

## ***Tabla de contenido***

de

**AP Sakis Meliopoulos y George J. Cokkinides**

Retransmisión, teoría y aplicaciones del sistema de potencia

<b>Capítulo 4</b>	<b>2</b>
<b><i>fallas del sistema de energía</i></b>	<b>2</b>
<b>4.1 Introducción</b>	<b>2</b>
<b>4.2 Análisis simétrico de fallas: método de componente de secuencia</b>	<b>6</b>
<b>4.3 Análisis asimétrico de fallas - Método de componente de secuencia</b>	<b>11</b>
4.3.1 Fallo línea a línea	11
4.3.2 Fallo línea a línea a tierra	16
4.3.3 Fallo de línea única a tierra	21
<b>4.4 Análisis de fallas de redes grandes</b>	<b>29</b>
4.4.1 Métodos de análisis de circuitos	30
4.4.2 Métodos de reducción de red	34
<b>4.5 Transitorios eléctricos</b>	<b>39</b>
4.5.1 Transitorios de corriente de falla	39
4.5.2 Evolución de la corriente de falla	43
<b>4.6 Voltaje de recuperación transitorio</b>	<b>43</b>
<b>4.7 Efectos de la puesta a tierra</b>	<b>48</b>
<b>4.8 Análisis de fallas - Métodos directos</b>	<b>58</b>
4.8.1 Base del método	58
4.8.2 Matriz de admitancia de los elementos del sistema de potencia	59
4.8.3 Análisis nodal	63
4.8.4 Discusión del análisis de fase directa	66
<b>4.9 Sobretensiones temporales de frecuencia de potencia</b>	<b>66</b>
<b>4.10 Tensiones transferidas e inducidas durante fallas</b>	<b>71</b>
<b>4.11 Selección de interruptor</b>	<b>75</b>
<b>4.12 Dimensionamiento de cables para fallas eléctricas</b>	<b>75</b>
<b>4.13 Resumen y discusión</b>	<b>79</b>
<b>4.14 Problemas</b>	<b>80</b>

# Capítulo 4

## Análisis de fallas del sistema de energía

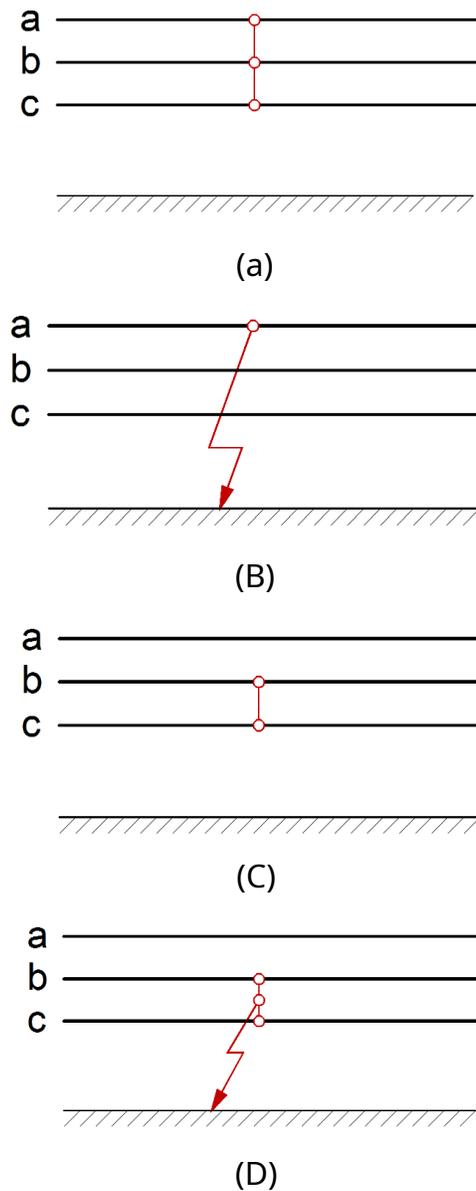
### 4.1 Introducción

Los sistemas de energía eléctrica están sujetos a fallas (o cortocircuitos) resultantes de fallas en los aisladores. Específicamente, las fallas son causadas por la ruptura del aislamiento entre un conductor de fase y una estructura conectada a tierra o entre dos conductores de fase cualesquiera, y la creación de una ruta conductora. Las fallas de aislamiento son causadas por altos voltajes o defectos de aislamiento o una combinación de los dos, o cuando un medio conductor cortocircuita una o más fases del sistema. En general, las causas fundamentales de las fallas son muchas: rayos, ramas de árboles que caen sobre las líneas, daños por viento, deterioro del aislamiento, vandalismo, etc. En un sistema trifásico, una falla puede involucrar a dos o más conductores. Dependiendo del número de conductores involucrados en una falla, caracterizamos las fallas como fallas trifásicas, fallas de doble línea, fallas de línea simple, etc.

Las fallas en los sistemas de energía eléctrica causan una serie de efectos indeseables: (a) flujo de corriente eléctrica excesiva, que, en general, puede dañar el equipo; (b) tensiones anormales (sobretensiones o subtensiones); (c) elevación del voltaje neutro o de tierra del sistema, que representa un peligro para los seres humanos y los animales (tenga en cuenta que la elevación del voltaje del neutro del sistema es causada solo por fallas a tierra asimétricas, como fallas de línea simple a tierra y fallas de línea doble a tierra); y (d) voltajes transferidos o inducidos en estructuras metálicas vecinas y / o circuitos de comunicación que pueden ser de nivel significativo.

