

Tutorial sobre componentes simétricos

Parte 1: Ejemplos

Ariana Amberg y Alex Rangel, *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

Abstracto—Componentes simétricos y el sistema por unidad son dos de los tipos de matemáticas más fundamentales y necesarios para los ingenieros y técnicos de relés. Debemos practicar estas técnicas para comprenderlas completamente y sentirnos cómodos con ellas. Este documento técnico proporciona ejemplos teóricos y del mundo real con preguntas que se pueden utilizar para adquirir experiencia con componentes simétricos. Las soluciones completas a estas preguntas se pueden encontrar en el documento técnico "Tutorial sobre componentes simétricos, Parte 2: Soluciones", disponible para descargar en <http://www.selinc.com>.

INTRODUCCIÓN

El método de componentes simétricos se utiliza para simplificar el análisis de fallas al convertir un sistema desequilibrado trifásico en dos conjuntos de fasores balanceados y un conjunto de fasores monofásicos o componentes simétricos. Estos conjuntos de fasores se denominan componentes de secuencia positiva, negativa y cero. Estos componentes permiten el análisis simple de sistemas de energía en condiciones de falla o desequilibrio. Una vez que el sistema se resuelve en el dominio de componentes simétricos, los resultados se pueden transformar de nuevo al dominio de fase.

El tema de los componentes simétricos es muy amplio y puede llevar un tiempo considerable cubrirlo en profundidad. En esta introducción se incluye un resumen de los puntos importantes, aunque se recomienda encarecidamente que se estudien otras referencias para obtener una explicación más detallada de las matemáticas involucradas. Consulte [1], [2], [3], [4] y [5] para obtener más información sobre componentes simétricos.

A. Conversión de I_0 , I_1 y I_2 entre I_A , I_B y I_C un I_0 simétrico

Cualquier conjunto de I_0 , I_1 y I_2 se puede convertir en I_A , I_B y I_C y viceversa. Antes de I_0 , I_1 y I_2 se define como I_0 , I_1 y I_2 , como sigue:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde I_0 , I_1 y I_2 son los componentes de secuencia cero, positiva y negativa, respectivamente. Esta ecuación muestra la Transformación simétrica de componentes en términos de corrientes, pero las mismas ecuaciones son válidas también para voltajes.

Esto da como resultado las siguientes ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

Asimismo, un conjunto de componentes simétricos se puede convertir en cantidades de fase de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Esto da como resultado las siguientes ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Estas conversiones son válidas para una base de fase A, que se puede utilizar para fallas de fase A a tierra, fase B a fase C, fase B a fase C a tierra y trifásicas. En la Sección V, el Ejemplo 4 muestra cómo cambia la base para otros tipos de fallas irregulares. Estas conversiones también solo son válidas para una rotación de fase del sistema ABC. En la Sección VI, el Ejemplo 5 muestra cómo cambian las ecuaciones para una rotación de fase del sistema ACB.

Se creó una calculadora en Microsoft® Sobresalir® para permitirnos convertir entre los dominios de fase y componente simétrico. Esta calculadora está disponible para descargar con este informe técnico en <http://www.selinc.com>.

B. Representaciones de transformadores en las redes de secuencia

Para obtener información sobre la formación de las redes de secuencia, así como la representación de los componentes del sistema de energía en las redes de secuencia, consulte [1] y [2].

Los transformadores se representan simplemente como sus impedancias de secuencia positiva y negativa en las redes de secuencia positiva y negativa, respectivamente. Sin embargo, la representación del transformador en la red de secuencia cero puede ser más compleja y depende del tipo de conexión del transformador. La Fig. 1 muestra algunas conexiones comunes de transformadores y las representaciones equivalentes de secuencia cero. Para obtener una lista completa de las conexiones del transformador, consulte [1].

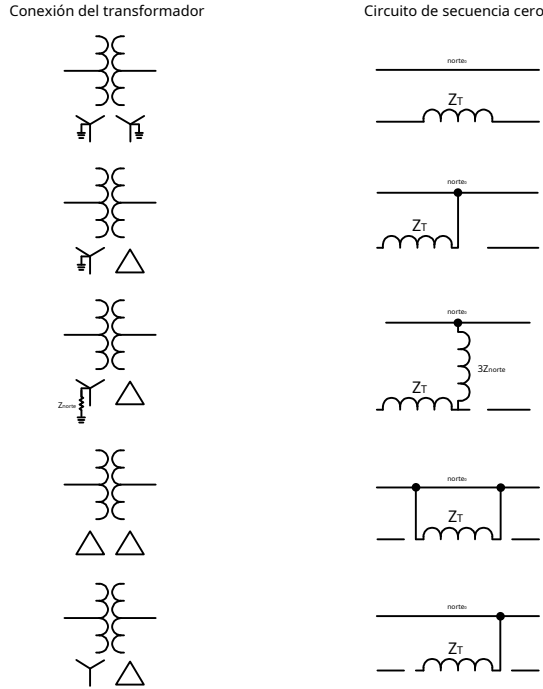


Fig. 1. Circuitos de secuencia cero para varios tipos de transformadores

C. Conexión de las redes de secuencia

Una vez que se definen las redes de secuencia para el sistema, la forma en que se conectan depende del tipo de falla. Las conexiones de red en secuencia para los tipos de fallas de derivación comunes se muestran en el resto de esta subsección. Para obtener las derivaciones completas de estas conexiones de red, así como las conexiones de red en secuencia para fallas en serie, consulte [2]. En el conexiones que siguen, Z_F se define como la impedancia de falla desde cada fase hasta el punto común, y Z_{GRAMO} se define como la impedancia desde el punto común a tierra. La Z_{GRAMO} el término es solo significativo cuando Z_F difiere por fase o si la impedancia de línea al punto de falla es diferente entre fases. los las suposiciones típicas son que Z_F es el mismo en todas las fases y las impedancias de línea son iguales, y por lo tanto, la Z_{GRAMO} término se descuida.

Para una falla trifásica, la red de secuencia positiva se usa con el punto de falla conectado nuevamente al bus neutro, como se muestra en la Fig.2.

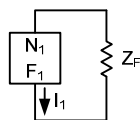


Fig. 2. Secuencia de conexiones de red para una falla trifásica

Para una falla monofásica a tierra, las tres redes están conectadas en serie. Cualquier impedancia de falla se multiplica por 3 y se incluye en esta conexión, como se muestra en la Fig.3.

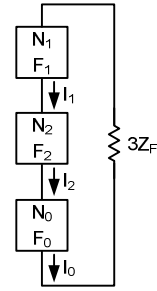


Fig. 3. Secuencia de conexiones de red para una falla monofásica a tierra

Para una falla de fase a fase, las redes de secuencia positiva y negativa se conectan en paralelo, como se muestra en la Fig.4.

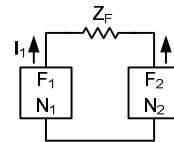


Fig. 4. Secuencia de conexiones de red para una falla de fase a fase

Para una falla de doble línea a tierra, las tres redes están conectadas en paralelo, como se muestra en la Fig.5.

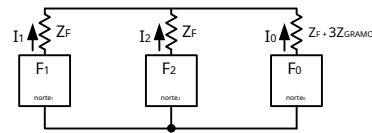


Fig. 5. Secuencia de conexiones de red para una falla de doble línea a tierra

D. El sistema por unidad

El sistema por unidad pone todos los valores de un sistema de energía en una base común para que se puedan comparar fácilmente en todo el sistema. Para usar el sistema por unidad, normalmente comenzamos seleccionando una base de energía trifásica y una base de voltaje de línea a línea. Luego podemos calcular las bases de corriente e impedancia utilizando las bases de potencia y voltaje elegidas como se muestra:

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \cdot V_{base}} \quad (5)$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} \quad (6)$$

Cualquier valor del sistema de energía se puede convertir a por unidad dividiendo el valor por la base del valor, como se muestra:

$$\text{Cantidad en por unidad} = \frac{\text{Cantidad real}}{\text{Valor base de la cantidad}} \quad (7)$$

Asimismo, un valor por unidad se puede convertir en una cantidad real en cualquier momento multiplicando el valor por unidad por el valor base de esa cantidad.

Para convertir impedancias de una base a otra, use el siguiente ecuación:

$$Z_{nuevo} = Z_{viejo} \cdot \frac{S_{base}}{S_{nuevo}} \cdot \frac{V_{base}^2}{V_{nuevo}^2} \quad (8)$$

Para obtener más información sobre el sistema por unidad, consulte [1].

E. Ejemplos

El resto de este artículo consta de ejemplos teóricos y prácticos que se pueden utilizar para practicar y adquirir experiencia en técnicas de componente simétrico y por unidad. Cada ejemplo consta de preguntas para guiar al lector a través del análisis, así como soluciones completas. En los casos con eventos del mundo real, los registros de eventos de los relés están disponibles para descargar con este documento técnico y el lector debe usar C.A.SELERATOR Culo analítico instant® SEL-56 01 Software para vista ellos (disponible por gratis descargar a <http://www.selinc.com>).

II. mIXAMPLE 1: SINGLE-PAGHASE VERSUS THREE-PAGHASE FAULT CURRENT

Este ejemplo muestra cómo calcular las corrientes de falla para dos tipos de fallas diferentes en dos ubicaciones diferentes en un sistema de distribución. La figura 6 muestra el sistema radial con dos posibles ubicaciones de fallas.

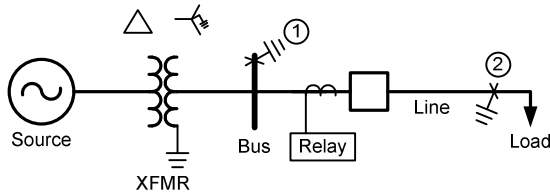


Figura 6. Sistema radial con dos ubicaciones de fallas

- II-a En un alimentador de distribución radial, ¿qué tipo de falla esperamos que produzca la mayor corriente de falla?
- II-b Usando componentes simétricos, resuelva la corriente de falla máxima para una falla trifásica atornillada en la ubicación 1.
- II-c Utilizando componentes simétricos, resuelva la corriente de falla máxima para una falla de fase a tierra en la ubicación 1.
- II-d Suponga un transformador de tipo núcleo con una impedancia de secuencia cero del 85 por ciento de la impedancia de secuencia positiva. Resuelva la corriente de falla para una falla de fase a tierra en la ubicación 1 y compare los resultados con los de una falla trifásica.
- II-e Usando componentes simétricos, resuelva la corriente de falla máxima para una falla trifásica en la Ubicación 2.
- II-f Utilizando componentes simétricos, resuelva la corriente de falla máxima para una falla de fase a tierra en la ubicación 2. ¿Es mayor o menor que la corriente de falla para una falla trifásica?

III. mIXAMPLE 2: PER-ULIENDRE SSISTEMA Y FAULT CALCULACIONES

Este ejemplo muestra cómo trabajar en el sistema por unidad y calcular las corrientes de falla para fallas en los terminales de alta tensión del transformador elevador que se muestra en la Fig. 7. La El voltaje previo a la falla en el lugar de la falla es de 70 kV_{LL}, y el generador y el transformador no están conectados al resto de Sistema de poder. Las impedancias de la fuente que se muestran son las reactancias subtransitorias (X_D'') del generador [6].

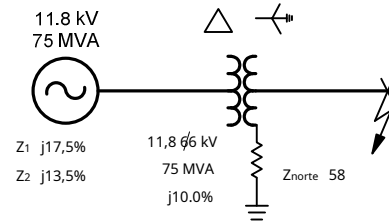


Figura 7. Diagrama unifilar para cálculos de corriente de falla

- III-a Seleccione las bases de potencia y voltaje para el sistema por unidad y calcule las bases de corriente e impedancia en consecuencia.
- III-b Convierta todas las impedancias del sistema, así como el voltaje previo a la falla, a una base común.
- III-c Dibuje las redes de secuencia positiva, negativa y cero para este sistema hasta el punto de falla.
- III-d ¿Cuáles son las corrientes máximas de fase de cortocircuito para una falla trifásica?
- III-e ¿Cuáles son las corrientes máximas de fase de cortocircuito para una falla de fase B a fase C?
- III-f ¿Cuáles son las corrientes máximas de fase de cortocircuito para una falla de fase A a tierra?

IV. mIXAMPLE 3: FAULT CALCULACIONES PARA UNnorteONRADIAL SSISTEMA

Este ejemplo muestra cómo trabajar en el sistema por unidad y calcular las corrientes de falla para un sistema no radial, como se muestra en la Fig. 8. El voltaje previo a la falla en la ubicación de la falla es 1.05 por unidad y la corriente de carga es insignificante. La fuente de impedancias se muestran las reactancias subtransitorias (X_D'') de los generadores [3].

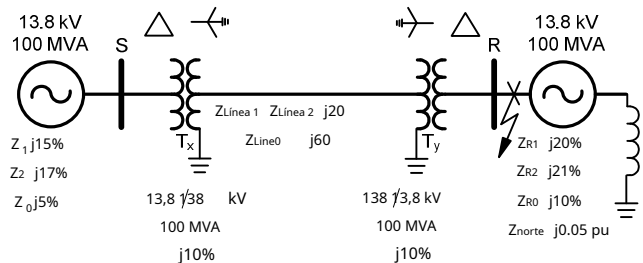


Fig. 8. Diagrama unifilar de un sistema no radial

- IV-a Seleccione las bases de potencia y voltaje para la unidad sistema y calcule las bases de corriente e impedancia en consecuencia.

- IV-b Convierta todas las impedancias del sistema, así como el voltaje previo a la falla, a una base común.
- IV-c Dibuje las redes de secuencia positiva, negativa y cero para este sistema.
- IV-d ¿Cuáles son las corrientes máximas de fase de cortocircuito para una falla trifásica?
- He ¿Cuáles son las corrientes máximas de fase de cortocircuito para una falla de fase B a fase C?
- IV-f ¿Cuáles son las corrientes máximas de fase de cortocircuito para una falla de fase B a fase C a tierra?
- IV-g ¿Cuáles son las corrientes máximas de fase de cortocircuito para una falla de fase A a tierra?
- IV-h Para una falla de fase A a tierra, encuentre las contribuciones máximas de corriente de secuencia positiva, negativa y cero de la Fuente S y la Fuente R.
- IV-i Encuentre los voltajes de fase en la ubicación de la falla durante una falla de fase A a tierra.

V. EXAMPLE 4: CCOLGANDO BASES

Este ejemplo muestra la importancia de utilizar la base correcta al calcular componentes simétricos. Los ejemplos típicos de libros de texto usan una base de fase A, que siempre asume una fase A a tierra, una fase B a fase C, una fase B a una fase C a tierra o una trifásica. culpa. Para otros tipos de fallas, la base deberá cambiarse en consecuencia para calcular los componentes simétricos correctos.

Este ejemplo muestra una falla de fase B a tierra que ocurrió en una línea de transmisión. Abra el registro del evento titulado **Ejemplo 4.cev**, y ver los componentes simétricos durante la falla.

- Virginia ¿Son las corrientes de componentes simétricas las que esperamos ver para una falla de fase a tierra?
- Vb Derive los componentes simétricos para una falla de fase A a tierra.
- Vc Derive los componentes simétricos para una falla de fase B a tierra.
- Enfermedad venérea ¿Cómo obtenemos los valores correctos de componentes simétricos para una falla de fase B a tierra?
- Ve ¿Por qué los componentes simétricos en C.A.SELERATOR ¿El Asistente analítico no calcula correctamente?

VI. miXAMPLE 5: PHASE ROTACION

Este ejemplo muestra la importancia de la rotación de fase al calcular cantidades de secuencia. El evento titulado

Ejemplo 5.cev es una condición de carga simulada en un sistema de protección SEL-351S. La ecuación de disparo en el relé es:

$$TR = 51P1T + 51G1T + 67P1 + 50Q1 + OC$$

donde 50Q1 es un elemento de sobrecorriente instantánea de secuencia negativa.

Vía ¿Cuál es la configuración de activación para 50Q1 en el relé? Según la corriente de secuencia negativa observada en el evento, ¿debería haberse disparado el relé?

VI-b Usando las corrientes de fase del evento, calcule la corriente de secuencia negativa I_2 .

VI-c ¿Es normal ver tanta corriente de secuencia negativa durante condiciones sin fallas?

VI-d ¿Cuál es la rotación de fase del sistema? ¿Coincide con el ajuste de rotación de fase en el relé?

Rivalizar Por que es C.A.SELERATOR ¿Asistente analítico calcula cantidades altas de secuencia negativa?

VI-f Calcule la corriente de secuencia negativa a mano utilizando la rotación de fase ACB.

VI-g ¿Por qué no se disparó el relé?

VII. miXAMPLE 6: FAULT LOCATOR

Este ejemplo muestra cómo usar componentes simétricos para determinar la ubicación de una falla usando informes de eventos de dos extremos de una línea de transmisión. Los relés de ambos extremos detectaron una falla interna de línea única a tierra en una línea de transmisión, como se muestra en la Fig. 9. Los informes de eventos de cada relé se proporcionan en los registros de eventos

titulados **Ejemplo 6 - Side S.eve** y **Ejemplo 6 - Side R.eve**.

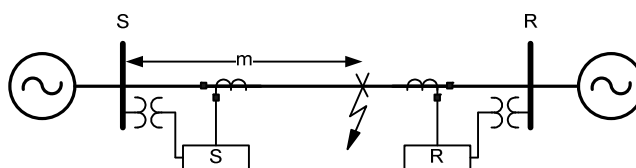


Fig. 9. Ubicación de la falla en un sistema de energía de dos fuentes

VII-a Dibuje las redes de secuencia para esta falla.

VII-b Usando las redes de secuencia, escriba una ecuación para resolver la ubicación de la falla *metro*.

