipo de comportamiento es el de disponer en la localidad del Transformador a seccionadores-fusibles y hacia el lado de la Alimentación (inicio de ramal ó intermedio de Troncal) disponer de reconectadores (interruptores). La coordinación de éstos elementos de protección debe ser adecuada para que ésta no falle en el momento que se produzca una perturbación.
- La utilización de resistencias en el secundario se ha visto que no es conveniente por el costo elevado que representan las pérdidas de energía, por cuanto estos elementos están constantemente conectados al sistema.
- Se ha visto que el uso de elementos de maniobra tripolares como es el caso de reconectadores, interruptores, es un mecanismo útil; para control de Ferresonancia. Además de que con la inclusión de éstos equipos la confiabilidad del sistema se ve incrementada.

- El estudio del comportamiento Ferroresonante no incluye a los pararrayos como elementos de protección; por cuanto bajo éstos efectos la magnitud de los sobrevoltajes pueden ser altos, esta circunstancia hace que el aislamiento del pararrayos se deteriore; lo cual hace necesario buscar otros mecanismos de control.
- Las diferentes Instituciones o Empresas que tienen relación con los sistemas de distribución deben estar concientes de que Ferreresonancia siempre es una posibilidad; por lo tanto es aconsejable - que ellos estudien y analicen a éste problema y busquen mecanismos adecuados de corrección que sirvan para controlar la probabilidad de su ocurrencia.

RECOMENDACIONES.

- Del estudio realizado del comportamiento Ferroresonante se desprende que los sobrevoltajes debido a éste efecto pueden ser en algunos casos altos que superan el nivel de aislamiento del sistema, se recomienda de ésta manera tomar en cuenta a éste fenómeno en la selección y coordinación del aislamiento de los sistemas de Distribución.
- Desde el punto de vista de Ferreresonancia se recomienda revisar - las protecciones de Alimentadores Primarios, pues se ha encontrado que la utilización de elementos de protección como reconectadores - (Interruptores) es una buena solución para el control del comportamiento Ferroresonante.
- Si por alguna circunstancia un Alimentador Primario queda fuera de servicio se recomienda seguir los siguientes pasos para cuando se

vaya a energizar: Primero energizar el ramal principal, luego las derivaciones y por último el transformador, con esto se evita el que pueda generarse el circuito Ferroresonante.

El proceso inverso será apropiado en la desenergización.

- Se recomienda a las Empresas Eléctricas u otras Instituciones buscar mecanismos adecuados de medición del comportamiento Ferroresonante en base de los cuales se podrán dar soluciones para el control de este fenómeno.
- En el caso de que las Empresas Eléctricas u otras Instituciones tengan estadísticas de fallas de Alimentadores Primarios se aconseja a éstas investigar hasta que punto se han dado casos de Ferroresonancia en sus sistemas de distribución.
- Como el problema de Ferroresonancia ha sido poco conocido en nuestro medio, el presente trabajo no pretende ser una guía general para el conocimiento y toma de decisiones de medidas tendientes a controlar este efecto; es más bien un cuadro básico de referencia que puede servir para estudios posteriores al respecto, por lo tanto es aconsejable seguir analizando y estudiando al comportamiento Ferroresonante como puede ser: Modelación Matemática de este efecto, Investigación de posibles mecanismos de medición en nuestras - Redes de Distribución, los cuales no se han tratado aquí por no estar incluidos dentro del alcance del trabajo. Los resultados a los que se llegarían debieran ser comparados con los obtenidos aquí. De ésto se pueden obtener conclusiones adicionales al respecto.

APENDICE A

CALCULO DE SOBREVOLTAJES POR APERTURA DE CONDUCTORES

El cálculo de los sobrevoltajes se basa en el método de los componentes simétricos.

Los circuitos involucrados en la apertura de conductores y las correspondientes redes de secuencia interconectadas se ilustran en la Fig. N° A1 y A2.