Es importante aislar el elemento del sistema de energía con falla tan pronto como sea posible después del inicio de la falla. Para ello, los sistemas de potencia están equipados con un sistema de protección compuesto por relés, disyuntores y fusibles. El diseño del sistema de protección requiere el conocimiento del rendimiento del sistema durante condiciones normales y defectuosas. Específicamente, el sistema de protección debe poder distinguir entre condiciones normales y de falla y, en este último caso, debe desconectar exitosamente el componente defectuoso del sistema. Por lo tanto, es necesario determinar los valores de los voltajes y corrientes del sistema durante condiciones de falla. Esta información se utiliza en el diseño de la lógica de protección y los ajustes de protección, la selección de disyuntores, tamaño de fusible, etc.

El diseño adecuado del sistema de protección (relés de protección, disyuntores, fusibles, etc.) permite la detección efectiva y el aislamiento exitoso de los elementos del sistema de energía con fallas. Las fallas de energía eléctrica generalmente se eliminan dentro de 2 a 90 ciclos de la frecuencia de energía (0.03 a 1.5 segundos). Para ciertos tipos de fallas, puede desarrollarse un aumento sustancial de voltaje en el neutro del sistema, lo que afecta la seguridad de los seres humanos y los animales cerca del sistema eléctrico. Para mitigar los efectos peligrosos de las fallas del sistema de energía, los sistemas de energía deben estar debidamente conectados a tierra. El análisis de fallas de energía y elevación de voltaje neutro es necesario para el diseño adecuado de los sistemas de puesta a tierra, garantizando la seguridad del personal.



**Figura 4.1. Cuatro tipos de fallas del sistema de energía**

**(a) Falla trifásica, (b) falla de línea simple a tierra, (c) falla de línea a línea, (d) falla de línea doble a tierra**

En este capítulo discutimos el problema del análisis de fallas del sistema eléctrico. Por análisis de fallas entendemos los métodos computacionales que nos permiten determinar los niveles de corriente de falla, los niveles de voltaje, los voltajes inducidos, los voltajes de transferencia y otras cantidades de interés durante la falla. Se presentan dos enfoques distintos. Primero, el análisis de fallas de sistemas trifásicos se aborda de la manera convencional, mediante el uso de componentes simétricos. Los supuestos básicos y las limitaciones del método de componentes simétricos se establecen explícitamente. El método de componentes simétricos se amplía para analizar la distribución de corriente entre cables aéreos, neutrales y tierra. Esta extensión del método proporciona la base para el cálculo de terreno

aumento potencial. En segundo lugar, se presenta un enfoque general del problema del análisis de fallas. Este método es aplicable a sistemas trifásicos simétricos y asimétricos y a sistemas no trifásicos. Proporciona la distribución de corriente entre los circuitos aéreos y la tierra, así como el aumento del potencial de tierra de los neutrales del sistema. Si bien el método de componentes simétricos requiere un modelo de sistema simplificado (aproximado), el segundo método no se basa en ninguna suposición simplificadora y, por lo tanto, es más preciso y realista.

Los efectos de una falla en el sistema eléctrico son numerosos. Específicamente, al iniciarse una falla, ocurren los siguientes fenómenos:

1. Transitorios de corriente eléctrica: Estos transitorios se caracterizan por la generación de un componente de CC transitorio, así como también por transitorios rápidos (de alta frecuencia).
2. Transitorios de voltaje: durante una falla, el sistema experimenta caídas de voltaje en ciertos puntos y aumentos de voltaje en otros puntos. Además, las tierras del sistema se elevan típicamente a un voltaje sustancial, llamado *el potencial de tierra se eleva*.
3. Transitorios de la unidad generadora: Estos transitorios involucran oscilaciones electromecánicas de los ejes del rotor del generador acoplados con el sistema eléctrico. Fenómenos similares ocurren en motores si están presentes.

Para aplicaciones de relés, los transitorios eléctricos rápidos no se consideran porque están filtrados y, por lo tanto, no afectan el funcionamiento de los relés.

Antes de embarcarnos en las metodologías de análisis de fallas, discutimos algunas cuestiones relacionadas con el análisis de fallas en términos generales. Estos problemas se abordarán posteriormente de forma cuantitativa.

**Distribución de corriente de falla.** La complejidad de la topología de un circuito de un sistema eléctrico típico da como resultado patrones complejos de flujos de corriente de falla. Cuando ocurre una falla, el flujo de corriente de falla puede seguir varios caminos alternativos. En general, la corriente de falla se dividirá entre varios caminos y la porción de la corriente de falla en cada uno de los caminos alternos estará determinada por las impedancias (e impedancias mutuas) de estos caminos. Parte de la corriente de falla fluye a través de cables de fase, cables neutros, cables de tierra y parte de la corriente de falla fluye a través de la tierra. La distribución de la corriente de falla depende de los tamaños relativos de los conductores de la línea de transmisión, el acoplamiento mutuo entre los conductores, las asimetrías de la línea de transmisión, las resistencias de las diversas tierras del sistema, etc. Es conveniente realizar extensos estudios de análisis de fallas para determinar correctamente los ajustes apropiados del relé de protección. Las técnicas de análisis utilizadas para este propósito deben basarse en modelos de sistemas trifásicos completos para que se tengan en cuenta las asimetrías del sistema.