VII-c Utilice los informes de eventos para obtener voltaje y corriente valores durante la falla, así como la impedancia de línea de secuencia negativa. Resolver *metro*.

VIII. mIXAMPLE 7: TRANSFORMER LINE-TO-GRAMORONDA FAULT

Este ejemplo muestra cómo derivar el cambio de fase, los componentes simétricos y las corrientes de falla a través de un transformador delta-estrella. El informe del evento titulado **Ejemplo 7.cev** se generó después de que se disparara un relé diferencial de corriente que protegía un transformador Dy1, como se muestra en la Fig. 10. Aunque el funcionamiento incorrecto del relé no es el foco de este ejercicio, fue causado por ajustes incorrectos de compensación de corriente de devanado en el relé.

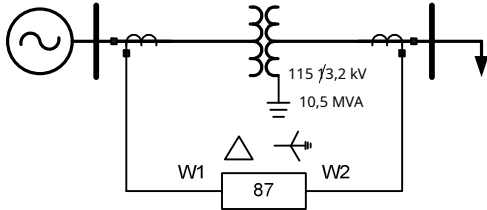


Fig. 10. Relé diferencial de corriente de transformador que protege un transformador Dy1

VIII-a ¿Qué tipo de avería es esta? Suponiendo un sistema radial, ¿La falla es interna o externa a la zona de protección?

VIII-b ¿Esperamos que las corrientes previas a la falla en el lado delta
¿Liderar o retrasar las corrientes en el lado de la estrella?

VIII-c El transformador está conectado al sistema como se muestra en la Fig. 11. ¿Cambia esto la relación de avance / retraso actual que esperamos ver a través del transformador? Si
¿así que cómo?

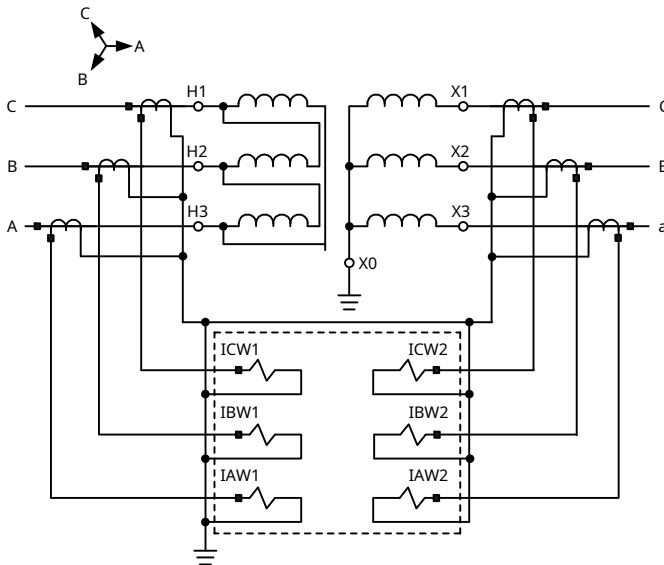


Fig. 11. Conexiones de transformador de fase a buje

VIII-d Dibuje los fasores para las corrientes previas a la falla que esperamos ver en el sistema así como las corrientes que entran al relé.
¿Coinciden con los fasores anteriores a la falla en el evento?

VIII-e Dibuje los fasores que esperamos ver en el sistema, así como los fasores que entran en el relé durante la falla.
¿Coincide esto con lo que muestra el evento?

VIII-f Observe los componentes simétricos del evento.

Derive estos fasores dibujando la red de secuencia de la falla.

VIII-g Usando los componentes de la secuencia, trabaje hacia atrás para derivar las corrientes de falla de fase en los lados delta y estrella del transformador.

IX. mIXAMPLE 8: TRANSFORMER PAGHASE-TO-PAGHASE FAULT

Este ejemplo muestra cómo derivar el cambio de fase, los componentes simétricos y las corrientes de falla a través de un transformador delta-estrella. El informe del evento titulado **Ejemplo 8.txt** se generó después de que se disparara un relé diferencial de corriente que protegía un transformador delta-estrella, como se muestra en la Fig. 12. La operación incorrecta del relé no es el enfoque de este ejercicio.

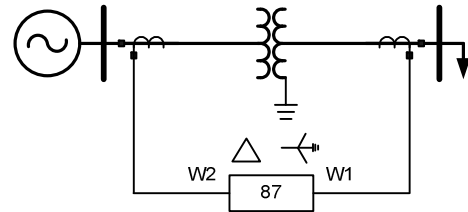


Fig. 12. Relé diferencial de corriente del transformador que protege un transformador delta-estrella

IX-a ¿Qué tipo de falla es esta? Suponiendo un sistema radial, ¿la falla es interna o externa a la zona de protección?

IX-b El transformador está conectado al sistema como se muestra en la Fig. 13. ¿Esperamos que las corrientes en el lado delta adelanten o retrasen las corrientes en el lado de la estrella?

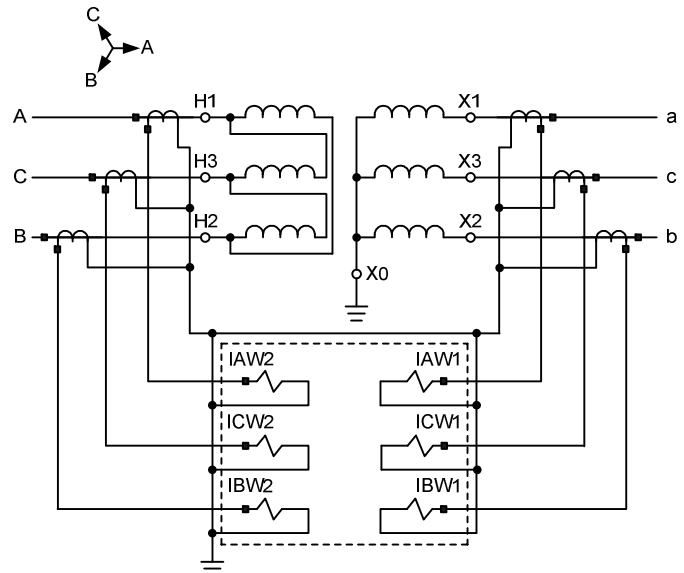


Figura 13. Conexiones de transformador de fase a buje

IX-c Dibuje los fasores para las corrientes previas a la falla esperadas en el sistema, así como los fasores que entran en el relé.

- IX-d Dibuje los fasores que se esperan en el sistema y que entren en el relé durante la falla. ¿Coincide esto con lo que muestra el evento?
- IX-e Mira los fasores de secuencia en el evento. Derive estos fasores dibujando la red de secuencia de la falla.
- IX-f Usando los componentes de secuencia, trabaje hacia atrás para derivar las corrientes de falla de fase en los lados delta y estrella del transformador.

X. REFERENCIAS

- [1] J. L. Blackburn y T.J. Domin, *Principios de protección de relés y Aplicaciones*. CRC Press, Boca Raton, FL, 2007.
- [2] P.M. Anderson, *Análisis de sistemas eléctricos con fallas*. Prensa de la Universidad Estatal de Iowa, Ames, IA, 1973.
- [3] J.D. Glover, M.S. Sarma y T.J. Overbye, *Análisis y diseño de sistemas de potencia (4ª edición)*. Thomson Learning, Toronto, ON, 2008.
- [4] E.O. Schweitzer, III y Stanley E. Zocholl, "Introducción a los componentes simétricos", actas de la 58ª Conferencia anual de retransmisiones protectoras de Georgia Tech, Atlanta, GA, abril de 2004.
- [5] Westinghouse Electric Corporation, División de instrumentos de relé, *Relés de protección aplicada*. Newark, Nueva Jersey, 1976.
- [6] The Electricity Training Association, eds., *Protección del sistema de energía Volumen 1: Principios y componentes*. The Institution of Electrical Engineers, Londres, Reino Unido, 1995.

XI. BIOGRAFÍAS

Ariana Amberg obtuvo su BSEE, magna cum laude, de St. Mary's University en 2007. Se graduó con una Maestría en Ingeniería en Ingeniería Eléctrica de Texas A&M University en 2009, especializándose en sistemas de energía. Ariana se incorporó a Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. en 2009 como ingeniera asociada de aplicaciones de campo. Ha sido miembro de IEEE durante 9 años.

Alex Rangel recibió un BSEE y un MSE de la Universidad de Texas en Austin en 2009 y 2011, respectivamente. En enero de 2011, Alex se incorporó a Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., donde trabaja como ingeniero asociado de aplicaciones de campo. Alex es actualmente miembro de IEEE.

Tutorial sobre componentes simétricos

Parte 2: Clave de respuestas

Ariana Amberg y Alex Rangel, *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

Abstracto—Componentes simétricos y el sistema por unidad son dos de los tipos de matemáticas más fundamentales y necesarios para los ingenieros y técnicos de relés. Debemos practicar estas técnicas para comprenderlas completamente y sentirnos cómodos con ellas. Este documento técnico proporciona ejemplos teóricos y del mundo real con preguntas y soluciones que se pueden utilizar para adquirir experiencia con componentes simétricos.

INTRODUCCIÓN

El método de componentes simétricos se utiliza para simplificar el análisis de fallas al convertir un sistema desequilibrado trifásico en dos conjuntos de fasores balanceados y un conjunto de fasores monofásicos o componentes simétricos. Estos conjuntos de fasores se denominan componentes de secuencia positiva, negativa y cero. Estos componentes permiten el análisis simple de sistemas de energía en condiciones de falla o desequilibrio. Una vez que el sistema se resuelve en el dominio de componentes simétricos, los resultados se pueden transformar de nuevo al dominio de fase.

El tema de los componentes simétricos es muy amplio y puede llevar un tiempo considerable cubrirlo en profundidad. En esta introducción se incluye un resumen de los puntos importantes, aunque se recomienda encarecidamente que se estudien otras referencias para obtener una explicación más detallada de las matemáticas involucradas. Consulte [1], [2], [3], [4] y [5] para obtener más información sobre componentes simétricos.

A. Conversión entre fase y simétrica

Componente Domains

Cualquier conjunto de **fase** **cuando** se puede convertir en se **simétrico** **componentes**, **antes de a** define como $1\angle 120^\circ$, como sigue:

$$\begin{matrix} I_0 & 1 & 1 & 1 & I_A \\ I_1 & \frac{1}{3} & 1 & 2 & I_B \\ I_2 & & & & I_C \end{matrix} \quad (1)$$

donde I_0 , I_1 , y I_2 son los componentes de secuencia cero, positiva y negativa, respectivamente. Esta ecuación muestra la Transformación simétrica de componentes en términos de corrientes, pero las mismas ecuaciones son válidas también para voltajes.

Esto da como resultado las siguientes ecuaciones:

$$\begin{matrix} Y_0 & \frac{1}{3} & I_A & I_B & I_C \\ I_1 & \frac{1}{3} & I_A & I_B & 2I_C \\ I_2 & \frac{1}{3} & I_A & 2I_B & I_C \end{matrix} \quad (2)$$

Asimismo, un conjunto de componentes simétricos puede ser convertido en cantidades de fase de la siguiente manera:

$$\begin{matrix} I_A & 1 & 1 & 1 & I_0 \\ I_B & 1 & 2 & & I_1 \\ I_C & & 1 & 2 & I_2 \end{matrix} \quad (3)$$

Esto da como resultado las siguientes ecuaciones:

$$\begin{matrix} I_A & I_0 & I_1 & I_2 \\ I_B & I_0 & 2I_1 & I_2 \\ I_C & I_0 & I_1 & 2I_2 \end{matrix} \quad (4)$$

Estas conversiones son válidas para una base de fase A, que se puede utilizar para fase A a tierra, fase B a fase C, fase B a fase C a tierra y tres -fallas de fase. En la Sección V, el Ejemplo 4 muestra cómo cambia la base para otros tipos de fallas irregulares. Estas conversiones también solo son válidas para una rotación de fase del sistema ABC. En la Sección VI, el Ejemplo 5 muestra cómo cambian las ecuaciones para una rotación de fase del sistema ACB.

Se creó una calculadora en Microsoft® Sobresalir® para permitirnos convertir entre los dominios de fase y componente simétrico. Esta calculadora está disponible para descargar con este informe técnico en <http://www.selinc.com/>.

B. Representaciones de transformadores en las redes de secuencia

Para obtener información sobre la formación de las redes de secuencia, así como la representación de los componentes del sistema de energía en las redes de secuencia, consulte [1] y [2].

Los transformadores se representan simplemente como sus impedancias de secuencia positiva y negativa en las redes de secuencia positiva y negativa, respectivamente. Sin embargo, la representación del transformador en la red de secuencia cero puede ser más compleja y depende del tipo de conexión del transformador. La Fig. 1 muestra algunas conexiones comunes de transformadores y las representaciones equivalentes de secuencia cero. Para obtener una lista completa de las conexiones del transformador, consulte [1].

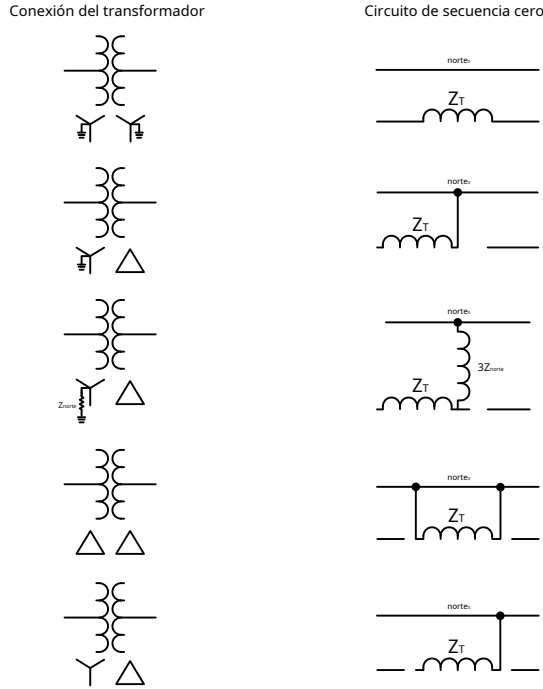


Fig. 1. Circuitos de secuencia cero para varios tipos de transformadores

C. Conexión de las redes de secuencia

Una vez que se definen las redes de secuencia para el sistema, la forma en que se conectan depende del tipo de falla. Las conexiones de red en secuencia para los tipos de fallas de derivación comunes se muestran en el resto de esta subsección. Para obtener las derivaciones completas de estas conexiones de red, así como las conexiones de red en secuencia para fallas en serie, consulte [2]. En las conexiones que siguen, Z_F se define como la impedancia de falla desde cada fase hasta el punto común, y Z_G se define como la impedancia desde el punto común a tierra. El término Z_G solo es significativo cuando Z_F difiere por fase o si la impedancia de línea al punto de falla es diferente entre fases. Las suposiciones típicas son que Z_F es el mismo en todas las fases y las impedancias de línea son iguales y, por lo tanto, se desprecia el término Z_G .

Para una falla trifásica, la red de secuencia positiva se usa con el punto de falla conectado nuevamente al bus neutro, como se muestra en la Fig.2.

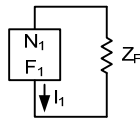


Fig. 2. Secuencia de conexiones de red para una falla trifásica

Para una falla monofásica a tierra, las tres redes están conectadas en serie. Cualquier impedancia de falla se multiplica por 3 y se incluye en esta conexión, como se muestra en la Fig.3.

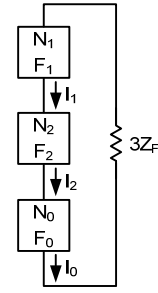


Fig. 3. Secuencia de conexiones de red para una falla monofásica a tierra

Para una falla de fase a fase, las redes de secuencia positiva y negativa se conectan en paralelo, como se muestra en la Fig.4.

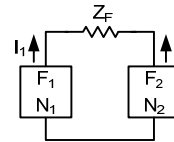


Fig. 4. Secuencia de conexiones de red para una falla de fase a fase

Para una falla de doble línea a tierra, las tres redes están conectadas en paralelo, como se muestra en la Fig.5.

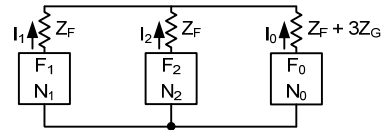


Fig. 5. Secuencia de conexiones de red para una falla de doble línea a tierra

D. El sistema por unidad

El sistema por unidad pone todos los valores de un sistema de energía en una base común para que se puedan comparar fácilmente en todo el sistema. Para usar el sistema por unidad, normalmente comenzamos seleccionando una base de energía trifásica y una base de voltaje de línea a línea. Luego podemos calcular las bases de corriente e impedancia utilizando las bases de potencia y voltaje elegidas como se muestra:

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \cdot V_{base}} \quad (5)$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} \quad (6)$$

Cualquier valor del sistema de energía se puede convertir a por unidad por dividiendo el valor por la base del valor, como se muestra:

$$\text{Cantidad en por unidad} = \frac{\text{Cantidad actual}}{\text{Valor base de la cantidad}} \quad (7)$$

Asimismo, un valor por unidad se puede convertir en una cantidad real en cualquier momento multiplicando el valor por unidad por el valor base de esa cantidad.

Para convertir impedancias de una base a otra, use el siguiente ecuación:

$$Z_{pu}^{nuevo} = Z_{pu}^{viejo} \cdot \frac{S_{base}^{viejo}}{S_{base}^{nuevo}} \cdot \frac{V_{base}^{viejo, 2}}{V_{base}^{nuevo, 2}} \quad (8)$$

Para obtener más información sobre el sistema por unidad, consulte [1].

E. Ejemplos

El resto de este artículo consta de ejemplos teóricos y prácticos que se pueden utilizar para practicar y adquirir experiencia en técnicas de componente simétrico y por unidad. Cada ejemplo consta de preguntas para guiar al lector a través del análisis, así como soluciones completas. En los casos con eventos del mundo real, los registros de eventos de los relés están disponibles para descargar con este documento técnico y el lector debe usar C.A.SELERATOR Asistente analítico® Software SEL-5601 para vista ellos (disponible por gratis descargar a <http://www.selinc.com>).