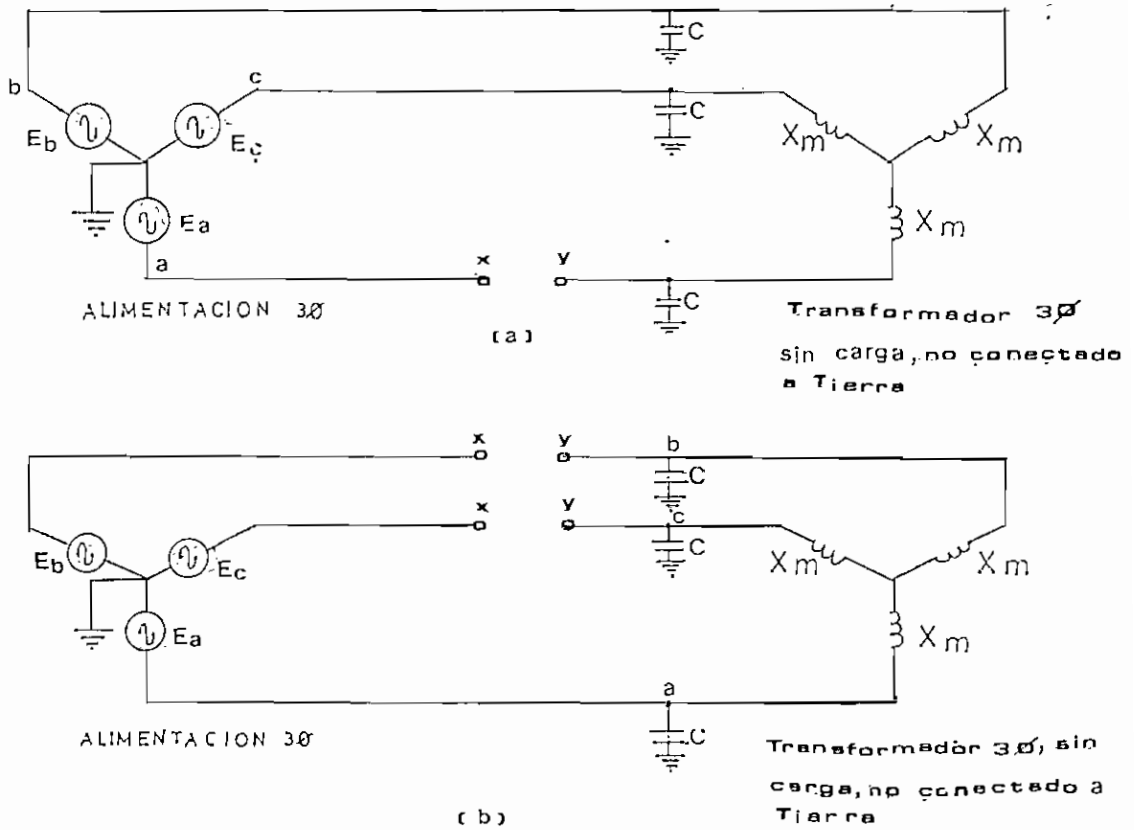
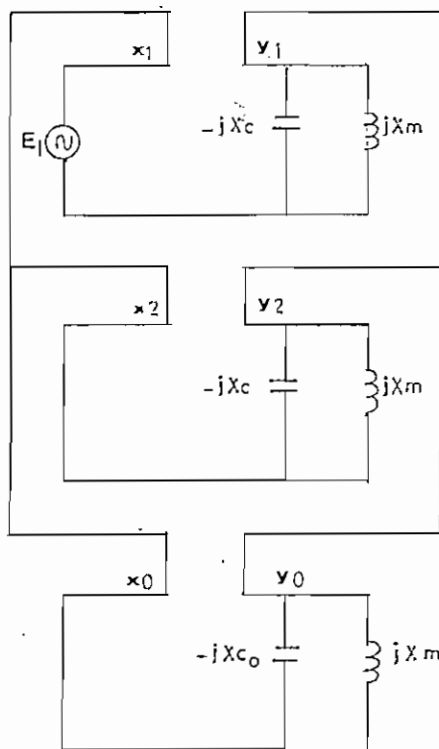
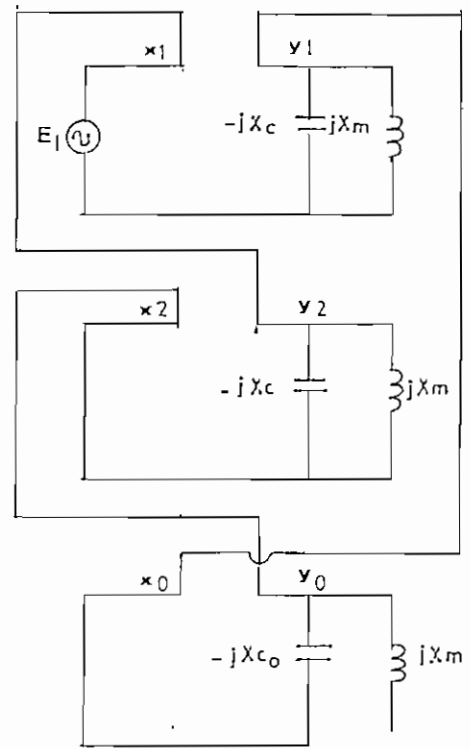


Fig. N° A1: Circuito que puede producir sobrevoltajes ferroresonantes
a) Un conductor abierto
b) Dos conductores abiertos.



(a)



(b)

Fig. N° A2: Circuito equivalente.

- a) Una fase abierta
- b) Dos conductores abiertos

En la Fig. N° A2:

X_{c0} , reactancia a tierra de secuencia cero.

X_c , reactancia a tierra de secuencia positiva

X_m , reactancia de magnetización (igual para todas las secuencias)

E_1 , voltaje generado de secuencia positiva (se asume 1.0 p.u)

Para el cálculo de los sobrevoltajes se hacen las siguientes asuncpciones: Al sistema se considera como una fuente de voltaje - ideal con voltajes de fase balanceados, la impedancia de la fuente es cero y se genera solo voltajes de secuencia positiva; la impedancia de la línea o cable es despreciable en comparación con la magnetización -

del transformador. (Ref. 18).

Con estas condiciones, se analizan los siguientes casos:

a) Un conductor abierto.

De la Ref. 18, para el circuito de la Fig. A2.a:

$$E_1 - E_{1y} = (Z_2 Z_0 E_1) / (Z_1 Z_2 + Z_1 Z_0 + Z_2 Z_0) \quad (A1)$$

$$E_{1y} = E_{1x} - (Z_2 Z_0 E_1) / (Z_1 Z_2 + Z_1 Z_0 + Z_2 Z_0) \quad (A2)$$

Pero para este circuito:

$$E_{1x} = E_1 \quad (A3)$$

Luego:

$$E_{1y} = [(Z_1 Z_2 + Z_1 Z_0) E_1] / (Z_1 Z_2 + Z_1 Z_0 + Z_2 Z_0) \quad (A4)$$