**Voltajes inducidos / transferidos.** Durante una falla a tierra, las corrientes de falla que fluyen a través de los cables de fase, los neutros y los blindajes, así como la ruta de tierra, inducen voltajes a los circuitos cercanos. Estos voltajes pueden ser sustanciales y pueden dañar equipos sensibles como controles, relés, dispositivos de comunicación, etc. Los voltajes inducidos / transferidos son causados por tres mecanismos (a) diferencias de potencial de tierra causadas por efectos de conducción de corriente, (b) inducidas magnéticamente voltajes (efectos de inducción de corriente) y (c) voltajes acoplados capacitivos.

**Fallas a tierra y los efectos de la impedancia de tierra.** Un sistema de energía es un sistema de tierra múltiple, es decir, contiene muchos electrodos de tierra, que están interconectados a través de cables neutrales y apantallados. Por lo tanto, cuando ocurre una falla a tierra (es decir, una falla entre una fase y un neutro o un cable de tierra), la corriente de falla eventualmente regresará a la fuente a través de la ruta de retorno que puede involucrar varias rutas en paralelo. Específicamente, la ruta de retorno puede incluir típicamente el cable neutro, los cables de tierra y la ruta de tierra en paralelo. La relación entre la corriente de neutro / blindaje y la corriente de tierra se conoce como factor de división de la corriente de falla. El factor de división depende principalmente de la resistencia de las tierras del sistema de energía y de los tamaños de los cables neutro y blindado. El aumento de potencial de tierra (GPR) que ocurre durante una falla a tierra depende del factor de división y de la impedancia del sistema de tierra.

**Sobretensiones en fases no falladas.** Durante una falla a tierra, el voltaje de las fases sin falla con respecto al cable neutro o de tierra puede elevarse por encima del valor nominal. Esta condición es obviamente indeseable, ya que puede causar daños al equipo. En particular, la falla del descargador de sobretensión puede ocurrir si los descargadores no tienen el tamaño adecuado para esta condición. El nivel de sobretensión de fase sin fallas depende de la calidad del sistema de puesta a tierra y de la impedancia de los cables neutros y apantallados. Específicamente, la sobretensión de fase sin fallas se reduce aumentando el tamaño de los cables neutros y blindados de los circuitos de transmisión y distribución y reduciendo la resistencia de tierra de la torre de transmisión y distribución y las tierras de los polos. El término *Coficiente de puesta a tierra* se ha definido para caracterizar el rendimiento del sistema de puesta a tierra con respecto a la sobretensión de fase sin fallas. El coeficiente de conexión a tierra se define como la relación entre la sobretensión de fase sin fallas (con respecto al voltaje neutro o de tierra del sistema) sobre la tensión nominal de fase a tierra y se discutirá más adelante con más detalle.

**Fallos de alta impedancia.** Ocasionalmente, la impedancia de la ruta de retorno de la corriente de falla es muy alta y, en este caso, la corriente de falla puede ser pequeña. Las corrientes de falla bajas tienen un impacto adverso en la capacidad de los esquemas de relés de protección para detectar la falla de manera confiable. Nos referimos a estas fallas como fallas de alta impedancia. Por ejemplo, una falla de alta impedancia ocurre cuando un conductor de línea aérea cae sobre suelo o hielo de alta resistividad. En este caso, la impedancia entre el conductor caído y el suelo (o hielo) es muy alta y puede limitar el flujo de corriente a niveles más bajos que la corriente de carga habitual. Obviamente, tales fallas son peligros de seguridad extremos y presentan un desafío formidable para la ingeniería de protección del sistema de energía. Un enfoque para la detección de fallas de alta impedancia se basa en la identificación de firmas de corriente de arco que se asocian típicamente con conductores caídos. Sin embargo, no se ha demostrado que estas técnicas sean siempre efectivas. Las corrientes de falla de arco de baja amplitud pueden estar enmascaradas por corrientes de carga normal altas, por lo que no se detecta la ocurrencia de una falla de alta impedancia. Por el contrario, las cargas no lineales, como los soldadores de arco y los variadores de velocidad de alta frecuencia, pueden generar formas de onda de corriente que pueden identificarse falsamente como corrientes de falla de arco, causando *tropiezos molestos* del sistema de protección. La posibilidad de una falla de alta impedancia también puede generarse por un diseño inadecuado de los sistemas de puesta a tierra. Específicamente, si el sistema de puesta a tierra tiene una impedancia relativamente alta, entonces cualquier falla de fase a tierra puede resultar en corrientes de falla bajas porque la impedancia de la tierra limitará la corriente de falla.

La discusión anterior ilustra el hecho de que durante las condiciones de falla nos preocupan no solo los niveles de corrientes de falla, sino también una serie de efectos que pueden afectar la seguridad de las personas dentro y alrededor de los sistemas eléctricos, así como el daño del equipo. A medida que nos embarcamos en los métodos de análisis, se abordarán algunos de estos fenómenos con más detalle.