II. mIxAMPLE 1: SINGLE-PAGHASE VERSUS THREE-PAGHASE FAULT CURRENT

Este ejemplo muestra cómo calcular las corrientes de falla para dos tipos de fallas diferentes en dos ubicaciones diferentes en una distribución sistema. La figura 6 muestra las radial sistema con dos p posible culpa ubicaciones.

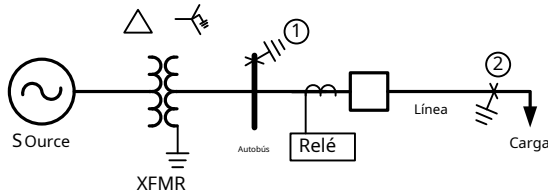


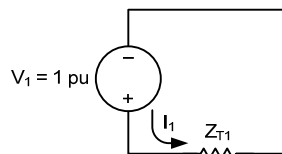
Figura 6. Sistema radial con dos ubicaciones de fallas

II-a En un alimentador de distribución radial, ¿qué tipo de falla esperamos que produzca la mayor corriente de falla?

Esto depende de la ubicación de la falla y el tipo de transformador, como vemos en este ejemplo.

II-b Usando componentes simétricos, resuelva la corriente de falla máxima para una falla trifásica atornillada en la ubicación 1.

Debido a que una falla trifásica está balanceada, no hay corrientes de secuencia negativa o cero y, por lo tanto, solo se usa la red de secuencia positiva. La siguiente figura muestra la red de secuencia positiva con solo la impedancia de secuencia positiva del transformador, porque la falla pasa justo después de los devanados secundarios del transformador.



La corriente de secuencia positiva se puede resolver dividiendo el voltaje de secuencia positiva por el impedancia de secuencia del transformador.

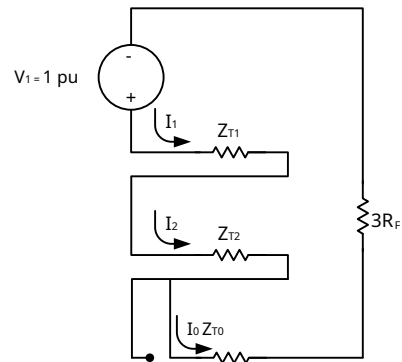
$$I_1 = \frac{V_1}{Z_{T1}}$$

Porque $y_{0A} = I_0 + I_1 + I_2$ y y_{00} y y_{02} son cero, entonces:

$$I_A = I_1 = \frac{1}{Z_{T1}}$$

II-c Utilizando componentes simétricos, resuelva la corriente de falla máxima para una falla de fase a tierra en la ubicación 1.

La siguiente figura muestra las redes de secuencia conectadas en serie para una falla monofásica a tierra.



Las corrientes de secuencia positiva, negativa y de secuencia cero son equivalentes y se pueden resolver dividiendo el voltaje de secuencia positiva por la impedancia equivalente de la red.

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{T0} + 3R_F}$$

Si asumimos que $Z_{T1} = Z_{T2} = Z_{T0}$ y hay cero fallas

resistencia, entonces:

$$I_1 = \frac{1}{3Z_{T1}} \quad I_2 = I_0$$

$$I_A = I_0 + I_1 + I_2 = \frac{1}{Z_{T1}}$$

II-d Suponga un transformador de tipo núcleo con una impedancia de secuencia cero del 85 por ciento de la impedancia de secuencia positiva. Resuelva la corriente de falla para una falla de fase a tierra en la ubicación 1 y compare los resultados con los de una falla trifásica.

Un transformador de tipo núcleo tiene una impedancia de excitación más baja, y la impedancia de secuencia cero puede ser del 85 al 100 por ciento de la impedancia de secuencia positiva [6]. Si asumimos un tipo de núcleo transformador, luego $Z_{T0} = 0,85 \cdot Z_{T1}$.

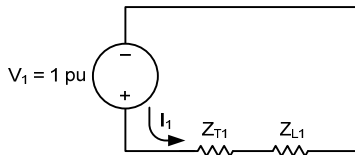
$$I_1 = \frac{V_1}{Z_{T1} + Z_{T2} + 0,85 \cdot Z_{T1} + 2,85 \cdot Z_{T1}} \quad I_2 = I_0$$

$$I_A = I_0 + I_1 + I_2 = \frac{3}{2,85 \cdot Z_{T1}} = \frac{1,05}{Z_{T1}}$$

Suponiendo un transformador de tipo núcleo, una falla de fase a tierra puede producir más corriente de falla que una falla trifásica cuando la falla está en el bus. El informe del evento titulado **Ejemplo 1A.cev** muestra una falla en evolución donde la corriente de falla para la falla de línea a tierra es mayor que la de la falla trifásica. Ver [7] y [8] para un análisis completo de este evento.

II-e Usando componentes simétricos, resuelva la corriente de falla máxima para una falla trifásica en la Ubicación 2.

La red de secuencia para la nueva ubicación de la falla es la misma que para la ubicación de la falla anterior, excepto que ahora tenemos la impedancia de línea incluida. Esto se muestra en la siguiente figura.



La corriente de secuencia positiva se puede resolver de la siguiente manera:

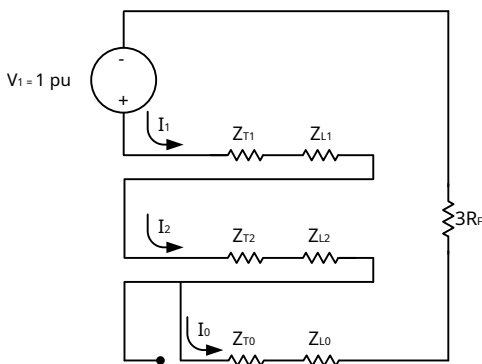
$$I_1 = \frac{V_1}{Z_{T1} + Z_{L1}}$$

Porque $y_{0A} = I_0 + I_1 + I_2$ y y_{00} y y_{02} son cero, entonces:

$$I_A = I_1 = \frac{1}{Z_{T1} + Z_{L1}}$$

II-f Utilizando componentes simétricos, resuelva la corriente de falla máxima para una falla de fase a tierra en la ubicación 2. ¿Es mayor o menor que la corriente de falla para una falla trifásica?

La siguiente figura muestra las redes de secuencia conectadas en serie para una falla monofásica a tierra, con la impedancia de línea incluida debido a la nueva ubicación de la falla.



Las corrientes de secuencia positiva, negativa y de secuencia cero son equivalentes y se pueden resolver dividiendo el voltaje de secuencia positiva por la impedancia equivalente de la red.

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_{T1} + Z_{L1} + Z_{T2} + Z_{L2} + Z_{T0} + Z_{L0} + 3R_f}$$

Suponga que $Z_{T1} = Z_{T2} = Z_{T0}$ y hay cero fallas resistencia. Suponga también que $Z_{L1} = Z_{L2}$ y $Z_{L0} = 3 \cdot Z_{L1}$.

$$I_1 = \frac{1}{3Z_{T1} + 5Z_{L1}} \quad I_2 = I_0 = \frac{3}{3Z_{T1} + 5Z_{L1}} \quad I_A = I_0 + I_1 + I_2 = \frac{1}{Z_{T1} + 1,67 \cdot Z_{L1}}$$

Al comparar los resultados de la falla en la Ubicación 2, podemos concluir que para una falla en el alimentador, la corriente de falla producida por una falla trifásica es mayor que la producida por una falla monofásica a tierra. Esto se debe a que, para una falla en el alimentador, la impedancia de línea de secuencia cero (que generalmente es mayor que la impedancia de línea de secuencia positiva) comienza a dominar y hace que la corriente de falla de línea a tierra sea menor que la de tres -falla de fase. El informe del evento titulado

Ejemplo 1B.cev muestra una falla en evolución donde la corriente de falla para la falla trifásica es mayor que la de la falla de línea a tierra. Ver [7] y [8] para un análisis completo de este evento.

III. mixAMPLE 2: PER-ULIENDRE SSISTEMA Y FAULT CALCULACIONES

Este ejemplo muestra cómo trabajar en el sistema por unidad y calcular las corrientes de falla para fallas en los terminales de alta tensión del transformador elevador que se muestra en la Fig. 7. La El voltaje previo a la falla en el lugar de la falla es de 70 kV_{LL}, y el generador y el transformador no están conectados al resto de Sistema de poder. Las impedancias de la fuente que se muestran son las reactancias subtransitorias (X_D') del generador [9].

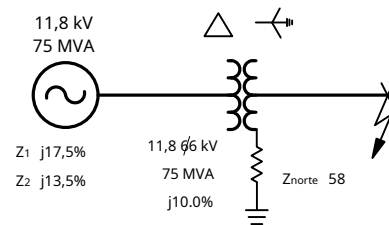


Fig. 7. Diagrama unifilar para fa ult actual cal culaciones

III-a Seleccione las bases de potencia y voltaje para el sistema por unidad y calcule las bases de corriente e impedancia en consecuencia.

Para usar el sistema por unidad, primero elija una base de potencia y una base de voltaje. Elegimos una base de potencia trifásica de 100 MVA y bases de voltaje según lo definido por el transformador:

$$S_{base} = 100 \text{ MVA}$$

$$V_{base_delta} = 11,8 \text{ kV}$$

$$base_wye = 66 \text{ kV}$$

Tenga en cuenta que es posible tener múltiples bases de voltaje.

Comenzamos eligiendo una base de voltaje y luego usamos las relaciones de voltaje de los transformadores para convertir la base de voltaje original en todas las demás partes del sistema. Esto significa que en cada transformador habrá una conversión de base de voltaje.

Luego calculamos las bases de corriente e impedancia usando las bases de potencia y voltaje y (5) y (6). Dependiendo de

base de voltaje que está activa para el área en la que estamos trabajando, calcularemos diferentes bases de corriente e impedancia.

En el lado delta del transformador, usando V_{base_delta} :

$$I_{base_delta} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \cdot V_{base_delta}} = \frac{100 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 11,8 \text{ kV}} = 4,89 \text{ kA}$$

$$Z_{base_delta} = \frac{V_{base_delta}^2}{S_{base}} = \frac{11,8 \text{ kV}^2}{100 \text{ MVA}} = 1,39$$

En el lado de la estrella del transformador, usando V_{base_wye} :

$$I_{base_wye} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \cdot V_{base_wye}} = \frac{100 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 66 \text{ kV}} = 874,77 \text{ A}$$

$$Z_{base_wye} = \frac{V_{base_wye}^2}{S_{base}} = \frac{66 \text{ kV}^2}{100 \text{ MVA}} = 43,56$$

III-b Convierta todas las impedancias del sistema, así como el voltaje previo a la falla, a una base común.

Para convertir impedancias por unidad de una base a otra, use (8). Las impedancias del generador y del transformador se dan por unidad en una base de 75 MVA, 11,8 kV y deben ser convertidos a una base de 100 MVA.

$$Z_{G1} = j0.175 \frac{100 \text{ MVA}}{75 \text{ MVA}} \frac{11,8 \text{ kV}^2}{11,8 \text{ kV}^2} = j0.233 \text{ pu}$$

$$Z_{G2} = j0.135 \frac{100 \text{ MVA}}{75 \text{ MVA}} \frac{11,8 \text{ kV}^2}{11,8 \text{ kV}^2} = j0.180 \text{ pu}$$

$$Z_{T1} = Z_{T2} = Z_{T0} = j0.101 \frac{100 \text{ MVA}}{75 \text{ MVA}} \frac{11,8 \text{ kV}^2}{11,8 \text{ kV}^2} = j0.133 \text{ pu}$$

La impedancia neutra se da en ohmios en el lado en estrella del transformador, por lo que debemos dividirla por el lado en estrella base de impedancia para convertirla a por unidad.

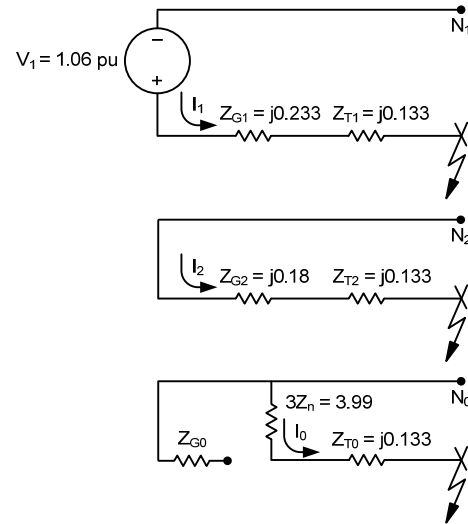
$$Z_{n0} = \frac{58}{43,56} = 1.332 \text{ pu}$$

Convierta el voltaje previo a la falla en la ubicación de la falla a por unidad dividiendo por la base de voltaje del lado estrella.

$$V_{pre} = \frac{70 \text{ kV}}{66 \text{ kV}} = 1,06 \text{ pu}$$

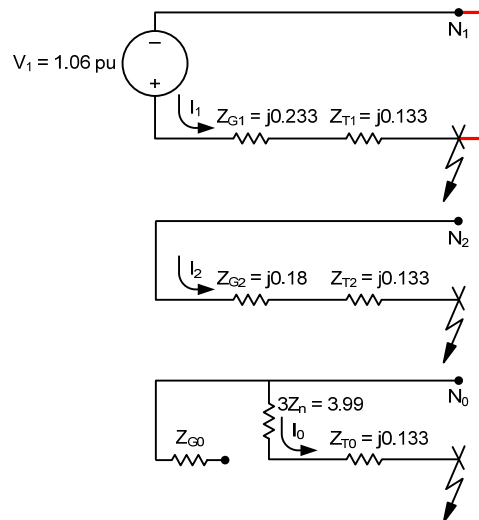
III-c Dibuje las redes de secuencia positiva, negativa y cero para este sistema hasta el punto de falla.

La siguiente figura muestra las redes de secuencia positiva, negativa y cero para el sistema hasta la ubicación de la falla. Las redes de secuencia positiva y negativa son similares, mientras que la red de secuencia cero tiene una interrupción debido a la conexión delta del transformador.



III-d ¿Cuáles son las corrientes máximas de fase de cortocircuito para una falla trifásica?

Una falla trifásica está balanceada y no tiene corriente de secuencia cero o negativa. Por lo tanto, solo se conecta la red de secuencia positiva, como se muestra en la siguiente figura.



La corriente de secuencia positiva se puede resolver dividiendo el voltaje de secuencia positiva por las impedancias en la red de secuencia positiva.

$$I_1 = \frac{1.06}{j0.233 + j0.133} = j2.89 \text{ pu o } 2.89 -90 \text{ pu}$$

$$I_A = I_0 = I_1 = I_2 = 2,89 -90 \text{ pu}$$

Convierta la corriente de la fase A de por unidad a amperios multiplicando por la base de corriente adecuada, I_{base_wye} .

$$I_A = 2,89 \cdot 874,77 = 2528 -90 \text{ A}$$

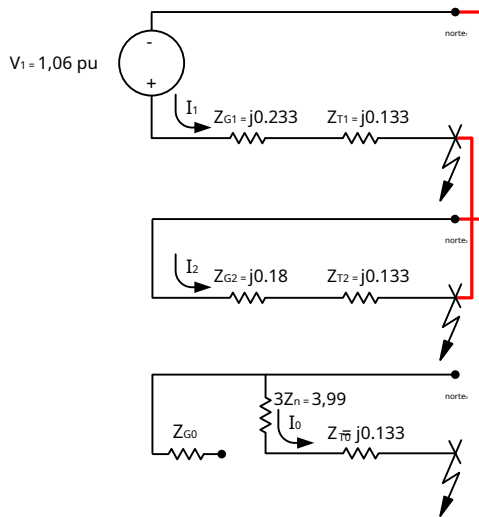
Debido a que una falla trifásica ideal está balanceada, $|I_A| = |I_B| = |I_C|$, y todos están desfasados 120 grados, entonces:

$$I_B = 2528 \angle 150^\circ \text{ A}$$

$$I_C = 2528 \angle 30^\circ \text{ A}$$

III-e ¿Cuáles son las corrientes máximas de fase de cortocircuito para una falla de fase B a fase C?

Para una falla de fase a fase, las redes de secuencia positiva y negativa se conectan en paralelo en el punto de falla, como se muestra en la siguiente figura.



De este diagrama, podemos observar que $y_{01} = -I_2$. Podemos resolver para mí como sigue:

$$I_1 = \frac{1.06}{j0.233 \parallel j0.133 \parallel j0.18 \parallel j0.133} = 1.56 \angle -90^\circ \text{ pu}$$

$$\begin{matrix} I_A & I_0 & I_1 & I_2 & 0 \\ I_B & I_0 & 2I_1 & I_2 & 2.7 \text{ pu} \\ I_C & I_0 & I_1 & 2I_2 & 2.7 \text{ pu} \end{matrix}$$

Convierta las corrientes de fase de por unidad a amperios por multiplicando por la base de corriente apropiada, y_{base_wye} .

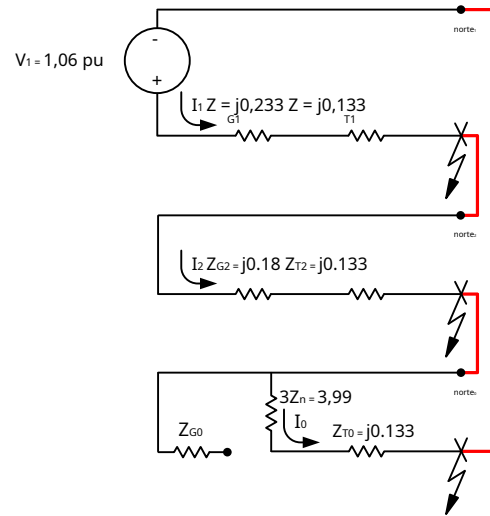
$$I_B = 2.7 \cdot 874.77 = 2361.8 \angle 180^\circ \text{ A}$$

$$I_C = 2.7 \cdot 874.77 = 2361.8 \angle 0^\circ \text{ A}$$

Note que y_{0A} es cero y y_{0B} está 180 grados desfasado con y_{0C} , que es el caso ideal para una falla de fase a fase en las fases B y C.