Pero $Z_1 = Z_2$; así que:

$$E_{1y} = [(Z_2 + Z_0) E_1] / (Z_2 + 2Z_0) \quad (A5)$$

De igual manera:

$$E_{2x} - E_{2y} = (Z_2 Z_0 E_1) / (Z_1 Z_2 + Z_1 Z_0 + Z_2 Z_0) \quad (A6)$$

Pero $E_{2x} = 0$, así que:

$$E_{2y} = (-Z_0 E_1) / (Z_2 + 2Z_0) \quad (A7)$$

Para el caso de la secuencia cero:

$$E_{0x} = E_{0y} = (Z_2 Z_0 E_1) / (Z_1 Z_2 + Z_1 Z_0 + Z_2 Z_0) \quad (A8)$$

Pero $E_{0x} = 0$, así que:

$$E_{0y} = (-Z_0 E_1) / (Z_2 + 2Z_0) \quad (A9)$$

$$\text{Puesto que } E_{ay} = E_{1y} + E_{2y} + E_{0y} \quad (A10)$$

$$E_{ay} = [(Z_2 - Z_0) E_1] / (Z_2 + 2Z_0) \quad (A11)$$

Aplicando la ecuación (A11) el circuito de la Fig. N° A2.a:

$$E_{ay} = \left[\begin{array}{cc} \frac{-jX_c X_m}{X_m - X_c} & + jX_{co} \\ \frac{-jX_c X_m}{X_m - X_c} & - j2X_{co} \end{array} \right] E_1 \quad (A12)$$

$$\text{Finalmente: } E_{ay} = \frac{X_c X_m - X_{co} (X_m - X_c)}{X_c X_m + 2X_{co} (X_m - X_c)} E_1 \quad (A13)$$

Donde: X_c , reactancia capacitiva fase - tierra de secuencia positiva

X_{co} , reactancia capacitiva fase - tierra de secuencia cero

X_m , reactancia de magnetización (igual para todas las secuencias)

E_1 , voltaje generado de secuencia positiva (Se asume 1.0 pu)

E_{ay} , sobrevoltaje en la fase abierta con respecto a tierra.

b) Dos conductores abiertos:

De la Ref. 18, para el circuito de la Fig. N° A2.b

$$E_{1x} - E_{1y} = [(Z_2 + Z_0) E_1] / (Z_1 + Z_2 + Z_0) \quad (A.14)$$

$$E_{1y} = E_{1x} - [(Z_2 + Z_0) E_1] / (Z_1 + Z_2 + Z_0) \quad (A.15)$$

Pero para éste circuito

$$E_{1x} = E_1 \quad (A.16)$$

$$\text{Luego: } E_{1y} = (Z_2 E_1) / (Z_1 + Z_2 + Z_0) \quad (A.17)$$

De igual manera:

$$E_{2x} - E_{2y} = (-Z_2 E_1) / (Z_1 + Z_2 + Z_0) \quad (A.18)$$

Pero $E_{2x} = 0$, así que:

$$E_{2y} = (Z_2 E_1) / (Z_1 + Z_2 + Z_0) \quad (A.19)$$

Para la secuencia cero:

$$E_{ox} = E_{oy} = (-Z_0 E_1) / (Z_1 + Z_2 + Z_0) \quad (A.20)$$

Pero $E_{ox} = 0$, así que:

$$E_{oy} = (Z_0 E_1) / (Z_1 + Z_2 + Z_0) \quad (A.21)$$

Puesto que:

$$E_{by} = E_{cy} = a^2 E_{1y} + a E_{2y} + E_{oy} \quad (A.22)$$

$$E_{by} = E_{cy} = [(a^2 + a) Z_1 + Z_0] E_1 / (2Z_1 + Z_0) \quad (A.23)$$

Pero $a^2 + a = -1$

Así que:

$$E_{by} = E_{cy} = [(Z_0 - Z_1)] E_1 / (2Z_1 + Z_0) \quad (A.24)$$

Aplicando la ecuación (A.24) al circuito de la Fig. N° A.2.b.:

$$E_{by} = E_{cy} = \frac{\frac{jX_{co} X_m}{X_m - X_c} E_1 - \frac{j2X_c X_m}{X_m - X_c} - jX_{co}}{1} E_1 \quad (A.25)$$

Finalmente:

$$E_{by} = E_{cy} = \frac{X_{co} (X_c - X_m) + X_c X_m}{X_{co} (X_c - X_m) - 2 X_c X_m} E_1 \quad (A.26)$$

Donde: X_c , reactancia capacitiva fase - tierra de secuencia positiva

X_{co} , reactancia capacitiva fase - tierra de secuencia cero.

X_m , reactancia de magnetización (igual en todas las secuencias)

E_1 , voltaje generado de secuencia positiva (se asume 1.0 pu)

E_{by} , E_{cy} , sobrevoltaje en las fases abiertas con respecto a tierra.

CALCULO DE LA REACTANCIA CAPACITIVA DE SECUENCIA PARA LINEAS AEREAS Y CABLES

1.- INTRODUCCION

Los efectos capacitivos de líneas son útiles en el estudio de diferentes problemas, como el que ahora nos compete; es por ello que se dan las fórmulas para determinar la reactancia capacitiva shunt de secuencia positiva, negativa y cero. Se considera el caso de un circuito monofásico (1 $\emptyset$) que muestra los fundamentos que permite llegar a aquellas fórmulas.

2.- LINEAS AEREAS

(Tomado de Ref. 36, 37)

En la derivación de las fórmulas de capacitancia, se asume que la distribución de la carga q en la superficie del conductor es uniforme; esto es verdadero por cuanto el espacio entre conductores en los circuitos de transmisión/distribución comunes es grande, de ésta manera la carga en la superficie exterior del conductor produce una distorsión despreciable en la distribución de la carga en el conductor.