## 4.2 Análisis simétrico de fallas: método de componente de secuencia

En esta sección discutimos las técnicas de análisis de cortocircuito basadas en la representación del modelo de secuencia de los elementos del sistema de energía. Discutimos fallas simétricas en esta sección seguidas de fallas asimétricas en la siguiente sección. Los posibles tipos de fallas se ilustran en la Figura 4.1. Los principios del análisis de cortocircuito utilizando los modelos de secuencia se ilustran en la Fig. 4.2. Específicamente, la Figura 4.2a ilustra un sistema de energía que está sujeto a una falla. El sistema de energía se representa como un bloque con cuatro terminales, los conductores trifásicos y el conductor neutro. La falla, en general, está representada por un circuito conectado a los cuatro terminales del

Sistema de poder. Dejar  $Y_{fabc}$  ser la matriz de admitancia del circuito de falla y  $Y_{sabc}$  ser la entrada matriz del sistema eléctrico. Con referencia a la Figura 4.2a, los modelos del sistema de potencia y las fallas se expresan mediante las ecuaciones

$$\tilde{I}_{abc}^S Y_{abc}^S \tilde{V}_{abc}^S = \tilde{I}_{s,abc}^S \quad (4.13)$$

$$\tilde{I}_{abc}^F Y_{abc}^F \tilde{V}_{abc}^F \quad (4.14)$$

Dónde  $\tilde{I}_{abc}^S, \tilde{I}_{abc}^F, \tilde{V}_{abc}^S$  son vectores de corriente y tensiones de fase, y  $\tilde{I}_{s,abc}^S$  están Norton fuentes de corriente equivalentes, como ha sido la notación habitual.

Las ecuaciones (4.13) y (4.14) se transforman mediante el uso de un componente simétrico transformación, cediendo

$$\tilde{I}_{120}^S Y_{120}^S \tilde{V}_{120}^S = \tilde{I}_{s,120}^S \quad (4.15)$$

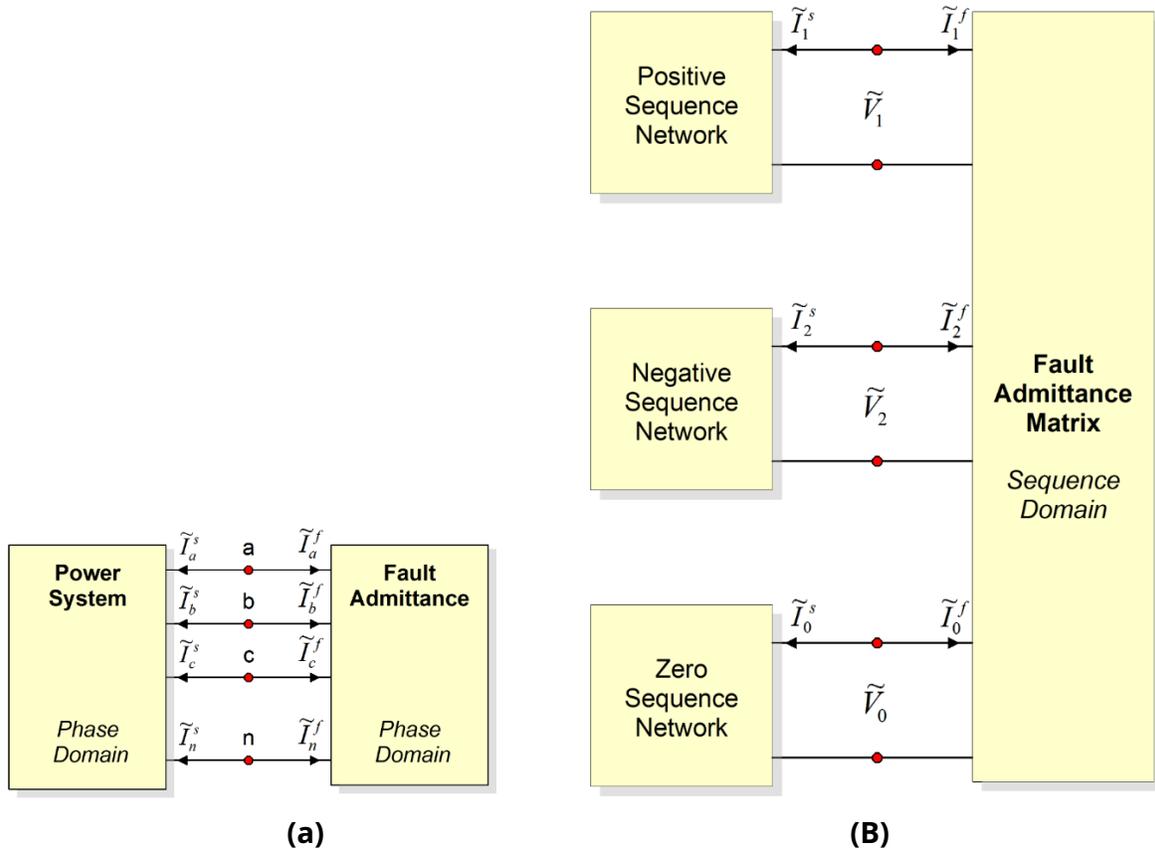
$$\tilde{I}_{120}^F Y_{120}^F \tilde{V}_{120}^F \quad (4.16)$$

dónde:

$$Y_{120}^S = T^{-1} Y_{abc}^S T \quad (4.17a)$$

$$Y_{120}^F = T^{-1} Y_{abc}^F T \quad (4.18a)$$

Sabemos que la ecuación (4.15) representa las redes de secuencia del sistema de energía, mientras que La ecuación (4.16) representa el modelo de secuencia de la matriz de admitancia de fallas. El sistema transformado se ilustra en la Figura 4.2b. Dependiendo del tipo de falla específico, el modelo de secuencia de la matriz de admitancia de falla representa un conjunto específico de conexiones entre las tres redes de secuencia. En las secciones siguientes consideramos varios tipos de fallas y derivamos el conjunto específico de conexiones.