III-f ¿Cuáles son las corrientes máximas de fase de cortocircuito para una falla de fase A a tierra?

Para una falla monofásica a tierra, las tres redes de secuencia se conectan en serie en el punto de falla, como se muestra en la siguiente figura.



De este diagrama, podemos observar que $y_{01} = I_2 = I_0$. Podemos resolver para mí como sigue:

$$I_1 = \frac{1.06}{j0.233 + j0.133 + j0.18 + j0.133 + j0.133 + 3.99} = 0.2603 \angle -11.5^\circ \text{ pu}$$

$$\begin{matrix} I_A & I_0 & I_1 & I_2 & 0 \\ I_B & I_0 & I_1 & I_2 & 0 \\ I_C & I_0 & I_1 & I_2 & 0 \end{matrix}$$

Convierta la corriente de la fase A de por unidad a amperios por multiplicando por la base de corriente apropiada, y_{base_wye} .

$$I_A = 0.2603 \cdot 874.77 = 227.7 \angle -11.5^\circ \text{ A}$$

IV. mEXAMPLE 3: FAULT CALCULACIONES PARA UN nortEONRADIAL SsISTEMA

Este ejemplo muestra cómo trabajar en el sistema por unidad y calcular las corrientes de falla para un sistema no radial, como se muestra en la Fig. 8. El voltaje previo a la falla en la ubicación de la falla es 1.05 por unidad y la corriente de carga es insignificante. La fuente de impedancias se muestran las reactancias subtransitorias (X''_d) de los generadores [3].

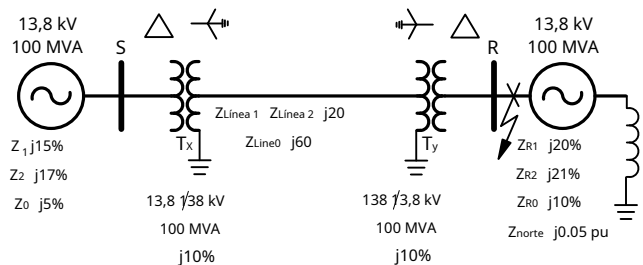


Fig. 8. Diagrama unifilar de un sistema no radial

IV-a Seleccione las bases de potencia y voltaje para el sistema por unidad y calcule las bases de corriente e impedancia en consecuencia.

Para usar el sistema por unidad, primero elija una base de potencia y una base de voltaje. Elegimos una base de potencia trifásica de 100 MVA y bases de voltaje según lo definido por los transformadores:

$$S_{base} = 100 \text{ MVA}$$

$$V_{línea_base} = 138 \text{ kV}$$

$$base_buses = 13,8 \text{ kV}$$

Tenga en cuenta que es posible tener múltiples bases de voltaje.

Comenzamos eligiendo una base de voltaje y luego usamos las relaciones de voltaje de los transformadores para convertir la base de voltaje original en todas las demás partes del sistema. Esto significa que en cada transformador habrá una conversión de base de voltaje.

Luego calculamos las bases de corriente e impedancia usando las bases de potencia y voltaje junto con (5) y (6). Dependiendo de la base de voltaje que esté activa para el área en la que estemos trabajando, calcularemos diferentes corrientes y bases de impedancia.

En el lado de la línea de los transformadores, usando V_{base} :

$$I_{línea \text{ de base}} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \cdot V_{línea \text{ de base}}} = \frac{100 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 138 \text{ kV}} = 418,37 \text{ A}$$

$$Z_{línea \text{ de base}} = \frac{V_{línea \text{ de base}}^2}{S_{base}} = \frac{138 \text{ kV}^2}{100 \text{ MVA}} = 190,44$$

En los autobuses, que están en los lados delta del transformadores, usando V_{buses_base} :

$$I_{se_autobuses} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \cdot V_{base_buses}} = \frac{100 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 13,8 \text{ kV}} = 4183,7 \text{ A}$$

$$Z_{base_buses} = \frac{V_{base_buses}^2}{S_{base}} = \frac{13,8 \text{ kV}^2}{100 \text{ MVA}} = 1,90$$

IV-b Convierta todas las impedancias del sistema, así como el voltaje previo a la falla, a una base común.

Las impedancias del generador y del transformador ya están en las bases correctas. Las únicas impedancias que deben convertirse son las impedancias de línea.

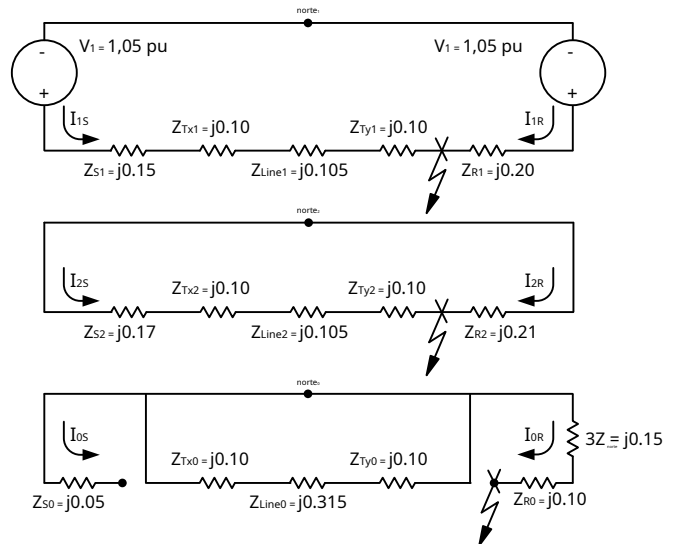
Para convertir las impedancias de línea de ohmios a por unidad, dividirlos por Z_{base} .

$$Z_{Línea 1} = \frac{j20}{190,44} = j0,105 \text{ pu}$$

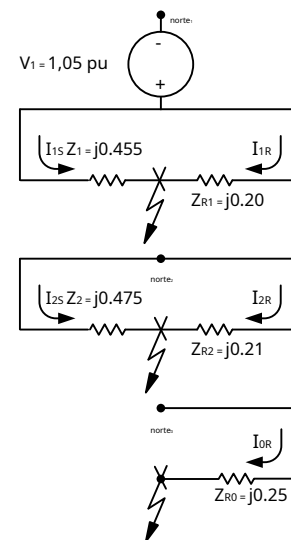
$$Z_{Línea 0} = \frac{j60}{190,44} = j0,315 \text{ pu}$$

IV-c Dibuje las redes de secuencia positiva, negativa y cero para este sistema.

La siguiente figura muestra las redes de secuencia positiva, negativa y cero del sistema. Las redes de secuencia positiva y negativa son similares, mientras que la red de secuencia cero tiene dos interrupciones debido a las conexiones delta de los transformadores.

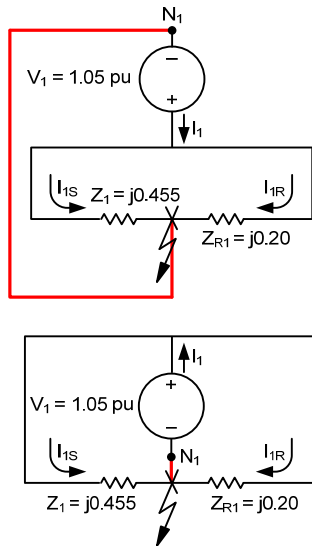


Estas redes se pueden simplificar combinando las impedancias en cada lado del punto de falla, como se muestra en la siguiente figura. La red de secuencia positiva se simplifica aún más al combinar ambas fuentes de voltaje en una fuente equivalente.



IV-d ¿Cuáles son las corrientes máximas de fase de cortocircuito para una falla trifásica?

Una falla trifásica está balanceada y no tiene corriente de secuencia cero o negativa. Por lo tanto, solo se conecta la red de secuencia positiva, como se muestra en la siguiente figura.



La secuencia positiva corriente a través del culpa puede b mi

resuelto de la siguiente manera:

$$I_1 = \frac{1.05}{j0.455 + j0.20} = 7.557 \angle -90 \text{ pu}$$

Para una falla trifásica, I_0 y I_2 son ambos 0.

Convierta de la secuencia al dominio de fase de la siguiente manera:

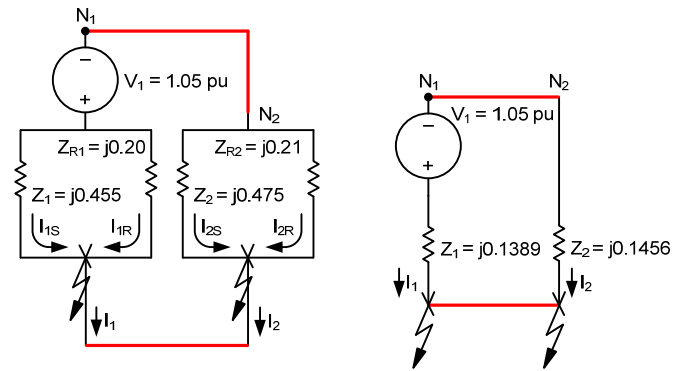
$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 & I_1 & I_2 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 7.557 \angle -90 \text{ pu} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Convierta las corrientes de fase de por unidad a amperios por multiplicando por y_{obuses_base} .

$$\begin{aligned} I_A &= 7.557 \angle -90 \cdot 4183.7 = 31.62 \angle -90 \text{ kA} \\ I_B &= 7.557 \angle 150 \cdot 4183.7 = 31.62 \angle 150 \text{ kA} \\ I_C &= 7.557 \angle 30 \cdot 4183.7 = 31.62 \angle 30 \text{ kA} \end{aligned}$$

He ¿Cuáles son las corrientes máximas de fase de cortocircuito para una falla de fase B a fase C?

Para una falla de fase a fase, las redes de secuencia positiva y negativa se conectan en paralelo en el punto de falla, como se muestra en la siguiente figura. En el lado derecho de la figura, las redes están representadas por sus impedancias equivalentes para simplificar.



De este diagrama, podemos observar que $y_{01} = -I_2$ y $y_{00} = 0$.

Podemos resolver por mi como sigue:

$$y_{01} = \frac{1.05}{j0.1389 + j0.1456} = 3.69 \angle -90 \text{ pu}$$

Convierta del dominio de secuencia al dominio de fase como sigue:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 & I_1 & I_2 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 3.69 \angle -90 \text{ pu} \\ 0 \end{bmatrix}$$

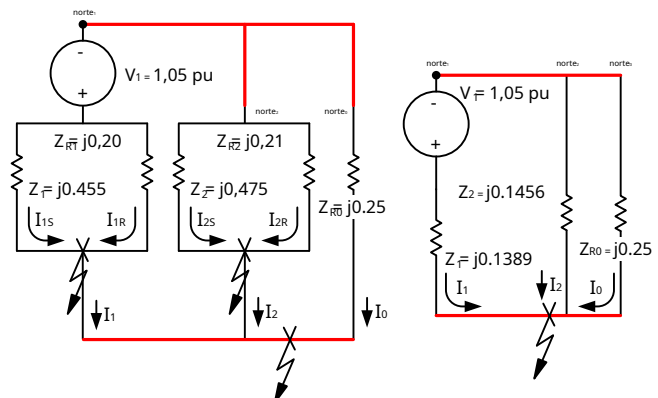
Convertir las corrientes de fase de por unidad a amperios por multiplicando por y_{obuses_base} .

$$\begin{aligned} I_A &= 0 \\ I_B &= 3.69 \angle 180 \cdot 4183.7 = 26.73 \angle 180 \text{ kA} \\ I_C &= 3.69 \angle 0 \cdot 4183.7 = 26.73 \angle 0 \text{ kA} \end{aligned}$$

Note que y_{0A} es cero y y_{0B} está 180 grados desfasado con y_{0C} , que se espera para una falla de fase a fase en las fases B y C.

IV-f ¿Cuáles son las corrientes máximas de fase de cortocircuito para una falla de fase B a fase C a tierra?

Para una falla de doble línea a tierra, las tres redes de secuencia se conectan en paralelo en el punto de falla, como se muestra en la siguiente figura, asumiendo una resistencia de falla cero. En el lado derecho de la figura, las redes están representadas por sus impedancias equivalentes para simplificar.



Del diagrama, podemos resolver para I_1 como sigue:

$$I_1 = \frac{1.05}{j0.1389 + j0.1456 + j0.25} = 4.547 \angle -90^\circ \text{ pu}$$

Podemos resolver las corrientes de secuencia negativa y cero, utilizando un divisor de corriente y la corriente de secuencia positiva.

$$I_2 = I_1 \frac{Z_{R0}}{Z_2 + Z_{R0}} = 4.547 \angle -90^\circ \frac{j0.25}{j0.1456 + j0.25} = 2.87 \angle -90^\circ \text{ pu}$$

$$I_0 = I_1 \frac{Z_2}{Z_2 + Z_{R0}} = 4.547 \angle -90^\circ \frac{j0.1456}{j0.1456 + j0.25} = 1.67 \angle -90^\circ \text{ pu}$$

Convierta del dominio de secuencia al dominio de fase como sigue:

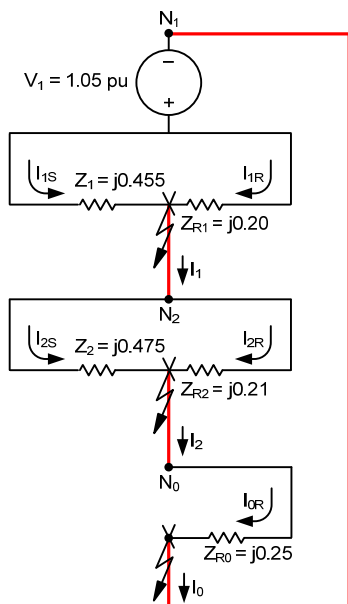
$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 & I_1 & I_2 \\ I_0 & a^2 I_1 & a I_2 \\ I_0 & a I_1 & a^2 I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 4.547 & 2.87 \\ 6.90 \angle 158.66^\circ & 0 & 0 \\ 6.90 \angle 21.33^\circ & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ pu}$$

Convierta las corrientes de fase de por unidad a amperios por multiplicando por $I_{\text{bases_base}}$.

$$\begin{aligned} I_A &= 0 \\ I_B &= 6.90 \angle 158.66^\circ \cdot 4183.7 = 28.85 \angle 158.66^\circ \text{ kA} \\ I_C &= 6.90 \angle 21.33^\circ \cdot 4183.7 = 28.85 \angle 21.33^\circ \text{ kA} \end{aligned}$$

IV-g ¿Cuáles son las corrientes máximas de fase de cortocircuito para una falla de fase A a tierra?

Para una falla monofásica a tierra, las tres redes de secuencia se conectan en serie en el punto de falla, como se muestra en la siguiente figura.



En este diagrama, podemos ver que $I_{01} = I_2 = I_0$. Podemos resolver para I_1 como sigue:

$$I_1 = \frac{1.05}{j0.455 + j0.20 + j0.475 + j0.21 + j0.25} = 1.964 \angle -90^\circ \text{ pu}$$

Convierta del dominio de secuencia al dominio de fase como sigue:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 & I_1 & I_2 \\ I_0 & a^2 I_1 & a I_2 \\ I_0 & a I_1 & a^2 I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1.964 & 1.964 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ pu}$$

Convierta la fase de corrientes from por unidad a amperios por multiplicando por $I_{\text{bases_base}}$.

$$\begin{aligned} I_A &= 1.964 \cdot 4183.7 = 8.21 \angle -90^\circ \text{ kA} \\ I_B &= 0 \\ I_C &= 0 \end{aligned}$$

IV-h Para una falla de fase A a tierra, encuentre el máximo Contribuciones de corriente de secuencia positiva, negativa y cero de la Fuente S y la Fuente R.

Para encontrar las contribuciones de la Fuente S y la Fuente R, Realice un divisor de corriente utilizando la secuencia de corrientes.

$$I_{1S} = I_1 \frac{j0.20}{j0.20 + j0.455} = 0.5997 \angle -90^\circ \text{ pu}$$

$$I_{1R} = I_1 \frac{j0.455}{j0.20 + j0.455} = 1.364 \angle -90^\circ \text{ pu}$$

$$I_{2S} = I_2 \frac{j0.21}{j0.21 + j0.475} = 0.602 \angle -90^\circ \text{ pu}$$

$$I_{2R} = I_2 \frac{j0.475}{j0.21 + j0.475} = 1.362 \angle -90^\circ \text{ pu}$$

$$\begin{aligned} I_{0S} &= 0 \\ I_{0R} &= I_0 = 1.964 \angle -90^\circ \text{ pu} \end{aligned}$$

IV-i Encuentre los voltajes de fase en la ubicación de la falla durante una falla de fase A a tierra.