Para el caso de un conductor simple aislado, el voltaje entre dos puntos ubicados a distancias x, y , en forma radial, desde el conductor, se puede definir como el trabajo que se realiza para mover la carga unidad de 1 colulumb desde el punto p_2 al punto p_1 , a través del campo eléctrico producido por la carga del conductor (Verf.Fig.NºB₁)

Este voltaje está dado por:

$$V_{xy} = 18 \times 10^9 \cdot q \cdot \ln \frac{y}{x} \text{ (voltaje)} \quad (B_1)$$

Donde: q , es la carga del conductor en coulomb/metro.

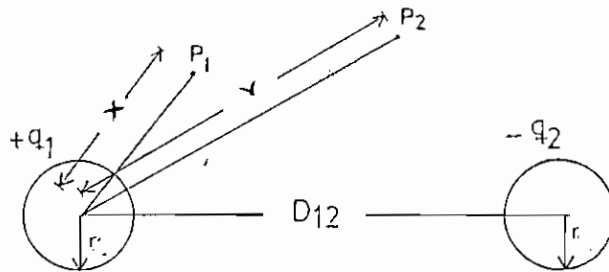


Fig. N° B1: Circuito monofásico a dos conductores

Aplicando la ecuación B_1 , y el principio de superposición a los dos conductores (Circuito de la Fig. N° B_1), y asumiendo que el conductor 1, solo tiene una carga q_1 , el voltaje entre los dos conductores con cargas q_1 y q_2 es:

$$V_{12} = 18 \times 10^9 \cdot q_2 \cdot \ln \frac{D_{12}}{r} \text{ (volts)}. \quad (B_2)$$

Ahora, asumiendo que solo el conductor 2, es el que tiene una carga q_2 , el voltaje entre los conductores 1 y 2 es:

$$V_{12} = 18 \times 10^9 \cdot q_1 \cdot \ln \frac{r}{D_{12}} \text{ (volts)}. \quad (B_3)$$

Con las cargas q_1 y q_2 presentes, y por el principio de superposición el voltaje V_{12} es la suma de los voltajes resultantes de q_1 y q_2 existentes a un mismo tiempo. De esta manera V_{12} es la suma de las ecuaciones (B_2) y (B_3) , donde están presentes las cargas q_1 y q_2 .

$$V_{12} = 18 \times 10^9 \cdot (q_1 \cdot \ln \frac{D_{12}}{r} + q_2 \cdot \ln \frac{r}{D_{12}}) \text{ (volts)} \quad (B_4)$$

Como para una línea bifilar se asume: $q_1 = -q_2$

$$V_{12} = 36 \times 10^9 \cdot q_1 \cdot \ln \frac{D_{12}}{r} \text{ (volts)}. \quad (B_5)$$

La capacitancia entre los conductores 1 y 2 es la relación entre la carga y el voltaje.

$$\frac{q_1}{V_{12}} = C_{12} = \frac{1}{36 \times 10^9 \cdot \ln \frac{D_{12}}{r}} \text{ (F/m)} \quad (B_6)$$

La capacitancia respecto al neutro en una línea bifilar es el doble de la capacitancia entre conductores (ecuación B_6); por lo tanto:

$$C_n = \frac{1}{18 \times 10^9 \cdot \ln \frac{D_{12}}{r}} \text{ (F/m)} \quad (B_7)$$

Donde: C_n , es la capacitancia fase neutro de la línea.

La reactancia capacitiva shunt (por conductor) es:

$$X_{C_n} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_n} \text{ (F/m)} \quad (B_8)$$

Reemplazando la ecuación B_7 en la B_8 se tiene:

$$X_{C_n} = 0.1098947 \times 10^6 \cdot \frac{60}{f} \cdot \log_{10} \frac{D_{12}}{r} \text{ (ohmios.Km)} \quad (B_9)$$

Donde: D_{12} y r están en pies.

La última relación puede ser escrita como:

$$X_{C_n} = X_{C_1} = 0.109847 \times 10^6 \cdot \log_{10} \frac{1}{r} + 0.109847 \times 10^6 \cdot \log_{10} D_{12} \quad (B_{10})$$

Pero adicionalmente:

$$X_{C_1} = X_a + X_d \quad (B_{11})$$

El término X_a toma en cuenta el flujo electrostático para un radio de 1 pie y es el primer término de (B_{10}) , es una función solamente del radio exterior del conductor. El término X_d toma en cuenta el flujo entre los dos conductores a una distancia D_{12} entre ellos, y un radio del conductor de 1 pie; es el segundo término de (B_{10}) .

Escribiendo de otra manera la relación (B_{10}) .

$$X_{c1} = 0.1098947 \times 10^6 \cdot \frac{60}{f} \cdot \log_{10} (60.96/d) + 0.1098947 \times 10^6 \cdot \frac{60}{f} \cdot \log_{10} (3.28/D_{12}) \cdot (\text{ohmios} \cdot \text{Km}) \quad (B_{12})$$

Donde: X_{c1} , es la reactancia capacitiva shunt de secuencia positiva
 d , es el diámetro del conductor en cm.

D_{12} , es la distancia entre conductores en m.