**Figura 4.2 Base del análisis de fallas con componentes simétricos**  
 Sistema físico (dominio a, b, c o dominio de fase), (b) Dominio de componente simétrico

### Falla trifásica

Una falla trifásica ocurre cuando las tres fases de un sistema de energía están conectadas al sistema neutral a través de una impedancia muy baja,  $Z_F$ . En este caso

$$\tilde{I}_F \quad \frac{\tilde{V}_a}{Z_F} Y \quad \tilde{V}_a \quad \tilde{V}_a \quad (4.18a)$$

$$\tilde{I}_F \quad \frac{\tilde{V}_b}{Z_F} Y \quad \tilde{V}_b \quad \tilde{V}_b \quad (4.18b)$$

$$\tilde{I}_F \quad \frac{\tilde{V}_c}{Z_F} Y \quad \tilde{V}_c \quad \tilde{V}_c \quad (4.18c)$$

Las ecuaciones anteriores, escritas en notación matricial compacta, proporcionan la matriz de admitancia de fallas,

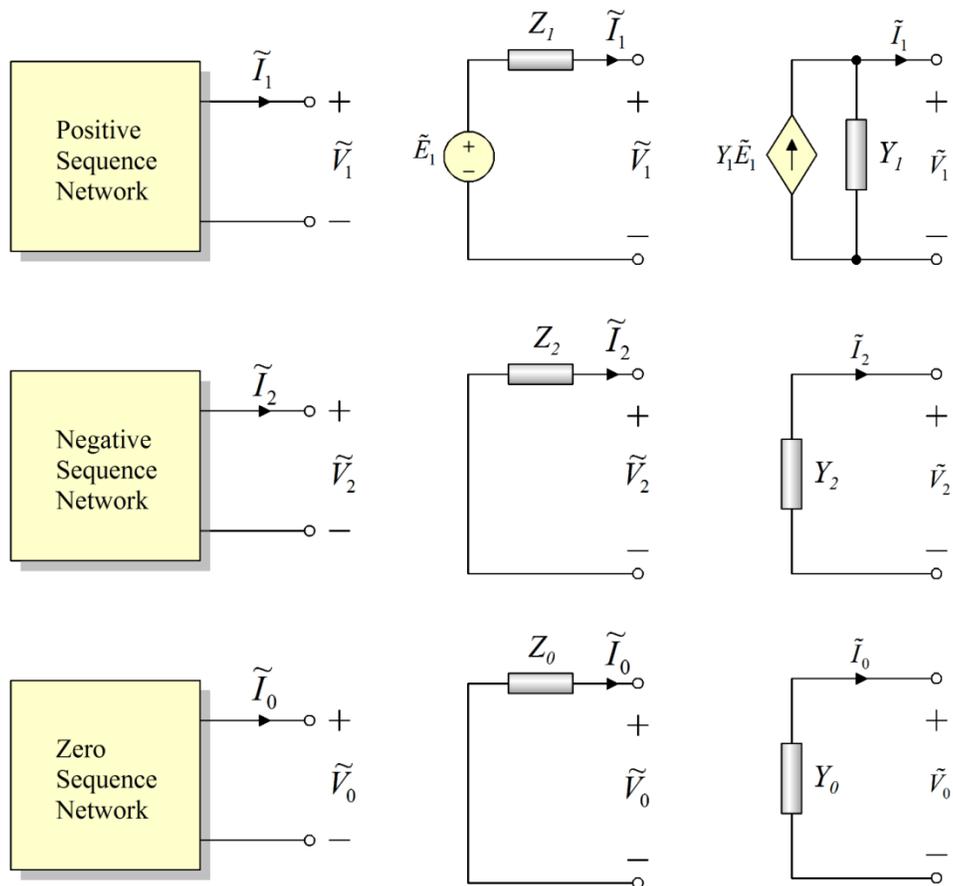
$Y_{dBC}$ :

$$\begin{array}{ccccc}
 \tilde{I}_B^F & Y_F & 0 & 0 & \tilde{V}_a \\
 \tilde{I}_B^F & 0 & Y_F & 0 & \tilde{V}_B \\
 \tilde{I}_C^F & 0 & 0 & Y_F & \tilde{V}_C
 \end{array} \quad (4,19)$$