Primero, encuentre los voltajes de secuencia en la ubicación de la falla escribiendo ecuaciones de caída de voltaje alrededor de cada lazo, como se muestra en las siguientes ecuaciones y figura.

$$V_{F1} = V_1 - I_1 Z_1 \parallel Z_{R1}$$

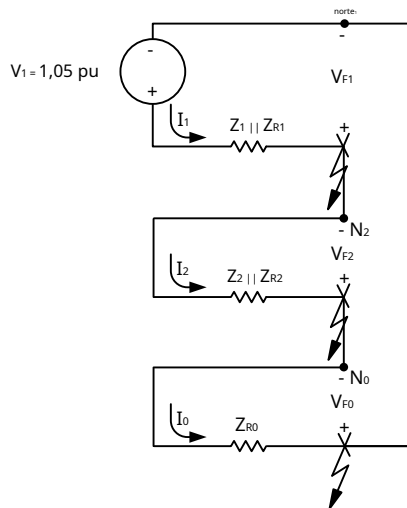
$$V_{F2} = 0 - I_2 Z_2 \parallel Z_{R2}$$

$$V_{F0} = 0 - I_0 Z_{R0}$$

$$V_{F1} = 1.05 - 1.964 \angle -90^\circ \cdot j0.1389 = 0.777 \text{ pu } V_{F2}$$

$$0 - 1.964 \angle -90^\circ \cdot j0.1456 = 0.286 \text{ pu } V_{F0} = 0$$

$$1.964 \angle -90^\circ \cdot j0.25 = 0.491 \text{ pu}$$



Convertir f del dominio de secuencia al dominio de fase a s sigue:

$$\begin{matrix} V_{FA} & V_{F0} & V_{F1} & V_{F2} & 0 \\ V_{FC} & V_{F0} & V_{F1} & V_{F2} & 1,178 \angle -128,66^\circ \text{ pu} \\ V_{FB} & V_{F0} & V_{F1} & V_{F2} & 1,178 \angle 128,66^\circ \text{ pu} \end{matrix}$$

V. EXAMPLE 4: CCOLGANDO BASES

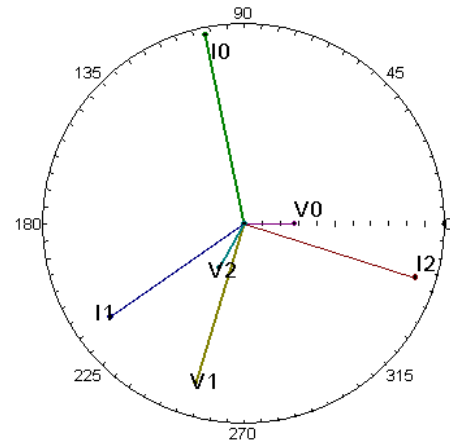
Este ejemplo muestra la importancia de utilizar la base correcta al calcular componentes simétricos. Los ejemplos típicos de libros de texto usan una base de fase A, que siempre asume una fase A a tierra, una fase B a fase C, una fase B a una fase C a tierra o una trifásica. culpa. Para otros tipos de fallas, la base deberá cambiarse en consecuencia para calcular los componentes simétricos correctos.

Este ejemplo muestra una falla de fase B a tierra que ocurrió en una línea de transmisión. Abra el registro del evento titulado **Ejemplo 4.cev**, y ver los componentes simétricos durante el fallo.

¿Son las corrientes de componentes simétricas las que esperamos ver para una falla de fase a tierra?

Debido a que las redes de secuencia están conectadas en serie para una falla de fase a tierra, esperamos ver $I_1 = I_2 = I_0$. Para este evento, los componentes simétricos están cada uno 120 grados hacia afuera

de fase entre sí, como se muestra en la siguiente figura. Esto no es correcto.



Vb Derive los componentes simétricos para una falla de fase A a tierra.

Los libros de texto típicos, así como la introducción a este documento, utilizan (1) para derivar componentes simétricos a partir de cantidades de fase. Este método asume una rotación de fase del sistema ABC, así como una referencia o base de fase A. Una base de fase A significa que la fase A está en la posición superior de la matriz de corriente de fase seguida de la fase B y la fase C para un sistema con una rotación de fase ABC. Una base de fase A solo es válida para fallas de fase A a tierra, fase B a fase C, fase B a fase C a tierra o fallas trifásicas.

Debido a que una falla de fase A a tierra asume que $I_B = I_C = 0$, luego:

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{1}{3} I_A$$

Esto da como resultado que las corrientes de secuencia cero, positiva y negativa sean iguales y estén en fase entre sí, que es lo que esperamos. La ecuación (1) funciona bien cuando la falla es una falla de fase A a tierra.

Vc Derive los componentes simétricos para una falla de fase B a tierra.

Utilice (1) para calcular componentes simétricos para una falla de fase B a tierra.

Debido a que una falla de fase B a tierra asume que $I_A = I_C = 0$, luego:

$$\begin{matrix} I_0 & \frac{1}{3} I_A \\ I_1 & \frac{1}{3} I_B \\ I_2 & \frac{1}{3} I_C \end{matrix}$$

El resultado inesperado es que I_0 , I_1 , y I_2 están desfasados 120 grados en lugar de estar en fase entre sí. Esto coincide los fasores en la figura de la respuesta a la Pregunta Va y es incorrecta, lo que prueba que (1) no funciona para una falla de fase B a tierra.

Enfermedad venérea

¿Cómo obtenemos los valores correctos de componentes simétricos para una falla de fase B a tierra?

Para calcular correctamente los componentes simétricos para algo diferente a las fallas típicas de la base de la fase A, debemos cambiar la base en (1). Esto se hace rotando los términos en la matriz de corriente de fase de modo que la posición superior sea la referencia, el término medio se retrasa de la referencia en 120 grados y el término inferior se adelanta a la referencia en 120 grados.

Para una base de fase B en un sistema con una rotación de fase del sistema ABC, la nueva ecuación es la siguiente:

$$\begin{matrix} I_0 & 1 & 1 & 1 & I_B \\ I_1 & \frac{1}{3} & 1 & & I_C \\ I_2 & & 1 & 2 & I_A \end{matrix}$$

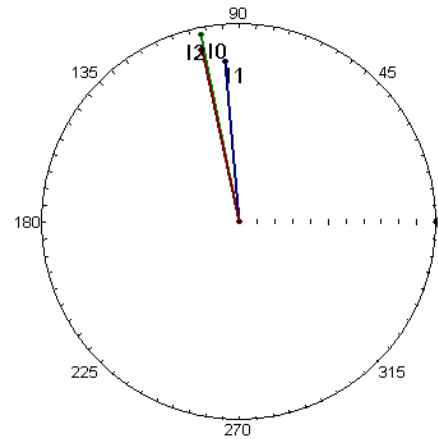
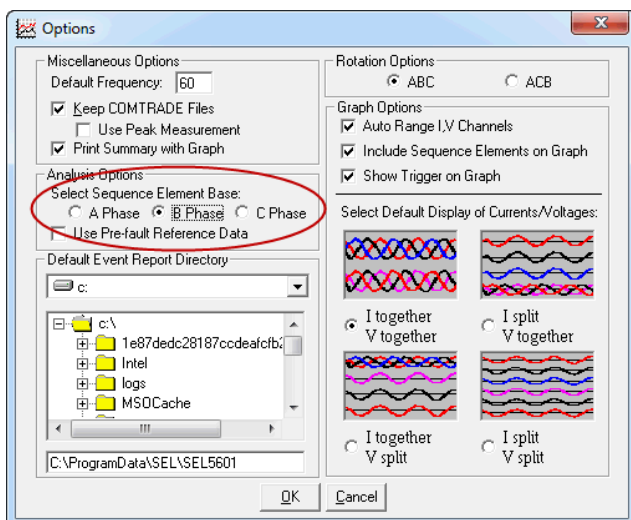
Usando esta nueva transformación Iecuación y asumiendo que $I_0 = 0$ para una fase B a tierra culpa, obtenemos:

$$I_0 \quad I_1 \quad I_2 \quad I \quad \frac{1}{3} y_0$$

Note que y_0 , I_1 , y y_2 están todos en fase entre sí, que es lo que esperamos ver para una falla de fase a tierra.

Ve ¿Por qué los componentes simétricos en C.A.SELERATOR ¿El Asistente analítico no calcula correctamente?

El espectador de eventos necesita saber qué base usar al calcular componentes simétricos. Si no se selecciona la base correcta, los componentes simétricos se calcularán incorrectamente, como demostramos en este ejemplo. Las siguientes figuras muestran que al seleccionar **Fase B** como base en C.A.SELERATOR Analytic Assistant hará que los fasores de secuencia se alineen entre sí.



Al ver componentes simétricos en C.A.SELERATOR Asistente analítico, es muy importante seleccionar siempre la base correcta. Para una falla monofásica a tierra, la base correcta es la fase con falla. Para una falla de fase a fase o de doble línea a tierra, la base correcta es la fase sin falla. Para una falla trifásica, la selección de la base no importa.

VI. mIXAMPLE 5: PHASE ROTACION

Este ejemplo muestra la importancia de la rotación de fase al calcular cantidades de secuencia. El evento titulado **Ejemplo 5.cev** es una condición de carga simulada en un sistema de protección SEL-351S. La ecuación de disparo en el relé es:

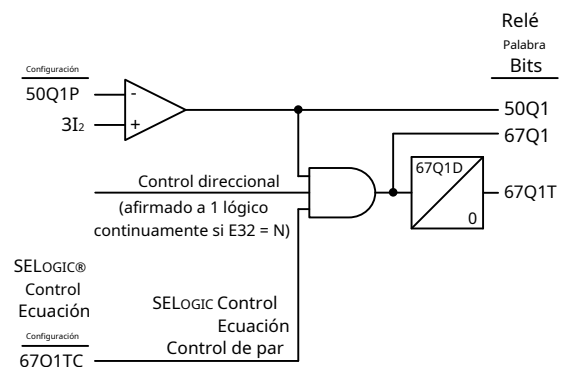
$$TR = 51P1T + 51G1T + 67P1 + 50Q1 + OC$$

donde 50Q1 es un elemento de sobrecorriente instantánea de secuencia negativa.

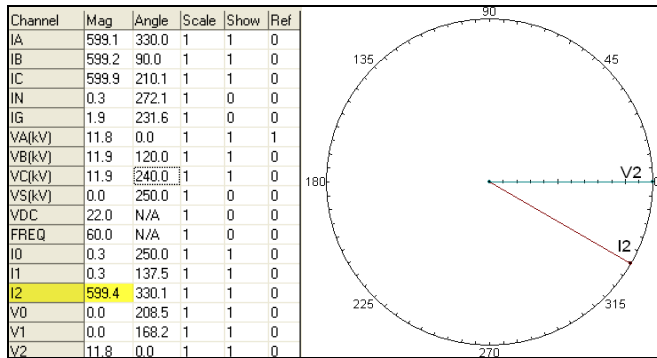
VI-a ¿Cuál es el ajuste de activación para 50Q1 en el relé?

Según la corriente de secuencia negativa observada en el evento, ¿debería haberse disparado el relé?

De la configuración del relé, podemos ver que $50Q1P = 3$ A secundario. La siguiente figura es del Manual de instrucciones del SEL-351S y muestra que el elemento 50Q1 afirma cuando $3 \cdot I_2$ llega a ser mayor que el ajuste 50Q1P.



Los fasores en el evento muestran que y_{02} es de aproximadamente 600 A primario, como se muestra en la siguiente figura.



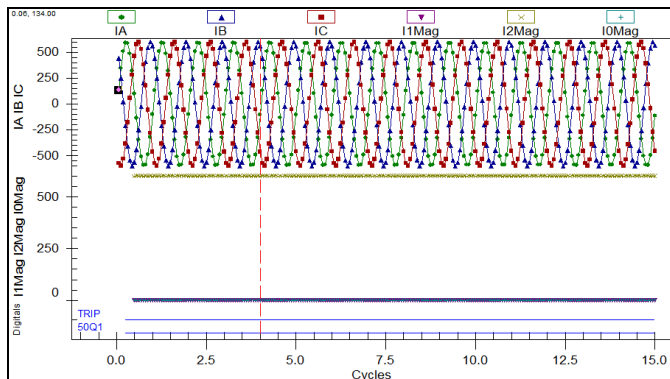
Con una relación de transformador de corriente (CT) de 120, el valor medido $3 \cdot Y_{02}$ proviene a 15 A secundario.

$$3I_2 = 3 \cdot 599.4 = 1798 \text{ A primario}$$

$$\frac{1798 \text{ A primario}}{120} = 15 \text{ A secundario}$$

Esto es mayor que el valor de activación de 3 A secundario, por lo que parece que el relé debería haberse disparado por esta condición.

El siguiente informe de eventos muestra que aunque la magnitud de la corriente de secuencia negativa está significativamente por encima de la activación, el elemento 50Q1 no se afirmó y el relé no emitió un disparo.



VI-b Usando las corrientes de fase del evento, calcule la corriente de secuencia negativa I_2 .

Para invertir corrientes de fase en componentes simétricos, utilizar (1). Utilizando las corrientes de fase de la figura anterior, Calcule el componente de secuencia negativa.

$$I_2 = \frac{1}{3} (I_A + 2I_B + I_C)$$

$$I_2 = \frac{1}{3} (599.1 + 2 \cdot 599.2 + 599.9) = 599.4 - 30 \text{ A}$$

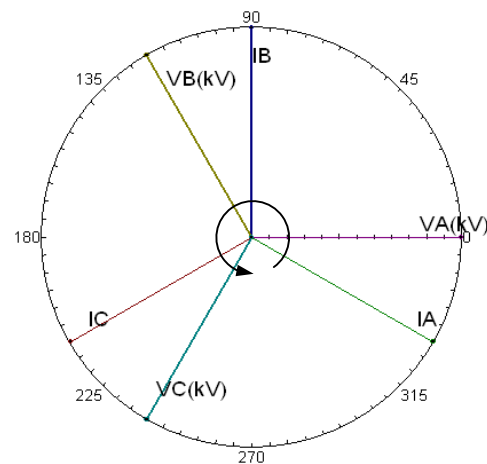
Esto coincide con la corriente de secuencia negativa que se muestra en la segunda figura de la respuesta a la Pregunta VI-a.

VI-c ¿Es normal ver tanta corriente de secuencia negativa durante condiciones impecables?

No. Una gran cantidad de corriente o voltaje de secuencia negativa que aparece en la medición de carga normal junto con una cantidad muy pequeña de corriente o voltaje de secuencia positiva es motivo de sospecha.

VI-d ¿Cuál es la rotación de fase del sistema? Haz esto coincidir con el ajuste de rotación de fase en el relé.

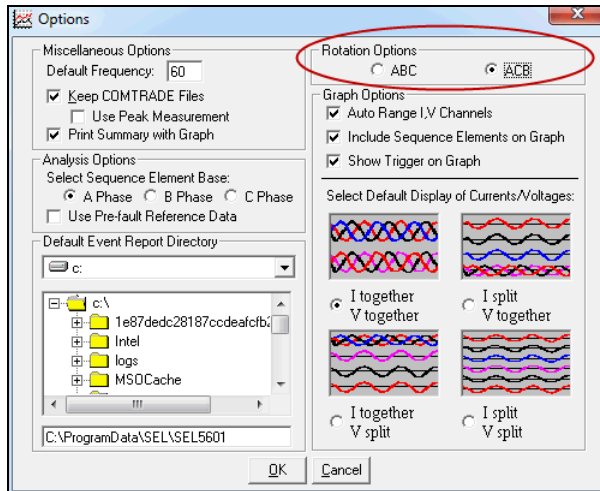
Una gran cantidad de corriente de secuencia negativa con una pequeña cantidad de corriente de secuencia positiva observada durante condiciones normales es normalmente un problema de rotación de fase del sistema. La siguiente figura muestra los fasores durante el evento. A medida que los fasores giran en sentido contrario a las agujas del reloj, el orden en el que pasan por un punto de referencia es la fase A, luego la fase C y luego la fase B. Esto significa que el sistema tiene una rotación de fase ACB.



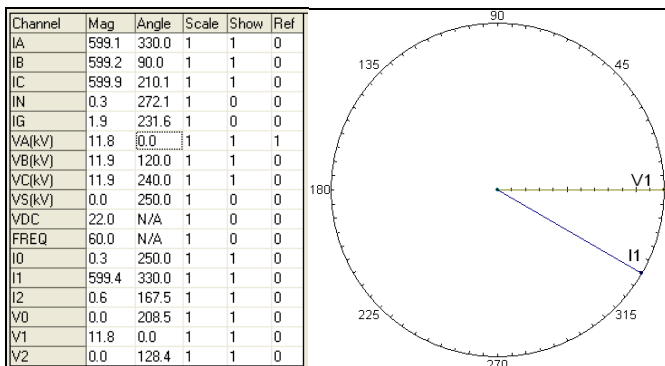
La configuración en el relé también muestra que la configuración global PHROT está establecida en ACB, que es correcta y coincide con los fasores del evento.

VI-e ¿Por qué es C.A.SELERATOR Asistente analítico calculando Cantidades altas de secuencia negativa?

Al ver eventos en C.A.SELERATOR Asistente analítico, los componentes simétricos de los voltajes y corrientes que se muestran se calculan en función de las cantidades de fase. Debido a esto, debemos decirle al software la rotación de fase del sistema, lo cual se puede hacer bajo el **Opciones** menú, como se muestra en la siguiente figura.



La siguiente figura muestra los componentes simétricos después de cambiar la rotación de fase en C.A.SELERATOR Asistente analítico de la ACB. Observe que la corriente de secuencia negativa ahora es muy pequeña y la corriente de secuencia positiva es muy alta. Esto es lo opuesto a los resultados que vimos cuando asumimos una rotación de fase del sistema ABC.



VI-f Calcule la corriente de secuencia negativa a mano utilizando la rotación de fase ACB.