Para un circuito 3 ϕ , con disposición asimétrica (Ver Fig. N° B.2), la relación (B_{11}) cambia a:

$$X_{c1} = 0.1098947 \times 10^6 \cdot \log_{10} (60.96/d) \cdot \frac{60}{f} + 0.1098947 \times 10^6 \cdot \frac{60}{f} \cdot \log_{10} (3.28/D_{eq}) \cdot (\text{ohmios} \cdot \text{Km}) \quad (B_{13})$$

Donde:

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12} D_{13} D_{23}}$$

D_{eq} , media geométrica de las tres distancias de la línea (separación equilátera equivalente)

D_{12}, D_{13}, D_{23} ; distancia entre conductores de fase.

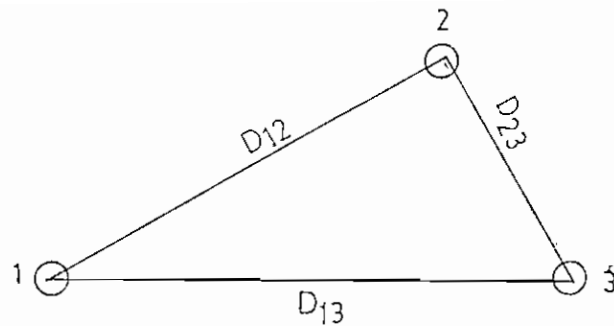


Fig. N° B.1: Sección transversal de una línea 3Ø con disposición asimétrica.

La reactancia capacitiva a tierra de secuencia cero además de considerar a X_a y X_d ; toma en cuenta el circuito de retorno por tierra, este valor es: (Ref. 18,36)

$$X_{co} = X_a + X_e - 2X_d \quad (B.14)$$

Donde: $X_e = \frac{19.80}{f} \cdot 10^6 \cdot \log_{10} \left(\frac{6.562 \bar{h}}{\bar{r}} \right) \text{ (ohmios.Kw)} \quad (B.15)$

En la última relación:

X_e , impedancia que toma en cuenta el circuito de retorno por tierra.

$\bar{h}$, es la altura promedio a tierra de los conductores de fase en m.

3. CABLES

(Tomado de la Ref. 38)

Se ha encontrado que para el caso de cables la reactancia capacitiva a tierra de secuencia positiva (X_{c1}), negativa (X_{c0}) es

igual.

Las Fig. B.3 y B.4 muestran a cortes transversales de cables monopolares y tripolares respectivamente.

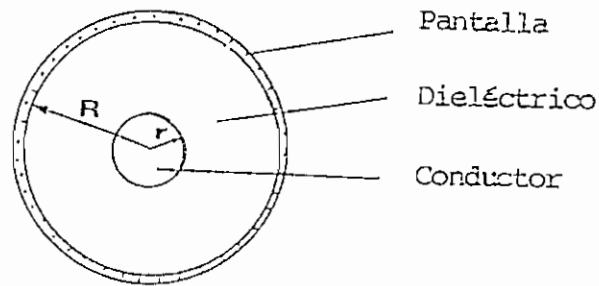


Fig. Nº B.3: Corte transversal de un cable monopolar.

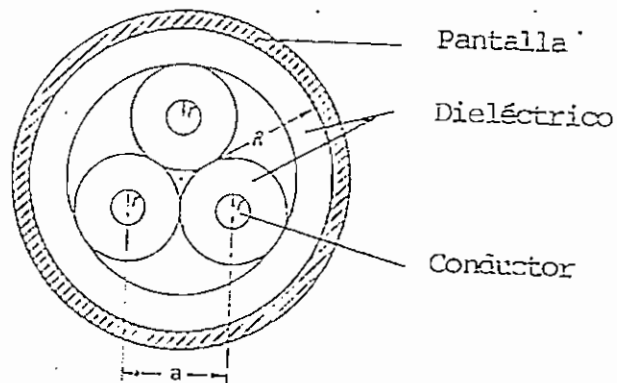


Fig. Nº B.4: Corte transversal de un cable tripolar con pantalla común.

La capacitancia de cables monopolares puede calcularse de la siguiente manera:

$$C = q/V$$

$$V = \int_r^R E dx$$

$$V = \int_r^R \frac{q}{2 \pi (8.85 \times 10^{-12}) \cdot K \cdot x} dx$$

Integrando y determinando el valor de la capacitancia:

$$C = \frac{55.60619 \times 10^{-6} x K}{L_n \frac{R}{r}} \quad (\mu F/m) \quad (B.16)$$

La reactancia capacitiva a tierra de secuencia positiva o negativa es:

$$X_{c1} = X_{co} = \frac{47701.88}{K} \frac{60}{f} L_n \frac{R}{r} \text{ (ohmios} \cdot K_m) \quad (B.17)$$

Donde:

R, es el radio del aislamiento

r, es el radio del conductor

K, es la constante dieléctrica

Para cables tripolares, con pantalla individual la capacitancia de cada conductor se calcula como si se tratara de un cable monopolar, entonces se hace uso de la relación (B.16)

Para cables tripolares con pantalla común la capacitancia de los cables se puede calcular en base a la siguiente relación: (Ref. 38)

$$C = \frac{0.11K}{L_n \frac{a(3R^2 - a^2)^3}{r^2(27R^6 - a^6)}} \quad (F/Km) \quad (B.18)$$

Donde:

R, radio interno de la pantalla

a, distancia entre conductores

r, radio del conductor

CALCULO DE LA REACTANCIA CAPACITIVA DE SECUENCIA

1.- REACTANCIA CAPACITIVA DE SECUENCIA CERO.