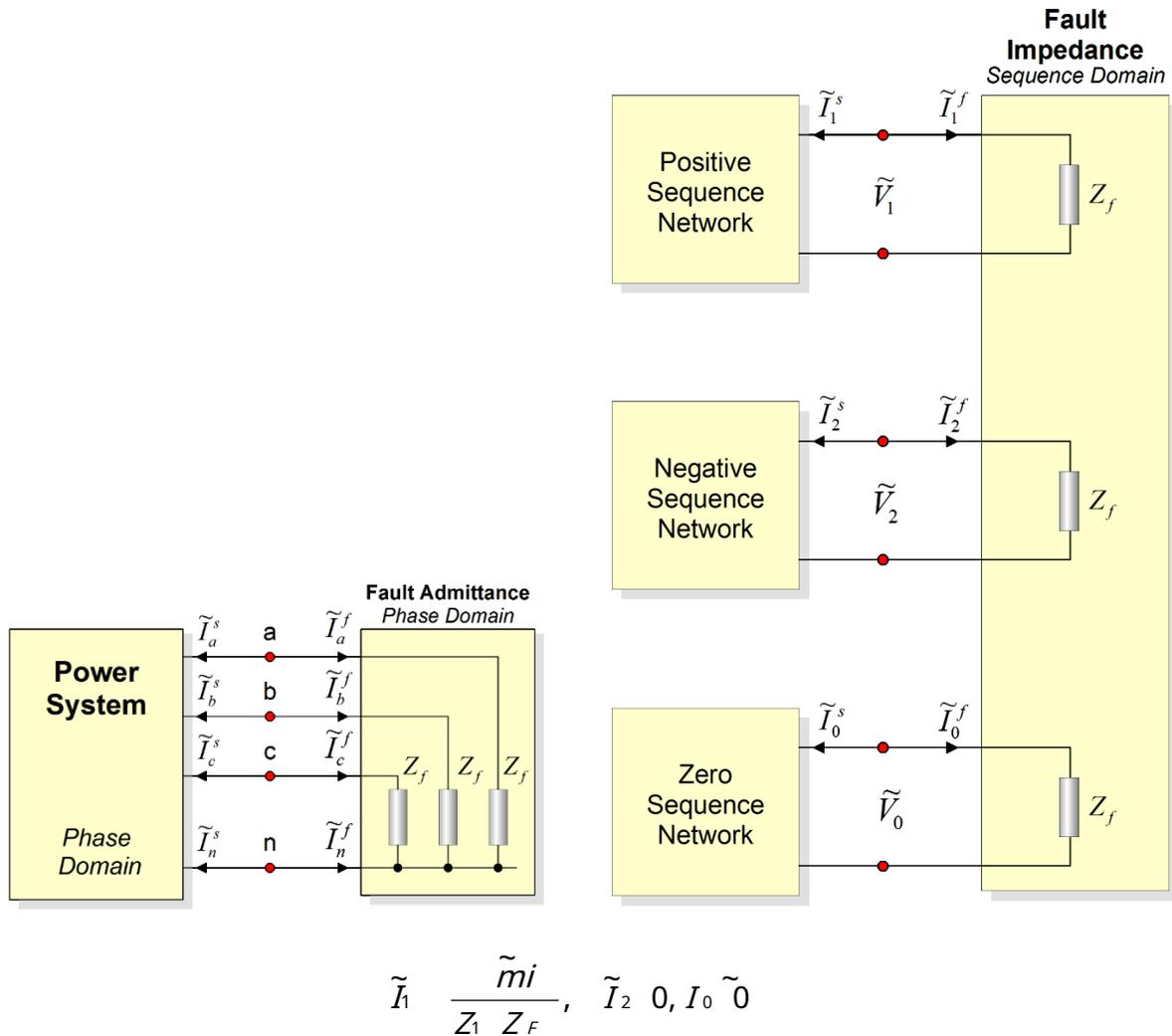
Tras la transformación de la ecuación anterior en el modelo de secuencia, tenemos

$$\begin{array}{ccccc}
 \tilde{I}_F & Y_F & 0 & 0 & \tilde{V}_1 \\
 \tilde{I}_2^F & 0 & Y_F & 0 & \tilde{V}_2 \\
 \tilde{I}_0^F & 0 & 0 & Y_F & \tilde{V}_0
 \end{array} \quad (4,20)$$

La ecuación (4.20) sugiere que una falla trifásica en los modelos de secuencia se representa con tres impedancias  $Z_F$  conectados a través de cada una de las redes de secuencia. Estas conexiones se ilustran en la Figura 4.2. Este procedimiento de análisis se ilustra a continuación con un ejemplo.



**Figura 4.2** Redes de secuencia y los equivalentes de Thevenin y Norton correspondientes  
 ( $Y_1=1/Z_1, Y_2=1/Z_2, Y_0=1/Z_0$ )



**Figura 4.3: Red de secuencia equivalente y modelo de falla para una falla trifásica**

**Ejemplo E4.1:** Considere el sistema de energía eléctrica de la Figura E4.1a. El sistema consta de un generador de 80 MVA, 60 Hz, 15 kV, un transformador elevador de 15kV / 115kV, 80 MVA, una línea de 115 kV de 28 millas y una carga eléctrica de impedancia constante conectada en triángulo. Suponga una falla trifásica en el punto A que está ubicado en la línea a 18 millas del transformador. Calcule la corriente de falla:

(a) despreciar la corriente de carga y (b) sin despreciar la corriente de carga. Usar simétrico teoría de componentes en los cálculos. Los datos del sistema son los siguientes:

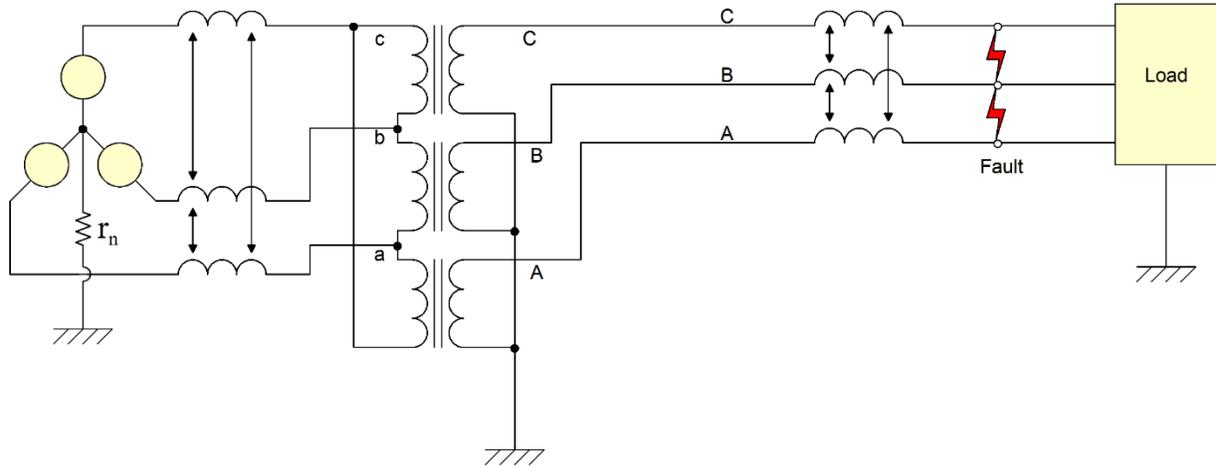
Generador:  $X'_1 \ j0,185 \ pu$     $X_2 \ j0,28 \ pu$     $X_0 \ j0,06 \ pu$     $r_{norte} \ 200 \ ohmios$

Transformador:  $X \ j0,10 \ pu$

Línea de transmisión:  $z_1 \ z_2 \ 0,3 \ j0,7334 \ ohmios / milla$ ,  $z_0 \ 0,34 \ j1,55 \ ohmios / milla$

Carga eléctrica (trifásica, delta conectada):  $z \ 500 \ j50 \ ohmios$ , cada pierna

Impedancia de derivación del transformador e impedancia de derivación capacitiva de la línea de transmisión deben ser ignorada.



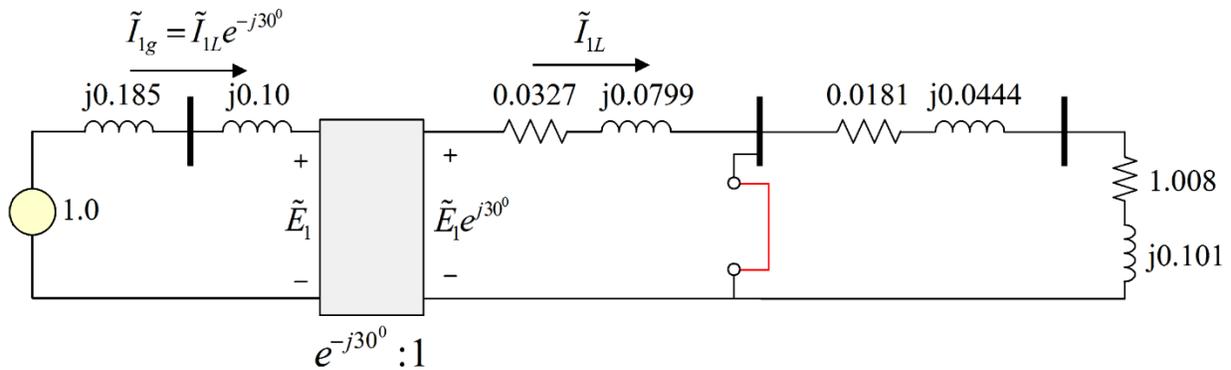
Cambiar figura: la secuencia de fases debe ser abc y ABC.

**Figura E4.1a: Ejemplo de sistema de energía con falla: falla trifásica**

**Solución:** Primero se desarrollará la red de secuencia del sistema. Usamos una base común de 80 MVA y las tensiones nominales correspondientes. Tenga en cuenta que en el lado de 115 kV la impedancia base es:

$$Z_B = \frac{115^2}{80} = 165,3 \text{ ohmios}$$

La red de secuencia positiva resultante se muestra en la Figura E4.1b.



**Figura E4.1b: Red de secuencia positiva del sistema de energía de la Figura E4.1a**

La corriente de falla de secuencia positiva es:

$$\tilde{I}_{1g} = \frac{1.0}{0.0327 + j0.3649} = 2.7295 \text{ mi}_{\beta 4,880} \text{ pu}$$

Las corrientes de fase en el lado del generador son:

$$\begin{array}{l} \tilde{I}_{ag} \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad \tilde{I}_{1\text{grano}} \quad 2.7295mi_{j84,880} \\ \tilde{I}_{bg} \quad a_2 \quad a \quad 1 \quad 0 \quad 2.7295mi_{j204,880} \text{ pu} \\ \tilde{I}_{cg} \quad a \quad a_2 \quad 1 \quad 0 \quad 2.7295mi_{j324,880} \end{array}$$

Las corrientes eléctricas en el lado de la línea se pueden calcular de la siguiente manera: En el transformador ideal:

$$\tilde{I}_{1\text{grano}}^* \quad \tilde{E}_{1L} \beta_{00} \tilde{I}^* \quad \tilde{I}_{1\text{grano}} \quad \tilde{E}_{2L} \beta_{00}$$

Por lo tanto, la corriente de falla de secuencia positiva en el lado de la línea es:  $\tilde{I}_{1L} = 2.7295mi_{j54,880} \text{ pu}$ .