Para la rotación de fase ACB, (1) debe ser modificado por poniendo las corrientes en la matriz de fase en orden ACB, como sigue:

$$\begin{matrix} I_0 & 1 & 1 & 1 & I_A \\ I_1 & \frac{1}{3} & 1 & 2 & I_C \\ I_2 & 1 & 2 & & I_B \end{matrix}$$

$$I_2 = \frac{1}{3} \begin{matrix} 599,1 & 330 & 2 & 599,9 & 210,1 & 599,2 & 90 \\ 1,36 & 147 & A \end{matrix}$$

Tenga en cuenta que esto no coincide exactamente con los resultados de I_2 en la segunda figura en la respuesta a la Pregunta VI-e. Esto es debido a un error de redondeo que entra en juego porque y_{02} tiene una magnitud tan pequeña (0,6 A primario). La precisión de la fase corrientes A , I_B , y y_{02} que estamos usando en nuestros cálculos manuales se limita al número de dígitos significativos mostrados por el software. La diferencia entre los resultados calculados a mano y la C.A.SELERATOR Los resultados del Asistente analítico se deben al hecho de que C.A.SELERATOR Analytic Assistant en realidad está usando dígitos más significativos para las corrientes de fase. Lo importante a tener en cuenta es que cuando se utiliza la rotación de fase correcta, el método tradicional coincide con C.A.SELERATOR Asistente analítico y da como resultado valores extremadamente pequeños (y despreciables) de corriente de secuencia negativa.

VI-g ¿Por qué no se disparó el relé?

El relé no se disparó porque había muy poca corriente de secuencia negativa presente. El relé estaba calculando la secuencia negativa correctamente porque sabía que la rotación de fase era ACB (ajuste PHROT = ACB). Sin embargo, al Asistente analítico se le debe indicar la rotación de fase correcta para calcular correctamente los componentes simétricos.

VII. mIxAMPLE 6: FAULT LOCATOR

Este ejemplo muestra cómo usar componentes simétricos para determinar la ubicación de una falla usando informes de eventos de dos extremos de una línea de transmisión. Los relés de ambos extremos detectaron una falla interna de línea única a tierra en una línea de transmisión, como se muestra en la Fig. 9. Los informes de eventos de cada relé se proporcionan en los registros de eventos titulados **Ejemplo 6 - Side S.eve** y **Ejemplo 6 - Side R.eve**.

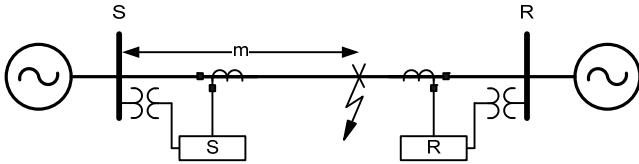
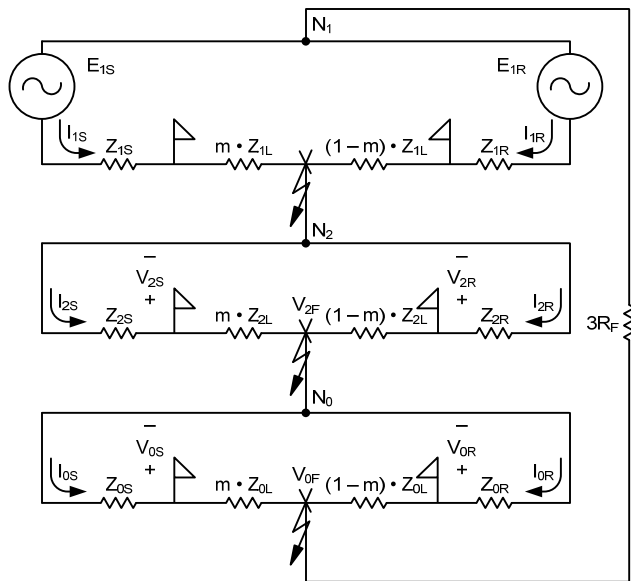


Fig. 9. Ubicación de la falla en un sistema de energía de dos fuentes

VII-a Dibuje las redes de secuencia para esta falla.

Debido a que la falla es una falla de línea a tierra, las redes de secuencia se conectan en serie en el punto de falla, como se muestra en la siguiente figura. La distancia a la falla en por unidad de longitud total de la línea es *metro*. Las banderas marcan las posiciones de los relevos.



VII-b Usando las redes de secuencia, escriba una ecuación para resolver la ubicación de la falla *metro*.

Cualquiera de las redes de secuencia se puede utilizar para resolver la ubicación de la falla, pero se prefiere la red de secuencia negativa porque no se ve afectada por el flujo de carga o el acoplamiento mutuo de secuencia cero.

Para resolver *metro*, escriba dos ecuaciones de caída de voltaje en el V_{2F} ubicación de la falla: una entre el nodo V_{2F} y el relé S y uno entre el nodo V_{2F} y el relé R. Estas ecuaciones son como sigue:

$$V_{2S} - I_{2S} \cdot m \cdot Z_{2L} = V_{2F}$$

$$V_{2R} - I_{2R} \cdot (1 - \text{metro}) \cdot Z_{2L} = V_{2F}$$

Porque nosotros tener informes de eventos de ambos extremos de la línea, las tensiones y corrientes de secuencia negativa, así como las

impedancia de línea de secuencia negativa (de los ajustes del relé) son conocido. Esto da como resultado dos ecuaciones y dos incógnitas (V_{2F} y *metro*).

Porque ambas ecuaciones son iguales a V_{2F} , podemos eliminar esta variable desconocida estableciendo las ecuaciones iguales a cada otro.

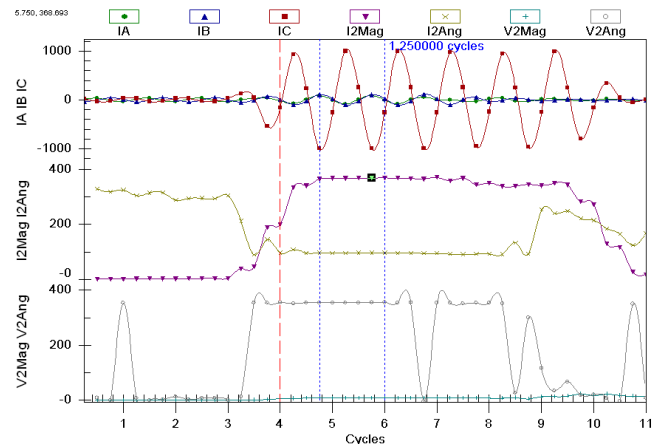
$$V_{2S} - I_{2S} \cdot m \cdot Z_{2L} = V_{2R} - I_{2R} \cdot (1 - \text{metro}) \cdot Z_{2L}$$

Luego reorganiza para resolver *metro*.

$$\frac{V_{2S} - V_{2R}}{Z_{2L}} = \frac{I_{2S} \cdot m \cdot Z_{2L} - I_{2R} \cdot (1 - \text{metro}) \cdot Z_{2L}}{Z_{2L}}$$

VII-c Utilice los informes de eventos para obtener voltaje y corriente valores durante la falla, así como la impedancia de línea de secuencia negativa. Resolver *metro*.

V_{2S} y yo_{2S} (magnitud y ángulo) se puede encontrar a partir de la **Ejemplo 6 - Side S.eve** evento durante el tiempo de la falla. Eso Es mejor seleccionar valores que sean estables e invariables. En este caso, los datos estables se encuentran entre 4,75 y 6,75 ciclos, como se muestra entre las dos líneas verticales discontinuas de color azul en la siguiente figura.



Channel	Mag	Angle	Scale	Show	Ref
IPOL	0.0	156.4	1	0	0
IR	841.5	94.7	1	0	0
IA	86.4	296.7	1	1	0
IB	107.9	280.7	1	1	0
IC	1030.8	97.1	1	1	0
VA	92.1	54.9	1	1	0
VB	92.1	289.5	1	1	0
VC	74.8	171.1	1	1	0
I0	280.8	94.7	1	0	0
I1	381.7	99.1	1	1	0
I2	368.7	96.9	1	1	0
V0	3.3	0.0	1	1	1
V1	86.3	171.9	1	1	0
V2	8.2	355.6	1	1	0

Debido a que se trata de una falla de fase C a tierra, debemos seleccionar valores en una base de fase C.

De este evento, reunimos lo siguiente:

$$I_{2S} = 368,7 \text{ 96,9 AV}_{2S}$$

$$8.2 \text{ 355,6 kV}$$

V_{2R} y y_{02R} (magnitud y ángulo) se puede encontrar de manera similar a partir de la **Ejemplo 6 - Side R**. eve evento durante el tiempo de la culpa.

Channel	Mag	Angle	Scale	Show	Ref
IPOL	0.0	262.4	1	0	0
IR	2667.2	95.1	1	0	0
IA	121.7	133.5	1	1	0
IB	119.6	84.8	1	1	0
IC	2438.2	93.7	1	1	0
VA	89.9	56.7	1	1	0
VB	89.1	291.6	1	1	0
VC	48.5	170.9	1	1	0
IO	883.5	95.0	1	1	0
I1	749.8	92.4	1	1	0
I2	805.3	93.5	1	1	0
V0	11.4	0.0	1	1	1
V1	75.8	173.5	1	1	0
V2	16.0	356.5	1	1	0

De este evento, reunimos lo siguiente:

$$I_{2R} \quad 805,3 \quad 93,5 \quad AV_{2R}$$

$$16,0 \quad 356,5 \quad kV$$

A partir de la configuración del relé del informe de eventos, podemos encontrar que $R1 = R2 = 16.77$ y $X1 = X2 = 65.21$ (tenga en cuenta que si estas configuraciones están en ohmios secundarios, deben convertirse a ohmios primarios). Conversión de la forma rectangular de $16.77 + j65.21$ a la forma polar, obtenemos lo siguiente:

$$Z_{2L} \quad 67,33 \quad 75,58$$

Luego podemos conectar estos datos en la siguiente ecuación para resolver la ubicación de la falla *metro*.

$$\frac{V_{2S}}{Z_{2L} I_{2S}} = \frac{I_{2R}}{I_{2R}} \cdot \frac{Z_{2L}}{I_{2R}}$$

$$\frac{8200 \quad 355,6 \quad 16000 \quad 356,5 \quad 805,3 \quad 93,5 \quad \cdot \quad 67,33 \quad 75,58}{67,33 \quad 75,58 \quad 368,7 \quad 96,9 \quad 805,3 \quad 93,5}$$

$$0,78 \text{ pu}$$

Desde la configuración de LL en el relé, vemos que la longitud de la línea es de 82 millas. $0,78 \cdot 82$ millas nos da una ubicación de falla de 63.96 millas desde el lado S. Ahora que la ubicación de la falla *metro* Si se conoce, es posible utilizar redes de la misma secuencia para resolver la resistencia de falla, si se desea. La figura en la respuesta a la Pregunta VII-a ahora tendrá todas las impedancias conocidas, con la excepción de la falla.

resistencia, $3R_F$. Para obtener más información sobre los algoritmos de localización de fallas y los componentes simétricos, consulte [10], [11] y [12].

VIII. mEXAMPLE 7: TRANSFORMER LINE-TO-GRAMORONDA FAULT

Este ejemplo muestra cómo derivar el cambio de fase, los componentes simétricos y las corrientes de falla a través de un transformador delta-estrella. El informe del evento titulado **Ejemplo 7.cev** se generó después de que se disparara un relé diferencial de corriente que protegía un transformador Dy1, como se muestra en la Fig. 10. Aunque el funcionamiento incorrecto del relé no es el foco de este ejercicio, fue causado por ajustes incorrectos de compensación de corriente de devanado en el relé.

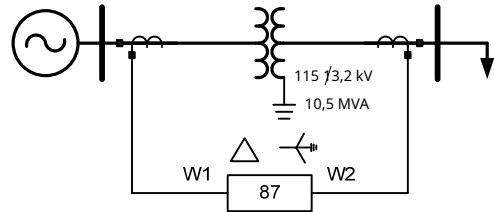
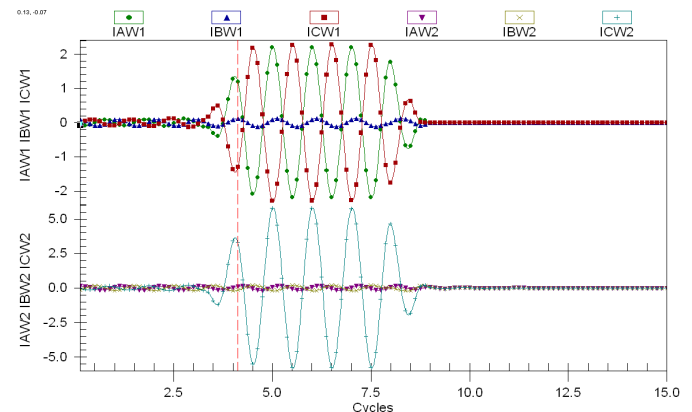


Fig. 10. Relé diferencial de corriente de transformador que protege un transformador Dy1

VIII-a ¿Qué tipo de avería es esta? Suponiendo un sistema radial, ¿La falla es interna o externa a la zona de protección?

Es una falla de fase C a tierra en el lado en estrella del transformador. La falla es externa porque ambos CT de relé ven corriente de falla. La siguiente figura muestra la forma de onda para una falla externa de fase C a tierra.



VIII-b ¿Esperamos que las corrientes previas a la falla en el lado delta ¿Liderar o retrasar las corrientes en el lado de la estrella?

El ejemplo indica que es un transformador Dy1. Este estándar significa que el lado delta conduce al lado de la estrella en $(1 \cdot 30) = 30$ grados para los fasores balanceados antes de la falla.

VIII-c El transformador está conectado al sistema como se muestra en la Fig. 11. ¿Cambia esto la relación de avance / retraso actual que esperamos ver a través del transformador? ¿Si es así, cómo?

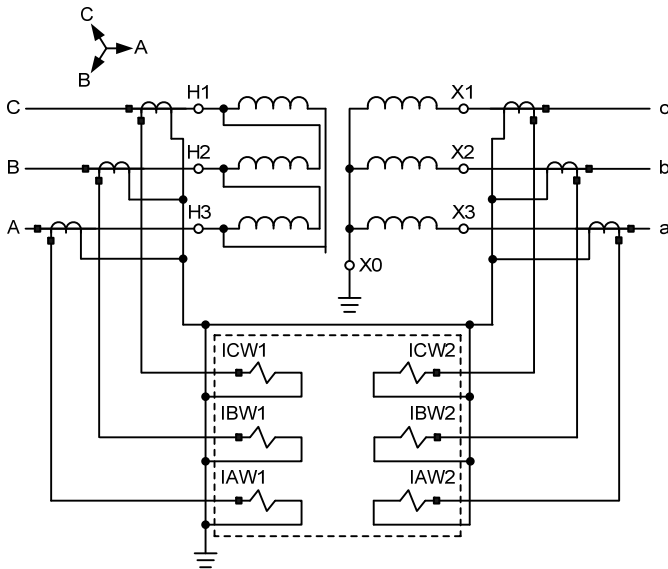


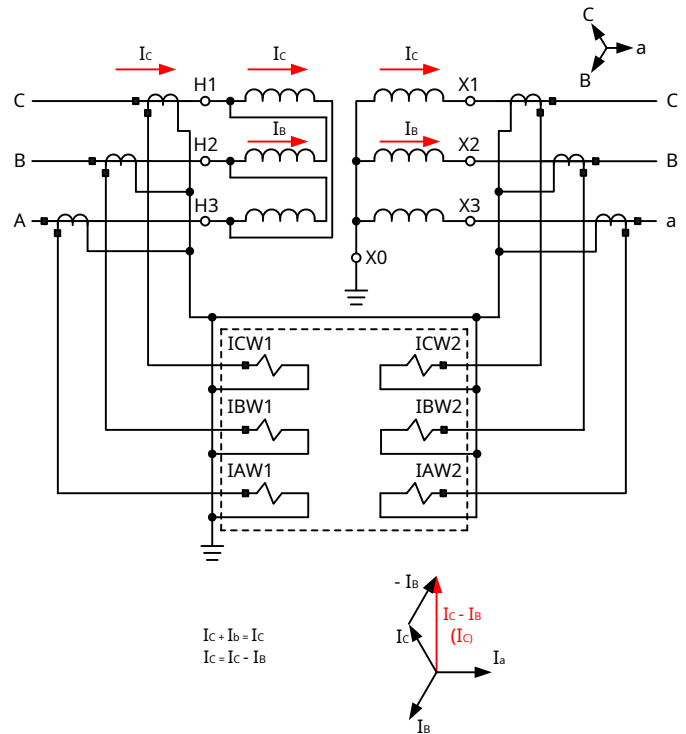
Fig. 11. Conexiones de transformador de fase a buje

La suposición estándar de que un lado delta del transformador Dy1 adelanta al lado de la estrella en 30 grados solo es válida cuando se cumplen tres condiciones:

1. El sistema tiene una rotación de fase ABC.
2. La fase A en el sistema va a H1 y X1 en el transformador, la fase B en el sistema va a H2 y X2 en el transformador, y la fase C en el sistema va a H3 y X3 en el transformador.
3. La fase A del sistema pasa a la fase A del relé, la fase B del sistema pasa a la fase B del relé y la fase C del sistema pasa a la fase C en el relevo.

En este caso, la Condición 2 no es verdadera. Esto significa que el estándar de estrella delta de 30 grados no es necesariamente cierto.

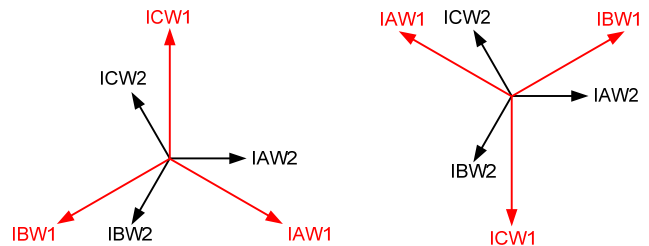
Podemos rastrear fácilmente a través de cualquier conexión de transformador para derivar la relación de adelanto / retraso entre las corrientes en ambos lados. Primero, suponga que la corriente fluye a través del transformador desde el lado delta hacia el lado en estrella. Sabiendo que los devanados de fase individuales del lado delta están acoplados magnéticamente a los devanados individuales del lado en estrella y asumiendo una relación de transformación de 1: 1, podemos concluir que las corrientes a través de ellos son las mismas. Luego, podemos escribir ecuaciones KCL para derivar las corrientes en las fases que entran en el devanado delta. La derivación de esta ecuación KCL para la corriente de fase C del lado delta se muestra en la siguiente figura.