Según la ecuación B₁₅ del apéndice B, se tiene:

$$X_{c_0} = (X_a + X_e - eX_d)$$

Donde:

$$X_a = 0.109895 \cdot 10^6 \cdot \text{Log}_{10}(60.96/d)$$

$$X_d = 0.109895 \cdot 10^6 \cdot \text{Log}_{10}(3.281 \text{Deq})$$

$$X_e = 0.109895 \cdot 10^6 \cdot \text{Log}_{10}(6.562 \bar{h})$$

Además: d, diámetro del conductor en cm.

Deq = Separación equilátera, evitante en m.

$\bar{h}$ = altura promedio a tierra de los conductores de fase en m.

Para el caso que se analiza se tiene:

<u>Tipo de conductor</u>	<u>diámetro (d)</u> (cm)
4/0	1.326
2/0	1.051
1/0	0.935
# 2	0.742
# 4	0.589

La distancia entre conductores de fase, según establecen las normas de la Empresa Eléctrica Quito S.A., es:

La distancia equivalente (D_{eq}) entre conductores del alimentador primario resulta:

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ac}}$$

Donde:

D_{ab}, D_{bc}, D_{ac} ; son las distancias entre conductores de las fases a, b, y c respectivamente.

$$D_{eq} = (2.2)(1.17)(1.17)$$

$$D_{eq} = 1.4754523 \text{ (m)}$$

Del numeral VI.3, Capítulo VI se tiene la altura promedio a tierra de los conductores de fase; siendo este valor:

$$\bar{h} = 8.83 \text{ (m)}$$

Para los tipos de conductor dispuestos en el alimentador:

Tipo de conductor	X_a (ohmios.Km)	X_d (ohmios.Km)	X_c (ohmios.Km)	X_{co} (ohmios.Km)
4/0	182.700	75.256	581.843	614.032
2/0	193.793	75.256	581.843	625.125
1/0	199.375	75.256	581.843	630.706
# 2	210.409	75.256	581.843	641.741
# 4	221.430	75.256	581.843	652.762

2.- REACTANCIA CPACITIVA DE SECUENCIA POSITIVA.

De acuerdo al Apéndice B, ecuación(B_{11}), se tiene:

$$X_c = X_a + X_d$$

Siguiendo un procedimiento similar al anterior resulta

Tipo de conductor	Xa (ohmios.Km)	Xd (ohmios.Km)	Xc (ohmios.Km)
4/0	182.700	75.256	257.956
2/0	193.793	75.256	269.049
1/0	199.375	75.256	274.630
# 2	210.409	75.256	285.665
# 4	221.430	75.256	296.686

APENDICE C

REACTANCIA DE MAGNETIZACION DE TRANSFORMADORES

(Tomado de las Ref. 1,39)

Para determinar la impedancia de magnetización de un transformador 3 Ø, es necesario disponer de los siguientes datos:

1. Potencia nominal del transformador en KVA
2. Relación de transformación
3. Pérdidas en vacío en Kw.
4. Corriente de excitación en %

La corriente nominal en el devanado primario es:

$$I_n = \frac{KVA}{\sqrt{3} \cdot KV} \quad (C_1)$$

Donde: KVA, es la potencia nominal del transformador

KV , voltaje nominal entre fases, del alimentador primario.

La resistencia de pérdidas R, viene dada por:

$$R = \frac{\frac{(KV \cdot 10^3 / \sqrt{3})^2}{Po \cdot 10^3}}{3} = \frac{KV^2 \cdot 10^3}{Po} \quad (C_2)$$

Donde: KV, es el voltaje nominal entre fases

Po, pérdidas en vacío del transformador, en Kw.

La conductancia g_o es:

$$g_o = 1/R \quad (C_3)$$

La corriente de excitación en amperios es:

$$I_\phi = I_n \cdot I_{exc}\% \quad (C_4)$$

Donde: I_n , corriente nominal por el primario.

I_ϕ , corriente de excitación en amp.

La admitancia en vacío (Y_o) es:

$$Y_o = \frac{I_\phi \sqrt{3}}{KV.10^3} \quad (C_5)$$

Donde: I_ϕ , corriente de excitación en amp.

KV, voltaje fase-fase del alimentador primario

La susceptancia de magnetización (b_{mag}), en magnitud es:

$$b_{mag} = \sqrt{Y_o^2 - g_o^2} \quad (\text{Mohs}) \quad (C_6)$$

Luego, la impedancia de magnetización (X_m) es:

$$X_m = \frac{1}{b_{mag}} \quad (\text{ohmios}) \quad (C_7)$$

ANEXO C

CALCULO DE LA REACTANCIA DE MAGNETIZACION

- El procedimiento para determinar la impedancia de magnetización se indica en el apéndice C.

A continuación se describe el cálculo para un transformador de 225.0 KVA.

Datos del Transformador:

Potencial nominal = 225.0 KVA

$$I_{exc\%} = 2.0$$

Pérdidas en vacío: = 0.85 Kw

La corriente nominal en el devanado primario es:

$$I_N = \frac{KVA}{\sqrt{3} \text{ KV}} \text{ (amp)}$$

Donde KVA, es la potencia nominal del transformador

KV, voltaje nominal entre fases del alimentador.

$$I_N = \frac{225.0}{\sqrt{3} \cdot 22.8} = 5.6975$$

Las resistencias (R) de pérdidas en el núcleo viene dado por:

$$R = \frac{(KV_N)^2 \cdot 10^3}{P_o} \text{ (ohmios)}$$

Donde: KV_N , = voltaje nominal entre fases del Alimentador Primario

P_o , pérdidas en vacío en el transformador en Kw.

$$R = \frac{(22.8)^2 \cdot 1000}{0.85}$$

$$R = 611576$$

La conductancia (g_o) es:

$$g_o = \frac{1}{R} = 1.63511 \times 10^{-6} \text{ (mohs)}$$

La admitancia en vacío (Y_o) es:

$$Y_o = \frac{I_\phi}{V_o} \text{ (mohs)}$$

Además $I_\phi = I_N \cdot I_{exc\%}$ (amp)

Donde:

I_ϕ , corriente de excitación en amp.

I_N , corriente nominal en el primario

$I_{exc\%}$, corriente de excitación en % de la I_N

V_o , voltaje nominal fase-tierra en volts.

$$I_\phi = 0.1139507 \text{ amp.}$$

$$Y_o = \frac{0.1139507}{22.860/\sqrt{3}} = 8.6565 \times 10^{-6} \text{ (mohs)}$$

$$b_{mag} = \frac{V}{Y_o^2 - g_o^2} \text{ (mohs)}$$

$$b_{mag} = 8.5006 \times 10^{-6} \text{ (mohs)}$$

La impedancia de magnetización (X_m) es:

$$X_m = 1/b_{mag} \text{ (ohmios)}$$

$$X_m = 117.639 \text{ (ohmios)}$$

Siguiendo un procedimiento similar se puede conocer la impedancia de magnetización de los otros transformadores; y los valores a los que se ha llegado se resume a continuación:

Transformador	KVA _N	Pérdidas (P _o) (Kw)	X _m
T ₁	225.0	0.85	117.539
T ₂	500.0	1.40	52.501
T _n	112.5	0.61	189.340
T ₄	1,000.0	2.84	26.258
T ₅	1,500.0	3.00	59.290

La curva de magnetización de estos transformadores, es la curva de excitación del hierro utilizado en la fabricación de los mismos; ésta curva se ilustra en la Fig. N° C-1; en la cual se muestra la inducción en KILOGAUSS como una función de la POTENCIA DE EXCITACION.