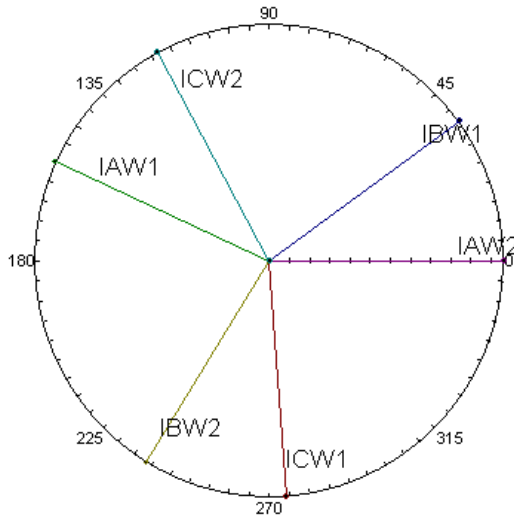
El resultado muestra que las corrientes del lado alto (delta) son 3 más grandes y retrasan las corrientes del lado bajo (estrella) en 30 grados. Las corrientes de secuencia positiva reflejan el mismo comportamiento.

VIII-d Dibuje los fasores para las corrientes previas a la falla que esperamos ver en el sistema así como las corrientes que entran al relé. ¿Coinciden con los fasores anteriores a la falla en el evento?

Los fasores de corriente previos a la falla se muestran en la siguiente figura, con el devanado 1 en el lado delta y el devanado 2 en el lado en estrella. El diagrama de la izquierda muestra las corrientes previas a la falla vistas en el sistema, y el diagrama de la derecha muestra las corrientes previas a la falla vistas por el relé. Tenga en cuenta que las corrientes del Devanado 1 están desfasadas 180 grados de las corrientes del Devanado 2 cuando las ve el relé porque la polaridad del TC del Devanado 1 es opuesta a la del Devanado 2.

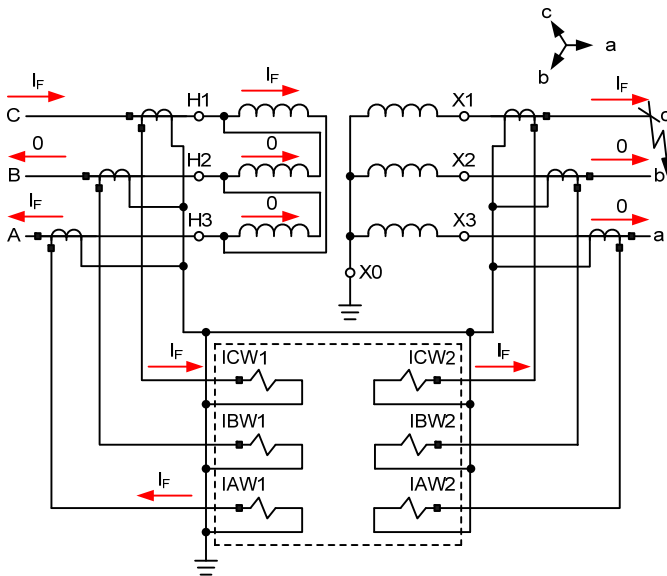


Los fasores vistos por el relé coinciden con el evento, como se muestra en la siguiente figura.

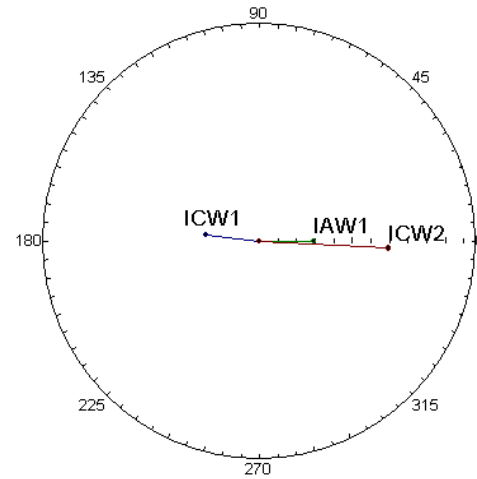


VIII-e Dibuja los fasores que esperamos ver en el sistema, así como los fasores que entran en el relé durante la falla. ¿Coincide esto con lo que muestra el evento?

Trabajando de derecha a izquierda, podemos rastrear la falla a través del transformador de una manera similar a lo que hicimos con las corrientes previas a la falla. Esto se muestra en la siguiente figura, asumiendo que la carga es insignificante en las fases sin falla y la relación del transformador es 1: 1.

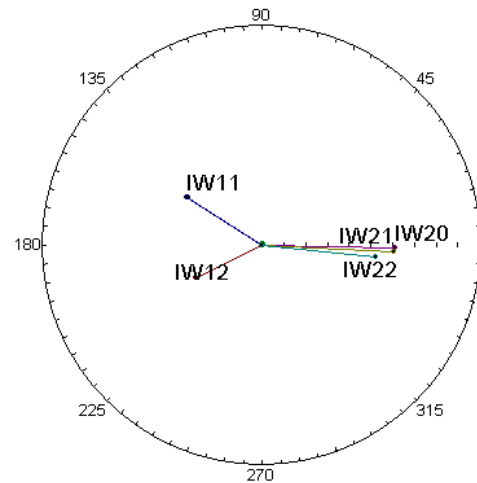


Los fasores del evento, que se muestran en la siguiente figura, coinciden con lo que esperamos ver. IAW1 e ICW1 son iguales en magnitud y 180 grados desfasados. ICW1 e ICW2 también están desfasados 180 grados.

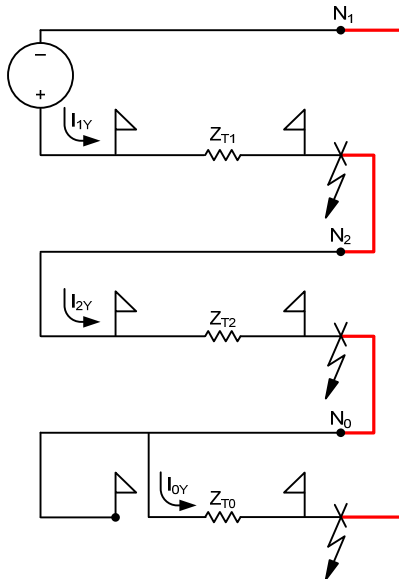


VIII-f Observe los componentes simétricos del evento. Derive estos fasores dibujando la red de secuencia de la falla.

La secuencia de fasores de corriente durante la falla se muestra en la siguiente figura. Tenga en cuenta que debemos seleccionar una base de fase C al ver los fasores de secuencia porque se trata de una falla de fase C a tierra.



La siguiente figura muestra el diagrama de secuencia de la red para esta falla, con las banderas que marcan las ubicaciones de los CT. Debido a que se trata de una falla de fase a tierra, las tres redes de secuencia están conectadas en serie. En este diagrama, notamos que no hay corriente de secuencia cero fluyendo a través del TC en el lado delta. Es por eso que no hay un fasor de corriente de secuencia cero para el Devanado 1 en la figura anterior.



Las corrientes de fase utilizadas por los 87 elementos del relé son una combinación de corrientes de secuencia positiva, negativa y de secuencia cero. Si el relé tiene TC en estrella, debemos eliminar la corriente de secuencia cero del Devanado 2 dentro del relé porque la corriente de secuencia cero se elimina del Devanado 1 debido a la conexión delta del transformador. Si usamos un CT delta en el lado del Devanado 2, esto tendría el mismo efecto. Se puede utilizar un elemento de falla a tierra restringida (REF) o un relé de tierra en el buje X0 para detectar fallas a tierra sensibles en el lado en estrella del transformador.

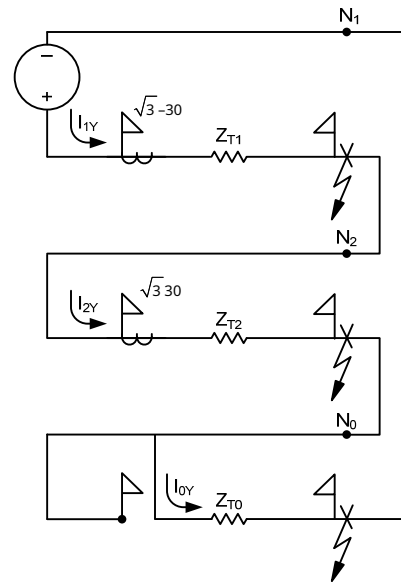
Es importante tener en cuenta que esta red representa una falla de fase a tierra en el lado en estrella del transformador. Esto significa que primero debemos resolver las corrientes de secuencia que pasan por el lado en estrella y luego aplicar una transformación delta para resolver las corrientes que pasan por el lado delta.

Debido a que esta es una falla de fase C a tierra, necesitamos usar una base de fase C, por lo que nuestra ecuación de transformación se convierte en (con una rotación de fase del sistema ABC):

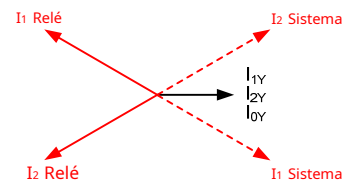
$$\begin{aligned}
 I_{0Y} &= \frac{1}{3} I_{1Y} + I_{2Y} + I_{0Y} \\
 I_{1Y} &= \frac{1}{3} I_{1Y} - I_{2Y} + I_{0Y} \\
 I_{2Y} &= \frac{1}{3} I_{1Y} + I_{2Y} - I_{0Y}
 \end{aligned}$$

Esto resuelve las corrientes de secuencia en el lado en estrella del transformador. En la primera figura de esta respuesta, podemos ver que los tres fasores de secuencia en el lado de la estrella (Devanado 2) son iguales en magnitud y fase, lo que se espera de las ecuaciones que derivamos. También podemos ver que la magnitud de los fasores de secuencia es aproximadamente 1/3 de la corriente de fase C en el devanado 2.

Anteriormente, dedujimos que las corrientes en el lado delta del transformador serán $\sqrt{3}$ mayores en magnitud y retrasando las corrientes en estrella en 30 grados en la secuencia positiva (adelantando 30 grados en la secuencia negativa). Esto se representa en la siguiente figura tomando las corrientes a través de las redes y transformándolas a través de un CT que aplica el aumento de magnitud y el cambio de ángulo apropiados. Las corrientes de secuencia que se ven en el lado delta son posteriores a la transformación CT.



Los fasores de secuencia que esperamos ver en el sistema se muestran en la siguiente figura. Note que $y_{01\Delta}$ es $3\sqrt{3}$ mayor en magnitud y rezagos y_{01} por 30 grados, mientras $y_{02\Delta}$ es $\sqrt{3}$ mayor en magnitud y conduce I_{2Y} por 30 grados. Debido a la polaridad del TC, giramos las corrientes delta en el sistema 180 grados para ver lo que ve el relé.



Esto coincide con los fasores de secuencia del evento, como se muestra en la primera figura de esta respuesta. Tenga en cuenta que en el evento, las corrientes delta no son $3\sqrt{3}$ mayores en magnitud que las corrientes de estrella, como esperamos. Esto se debe a que la diferencia de 3 se basa en una relación de vueltas de transformador asumida de 1: 1. La relación de vueltas del transformador se calcula como:

$$\text{norte} = \frac{13,2 \text{ kV}}{\frac{\sqrt{3}}{115 \text{ kV}}} = 0.0662$$

Ahora podemos esperar que las corrientes delta sean $n \cdot 3$ veces mayores que las corrientes en estrella, o 0,1147 veces mayores. También es importante tener en cuenta que esta relación es cierta para los amperios primarios, por lo que debemos convertir los amperios secundarios dados en el evento en amperios primarios.

Por ejemplo, esperamos que $I_{1\Delta}$ a ser 0.1147 multiplicado por $I_{1\text{ año}}$ en amperios primaria. El informe de eventos muestra que $I_{1\Delta} = 1,3$ A secundaria y $y_{01Y} = 2.0$ A secundario durante la falla. Multiplicando la corriente de cada devanado por su relación CT (40: 1 para el devanado delta y 240: 1 para el devanado en estrella), obtenemos $I_{1\Delta} = 52$ A primaria y $y_{01Y} = 480$ A primario. I_{1Y} (480 A) multiplicado por 0,1147 da aproximadamente $I_{1\Delta}$ (52 A).

VIII-g Usando los componentes de la secuencia, trabaje hacia atrás para derivar las corrientes de falla de fase en los lados delta y estrella del transformador.

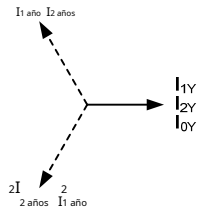
Debido a que estamos usando la fase C como base, nuestro

ecualizador de transformación uation i s como follows:

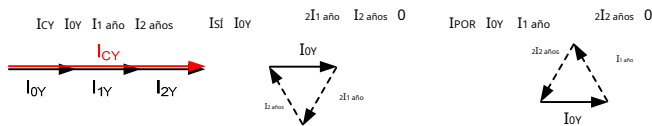
$$\begin{array}{rcl} I_C & 1 & 1 & 1 & I_0 \\ I_A & 1 & 2 & & I_1 \\ I_B & 1 & & 2 & I_2 \end{array}$$

$$\begin{array}{rcl} I_C & I_0 & I_1 & I_2 \\ I_A & I_0 & I_1 & I_2 \\ I_B & I_0 & I_1 & 2I_2 \end{array}$$

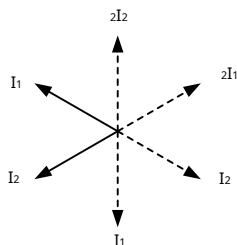
gráficamente. El método gráfico se muestra aquí. Para las corrientes en estrella, primero dibujamos la secuencia de fasores desplazados por α que necesitaremos, como se muestra en la siguiente figura.



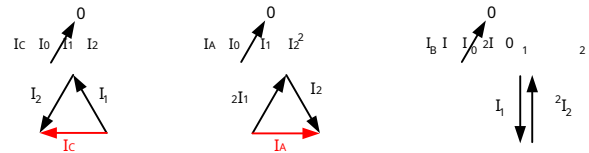
Luego aplicamos las transformaciones, como se muestra en la siguiente figura.



Para las corrientes delta, primero dibujamos la secuencia de fasores desplazados por α que necesitaremos, como se muestra en la siguiente figura.



Luego aplicamos las transformaciones, como se muestra en la siguiente figura.



Combinando los resultados de las corrientes de fase en el lado delta y el lado en estrella, obtenemos los fasores que se muestran en la siguiente figura. Esto coincide con las corrientes de fase durante el evento, como se muestra en la última figura en la respuesta a la Pregunta VIII-e.



IX. mixAMPLE 8: TRANSFORMER PAGHASE-TO-PAGHASE FAULT

Este ejemplo muestra cómo derivar el cambio de fase, los componentes simétricos y las corrientes de falla a través de un transformador delta-estrella. El informe del evento titulado **Ejemplo 8.txt** se generó después de que se disparara un relé diferencial de corriente que protegía un transformador delta-estrella, como se muestra en la Fig. 12. La operación incorrecta del relé no es el enfoque de este ejercicio.

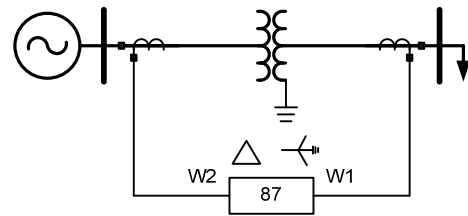
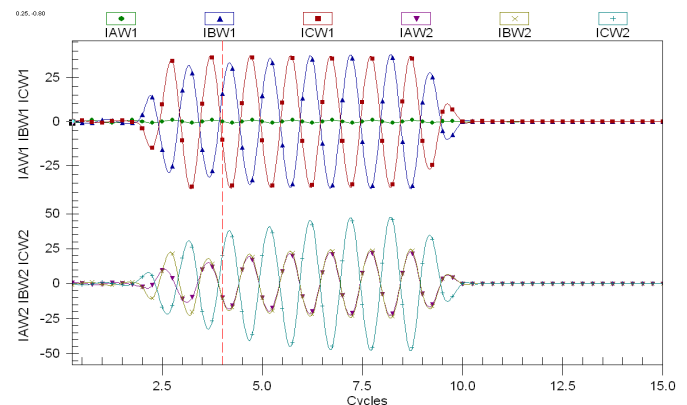


Fig. 12. Relé diferencial de corriente del transformador que protege un transformador delta-estrella

IX-a ¿Qué tipo de avería es esta? Suponiendo un sistema radial, ¿La falla es interna o externa a la zona de protección?

Es una falla de fase B a fase C en el lado estrella del transformador. La falla es externa porque ambos CT de relé ven corriente de falla.



IX-b El transformador está conectado al sistema como se muestra en la Fig. 13. ¿Esperamos que las corrientes en el lado delta adelanten o retrasen las corrientes en el lado de la estrella?

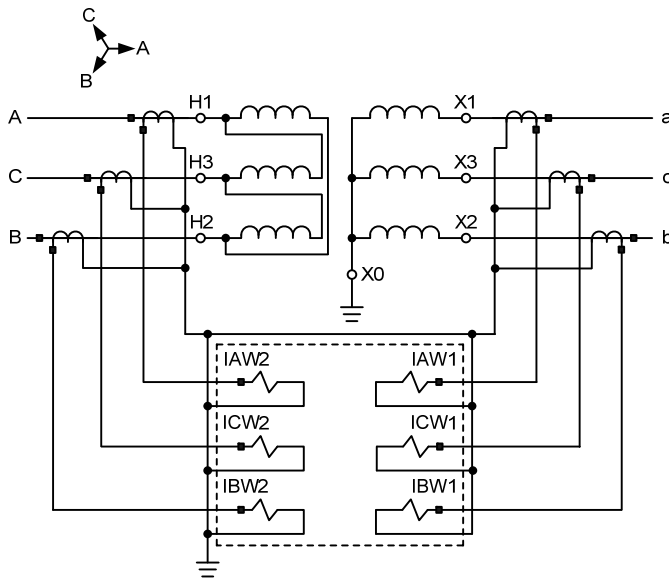
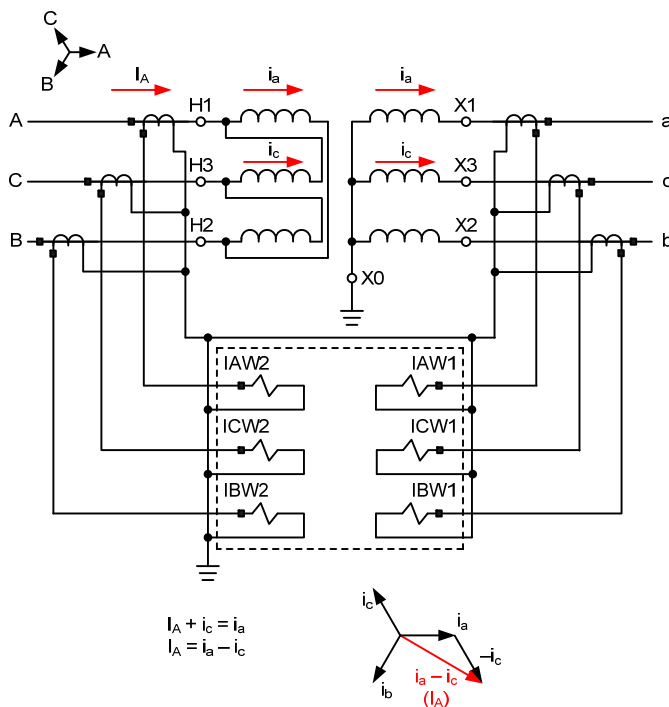


Fig. 13. Conexiones del transformador de fase a aislador

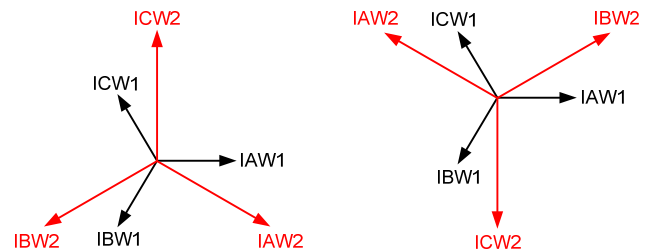
Podemos rastrear fácilmente a través de cualquier conexión de transformador para derivar la relación de adelanto / retraso entre las corrientes en ambos lados. Primero, suponga que la corriente fluye a través del transformador desde el lado delta hacia el lado estrella. Sabiendo que los devanados de fase individuales del lado delta están acoplados magnéticamente a los devanados individuales del lado en estrella y asumiendo una relación de transformación de 1: 1, podemos concluir que las corrientes a través de ellos son las mismas. Luego, podemos escribir ecuaciones KCL para derivar las corrientes en las fases que entran en el devanado delta. La derivación de esta ecuación KCL para la corriente de fase C del lado delta se muestra en la siguiente figura.



El resultado muestra que las corrientes del Devanado 2 (delta) retrasan las corrientes del Devanado 1 (estrella) en 30 grados.

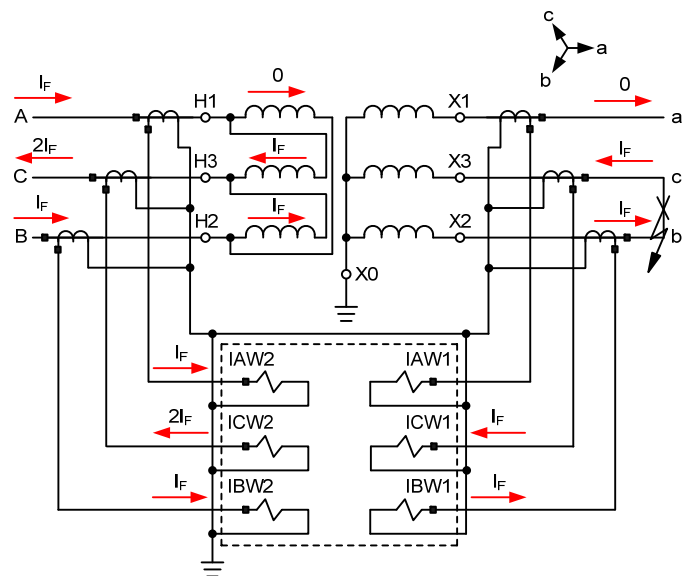
IX-c Dibuje los fasores para las corrientes previas a la falla esperadas en el sistema, así como los fasores que ingresan al relé.

Los fasores de corriente previos a la falla se muestran en la siguiente figura, siendo el devanado 1 el lado en estrella y el devanado 2 el lado delta. El diagrama de la izquierda muestra la corriente previa a la falla que se ve en el sistema, y el diagrama de la derecha muestra las corrientes anteriores a la falla que ve el relé. Tenga en cuenta que las corrientes del Devanado 2 están desfasadas 180 grados de las corrientes del Devanado 1 cuando las ve el relé porque la polaridad del TC del Devanado 2 es opuesta a la del Devanado 1.

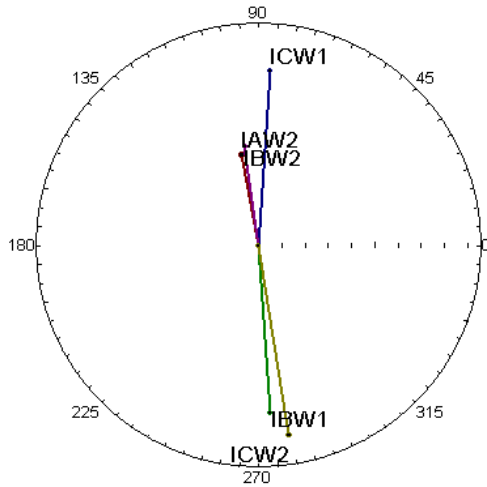


IX-d Dibuja los fasores esperados en el sistema, así como entrando en el relé durante la falla. ¿Coincide esto con lo que muestra el evento?

Trabajando de derecha a izquierda, podemos rastrear la falla a través del transformador de una manera similar a lo que hicimos con las corrientes previas a la falla. Esto se muestra en la siguiente figura, asumiendo que la carga es insignificante en las fases sin falla y la relación del transformador es 1: 1.

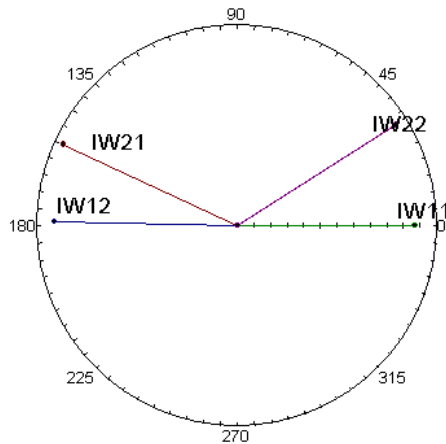


Los fasores del evento, que se muestran en la siguiente figura, coinciden con lo que esperamos ver. IBW1 está desfasado 180 grados con ICW1, e IAW2 e IBW2 están en fase. ICW2 está desfasado 180 grados y el doble de magnitud que IAW2 e IBW2.

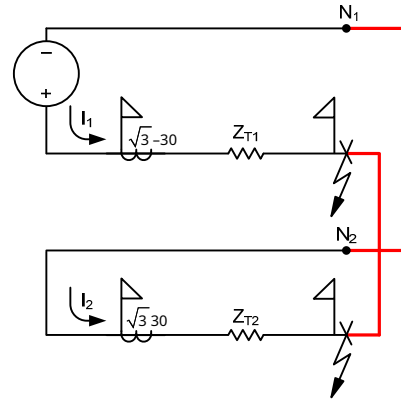


IX-e Mira los fasores de secuencia en el evento. Derive estos fasores dibujando la red de secuencia de la falla.

La secuencia de fasores de corriente durante la falla se muestra en la siguiente figura. Tenga en cuenta que debemos seleccionar una base de fase A al ver los fasores de secuencia porque se trata de una falla de fase B a fase C.



La siguiente figura muestra el diagrama de secuencia de la red para esta falla, con las banderas que marcan las ubicaciones de los TI a cada lado del transformador. Debido a que se trata de una falla de fase a fase, las redes de secuencia positiva y negativa están conectadas en paralelo.



Es importante tener en cuenta que esta red representa una falla de fase a fase en el lado en estrella del transformador. Esto significa que primero debemos resolver las corrientes de secuencia que pasan por el lado en estrella y luego aplicar una transformación delta para resolver las corrientes que pasan por el lado delta.

Debido a que esta es una falla de fase B a fase C, necesitamos usar una base de fase A, por lo que nuestra ecuación de transformación se convierte en:

$$\begin{matrix} I_{0Y} & 1 & 1 & 1 & I_{SI} \\ I_{1 \text{ año}} & \frac{1}{3} & 1 & & 2 & I_{POR} \\ I_{2 \text{ años}} & & & 2 & & I_{CY} \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} I_{SI} & 0, y_{OPOR} & I_{CY} \\ I_{0Y} & 0 & \end{matrix}$$

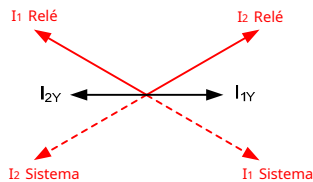
$$\begin{matrix} I_{1 \text{ año}} & \frac{1}{3} & I_{POR} & 2I_{POR} & 1 & I_{CY} & \frac{1}{3} & I_{POR} & 2I_{POR} \\ & \frac{1}{3} & & 2 & I_{POR} & \frac{1}{3} & \sqrt{3}I_{POR} & 90 \\ I_{2 \text{ años}} & \frac{1}{3} & 2I_{POR} & I_{CY} & \frac{1}{3} & 2I_{POR} & I_{POR} \\ & \frac{1}{3} & 2 & I_{POR} & \frac{1}{3} & \sqrt{3}I_{POR} & -90 \end{matrix}$$

$I_{1 \text{ año}} \quad I_{2 \text{ años}}$

Esto resuelve las corrientes de secuencia en el lado en estrella del transformador. En la primera figura de esta respuesta, podemos ver que los fasores de secuencia positiva y negativa en el lado de la estrella (Devanado 1) son iguales en magnitud y 180 grados fuera de fase, lo que se espera de las ecuaciones que derivamos. Nosotros También puede ver que el fasor de secuencia positiva es aproximadamente $\sqrt{3}/$ veces mayor que la corriente de la fase B en el lado de la estrella y con un avance de 90 grados. Asimismo, la secuencia negativa fasor es aproximadamente $\sqrt{3}/$ veces mayor que la corriente de fase B en el lado de la estrella y tiene un retraso de 90 grados.

Anteriormente, dedujimos que las corrientes en el lado delta del transformador serán $\sqrt{3}$ mayores en magnitud y retrasando las corrientes en estrella en 30 grados en la secuencia positiva (adelantando 30 grados en la secuencia negativa). Representamos esto en la figura anterior tomando las corrientes a través de las redes y transformándolas a través de un CT que aplica el aumento de magnitud y el cambio de ángulo apropiados. Las corrientes de secuencia que se ven en el lado delta son posteriores a la transformación CT.

Luego podemos dibujar los fasores de secuencia que esperamos ver en el sistema, como se muestra en la siguiente figura. Aviso que $I_{0\Delta}$ es $\sqrt{3}$ mayor en magnitud y se retrasa $I_{1\Delta}$ por 30 grados, mientras I_{02} es $\sqrt{3}$ mayor en magnitud y conduce $I_{2\Delta}$ por 30 grados. Debido a la polaridad del TC, giramos las corrientes delta en el sistema 180 grados para ver lo que ve el relé.



Esto coincide con los fasores de secuencia del evento, como se muestra en la primera figura de esta respuesta. Tenga en cuenta que en el evento, las corrientes delta no son $\sqrt{3}$ mayor en magnitud que el corrientes de estrella, como esperamos. Esto se debe a que la diferencia de 3 se basa en una relación de vueltas de transformador asumida de 1: 1. Consulte el Ejemplo 7 para obtener una explicación de cómo la relación de vueltas del transformador afecta la relación de magnitud de la corriente entre los lados estrella y triángulo.

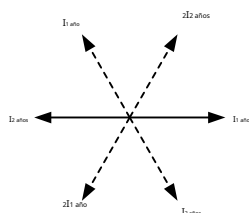
IX-f Usando los componentes de secuencia, trabaje hacia atrás para derivar las corrientes de falla de fase en los lados delta y estrella del transformador.

Debido a que estamos usando la fase A como base, nuestra ecuación de transformación es la siguiente:

$$\begin{array}{ccc} I_A & 1 & 1 & 1 & I_0 \\ I_B & 1 & 2 & & I_1 \\ I_C & 1 & & 2 & I_2 \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc} I_A & I_0 & I_1 & I_2 \\ I_B & I_0 & I_1 & 2I_2 \\ I_C & I_0 & I_1 & 2I_2 \end{array}$$

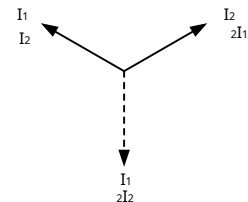
Estos cálculos pueden ser hecho matemáticamente o gráficamente. El método gráfico se muestra aquí. Para las corrientes en estrella, primero dibujamos la secuencia de fasores desplazados por α que necesitaremos, como se muestra en la siguiente figura.



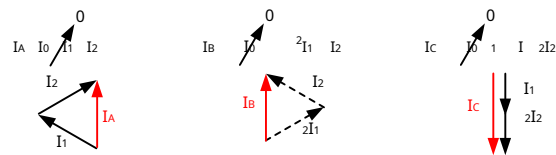
Luego aplicamos las transformaciones, como se muestra en la siguiente figura.



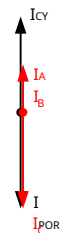
Para las corrientes delta, primero dibujamos la secuencia de fasores desplazados por α^2 que necesitaremos, como se muestra en la siguiente figura.



Luego aplicamos las transformaciones, como se muestra en la siguiente figura.



Combinando los resultados de las corrientes de fase en los lados delta y estrella, obtenemos los fasores que se muestran en la siguiente figura. Esto coincide con las corrientes de fase durante el evento, como se muestra en la segunda figura en la respuesta a la Pregunta IX-d.



X. REFERENCIAS

- [1] JL Blackburn y TJ Domin, *Principios de protección de relés y Aplicaciones*. CRC Press, Boca Raton, FL, 2007.
- [2] PM Anderson, *Análisis de sistemas eléctricos con fallas*. Estado de Iowa University Press, Ames, IA, 1973.
- [3] JD Glover, MS Sarma y TJ Overbye, *Análisis y diseño de sistemas de potencia (4ª edición)*. Thomson Learning, Toronto, ON, 2008.
- [4] EO Schweitzer, III y Stanley E. Zocholl, "Introducción a los componentes simétricos", actas de la 58ª Conferencia anual de retransmisiones protectoras de Georgia Tech, Atlanta, GA, abril de 2004.
- [5] Westinghouse Electric Corporation, División de instrumentos de relé, *Aplicado Relés de protección*. Newark, Nueva Jersey, 1976.
- [6] CF Wagner y RD Evans, *Componentes simétricos*. McGraw-Hill, Nueva York, 1933.
- [7] D. Costello, "Tutorial de análisis de eventos, Parte 1: Declaraciones de problemas", enero de 2012. Disponible: <http://www.selinc.com>.
- [8] D. Costello, "Tutorial de análisis de eventos, Parte 2: Clave de respuestas", enero de 2012. Disponible: <http://www.selinc.com>.

- [9] The Electricity Training Association, eds., *Protección del sistema de energía Volumen 1: Principios y componentes*. La Institución de Electricidad Ingenieros, Londres, Reino Unido, 1995.
- [10] PK Maezono, E. Altman, K. Brito, V. Alves dos Santos Mello Maria y F. Magrin, "Falla de muy alta resistencia en una línea de transmisión de 525 kV - Estudio de caso", actas de la 35a. Conferencia de relevos de protección, Spokane, WA, octubre de 2008.
- [11] DA Tziouvaras, J. Roberts y G. Benmouyal, "Nuevo diseño de ubicación de fallas de múltiples extremos para líneas de dos o tres terminales", actas de la 7ª Conferencia Internacional sobre Desarrollos en la Protección de Sistemas Eléctricos, Ámsterdam, Países Bajos, Abril de 2001.
- [12] A. Amberg, A. Rangel y G. Smelich, "Validating Transmission Line Impedances Using Known Event Data", actas de la 65ª Conferencia Anual de Ingenieros de Relevadores de Protección, College Station, TX, abril de 2012.

XI. BIOGRAFÍAS

Ariana Amberg obtuvo su BSEE, magna cum laude, de St. Mary's University en 2007. Se graduó con una Maestría en Ingeniería en Ingeniería Eléctrica de Texas A&M University en 2009, especializándose en sistemas de energía. Ariana se incorporó a Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. en 2009 como ingeniera asociada de aplicaciones de campo. Ha sido miembro de IEEE durante 9 años.

Alex Rangel recibió un BSEE y un MSE de la Universidad de Texas en Austin en 2009 y 2011, respectivamente. En enero de 2011, Alex se incorporó a Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., donde trabaja como ingeniero asociado de aplicaciones de campo. Alex es actualmente miembro de IEEE.