EXCITING POWER — Rms Volt-Amperes Per Kilogram

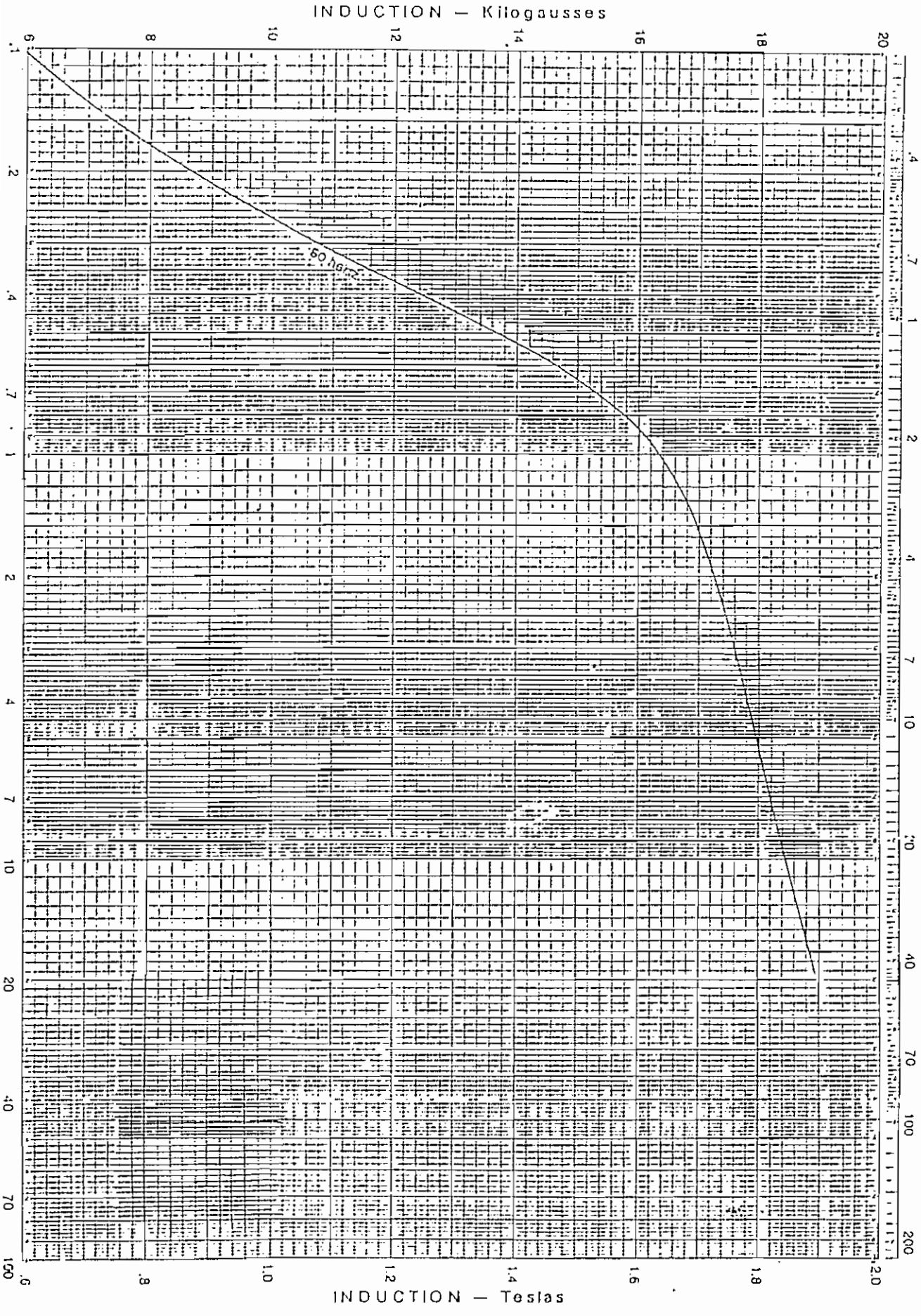


Fig. No. C-1

BIBLIOGRAFIA

1. Villacís Wilson, "Efecto de las sobretensiones de frecuencia industrial en la selección y coordinación del aislamiento en Redes de Distribución", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Agosto de 1986
2. Escuela Superior Politécnica del Litoral, "Distribution System - Protección Manual", Guayaquil, 1986.
3. George W. Walsh, "A Review of Lightning Protection and Grounding Practices", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.IA-9, Nº 2, March/April,1973.
4. IEEE Working Group on Switching Surges, "Switching Surges: Part IV-Control and Redustion on AC Transmission Lines", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, Nº 8, August, 1982.
5. M. Murano, "Voltage Escalation in Interrupting inductive current by Vacuum Switches", T-PAS 74, Jan/Feb.
6. M.F.Mc Granaghan, "Overvoltage Protection of Shunt-Capacitor Banks using MOV Arresters", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, Nº 8, August,1984.
7. CIER, "Sobretensiones y niveles de Aislación en Sistemas de Transmisión iguales o superiores a 60 KV.Tomo III",Santiago de Chile, Septiembre,1969.
8. Ayora Paul,"Notas sobre Coordinación del Aislamiento",Escuela Politécnica Nacional,Dic.,1983.

9. Reinhold Rudenberg, "Transients Performance of Electric Power Systems: Phenomena in Lumped Network", New York: Mc.Graw Hill, Book 1950.
10. Lister Eugene C., "Ferroresonance on Rural Distribution Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-9, N°1, January/February 1973.
11. Turley S.Q., "Ferro-resonance Oversimplified", Transmission & Distribution, Oct., 1966.
12. Kratz E.F., "Ferroresonance in Series Capacitor-Distribution Transformer Applications", IEEE, Vol. PAS, August 1959.
13. Germany N., "Review of Ferroresonance Phenomena in High-Voltage Power System and presentation of a Voltage Transformer Model for Predetermining them", CIGRE, Paper 33-18, 1972.
14. Kilgour A.F., "Analizing and Understanding Ferroresonance on Distribution Systems", Transmission & Distribution, June, 1968.
15. F.C. Van Wormer, "Analisis of the Series Ferroresonant Circuit", Distrib. Mag., Oct., 1969.
16. R.H. Hopkinson, "Ferroresonance During Single-Phase switching of 3-Phase Distribution Transformer Banks", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-84, Apr., 1965.
17. Peterson Harold A., "Transients in Power Sistems", New York: Dover Pub., 1966.
18. G.W. Staats, "Overvoltage in Medium Power Transformers", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, N°4, April, 1982.

19. F.C.Van Wommer,"Switching Three-Phase Transformer Banks",Distrib. Mag.,1st and 2nd quarters,1965.
20. R.H.Hopkinson,"Ferroresonant Overvoltage Control Based on TNA Tests on Three-Phase Wye-Delta Transformer Banks",IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,Vol.PAS-87,Feb.,1968.
21. R.H.Hopkinson,"Ferroresonant Overvoltage Control Based on TNA Tests on Three-Phase Delta-Wye Transformer Banks",IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,Vol.PAS-86,Oct.,1967.
22. G.P.,Ernst,"Why not Wye-Wye?";Transmission & Distribution,May, 1968.
23. R.Smith,"Overvoltages with Remotely-Switched Cable-Fed Grounded Wye-Wye Transformers",IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,Vol PAS-94,Nº 5,Sep./Oct.,1975.
24. R.F. Karlicek, "Ferroresonant of grounded Potential Transformers on Ungrounded Power Systems",Power Apparatus and Systems,Ag.,1959.
25. Orejuela Victor,Notas de Distribución II,Escuela Politécnica Nacional.
26. R.H.Hopkinson,"Ferroresonant Overvoltage due to Open Conductors",Distrib.Mag.,1967.
27. ASEA,"Guía para la localización de Interruptores",ASEA HV Apparatus,1986.
28. Contributors,Ebasco Service Incorporated,Two World Center,1969.
29. M.J.Monico,"Three-Phase Transformer Connections on High-Voltage

Distribution Feeders",Distribution,May,1971.

30. Bústos Héctor,"Condensadores en Serie en Líneas de Subtransmisión",Tesis,Escuela Politécnica Nacional,1986.
31. Datos obtenidos en la Empresa Eléctrica Quito S.A.
32. Normas de la Empresa Eléctrica Quito S.A.
33. Greenwood Allan,"Electrical Transients in Power Systems",Wiley-Interscience.A división of John Wiley & Soms,Inc.
34. Datos proporcionados por COINTEC S.A.
35. General Electric,"Neutral Grounding Resistors 56 99",General Electric,Agosto,1973.
36. Westinghouse,"Transmission and Distribution",Pensylvania:Westinghouse,1950.
37. Stevenson Willian D., "Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia", 2^a ed.Bogotá,Editorial Mc Graw Hill,1979.
38. Cántos Rómulo,"Protección de Cables de Alta Tensión",Tesis,Escuela Politécnica Nacional,1983.
39. Taco Luis,Teoría de Máquinas Eléctricas II,Escuela Politécnica Nacional.