Las corrientes de fase en la línea son:

$$\begin{array}{l} \tilde{I}_{Alabama} \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad \tilde{I}_{1L} \quad 2.7295mi_{j54,880} \\ \tilde{I}_{licenciado en Derecho} \quad a_2 \quad a \quad 1 \quad 0 \quad 2.7295mi_{j174,880} \text{ pu} \\ \tilde{I}_{CL} \quad a \quad a_2 \quad 1 \quad 0 \quad 2.7295mi_{j294,880} \end{array}$$

### 4.3 Análisis asimétrico de fallas: método de componente de secuencia

En esta sección examinamos las fallas asimétricas. Pueden ocurrir varios tipos de fallas asimétricas en el sistema. Proporcionamos una forma sistemática de analizar estas fallas.

#### 4.3.1 Fallo de línea a línea

Una falla de línea a línea ocurre siempre que una impedancia muy baja,  $Z_f$ , o muy alta admisión,  $Y_F = 1/Z_f$ , está conectado a través de dos fases. Suponiendo que las fases con falla son byc, el

las corrientes de falla son

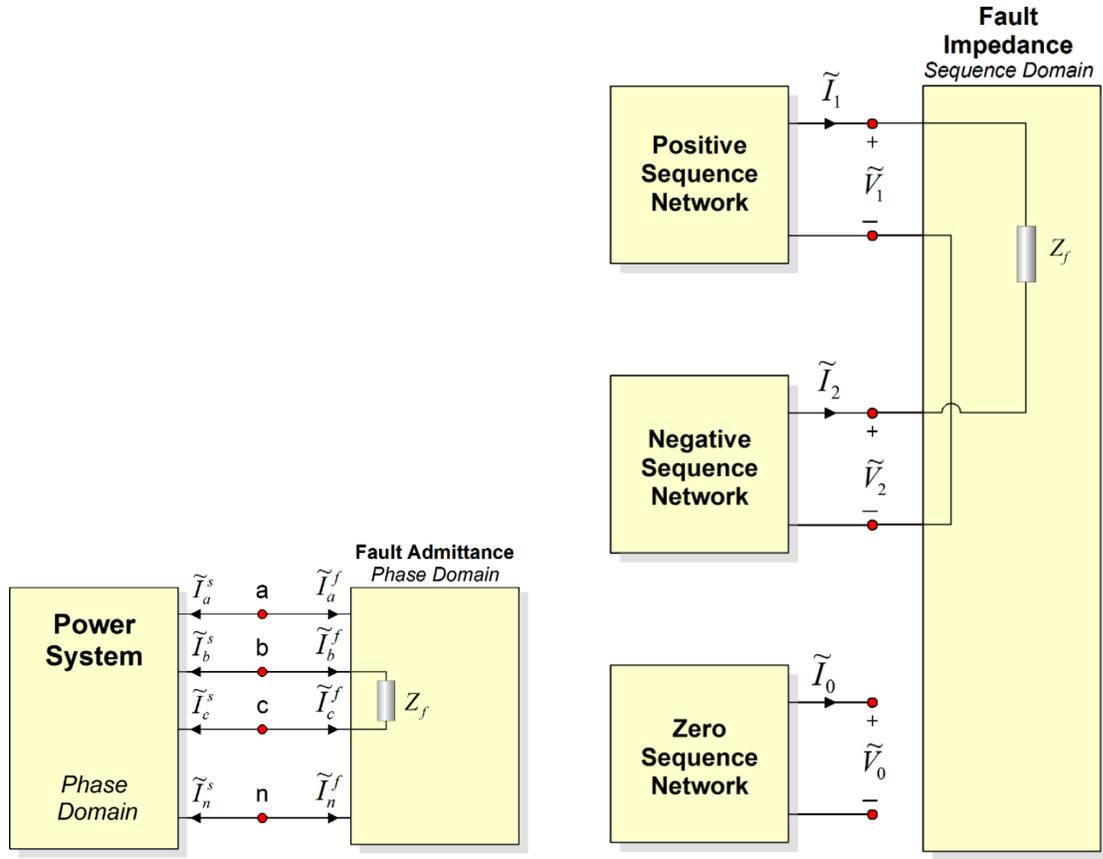
$$\tilde{I}_a^F = 0 \quad (4.21a)$$

$$\tilde{I}_b^F = Y_F \tilde{V}_b - \tilde{V}_c \quad (4.21b)$$

$$\tilde{I}_c^F = Y_F \tilde{V}_c - \tilde{V}_b \quad (4.21c)$$

Las ecuaciones (4.21) escritas en notación matricial compacta proporcionan la matriz de admitancia de fallas,  $Y_{ff}^{abc}$

$$\begin{array}{l} \tilde{I}_a^F \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \tilde{V}_a \\ \tilde{I}_b^F \quad 0 \quad Y_F \quad Y_F \quad \tilde{V}_b \\ \tilde{I}_c^F \quad 0 \quad Y_F \quad Y_F \quad \tilde{V}_c \end{array} \quad (4.22)$$



**Figura 4.4:** Red de secuencia equivalente y modelo de falla para una falla de línea a línea

Tras la transformación de la ecuación (4.22) en el modelo de secuencia, tenemos

$$\begin{array}{cccc}
 \tilde{I}_F^+ & Y_F & Y_F & 0 & \tilde{V}_1 \\
 \tilde{I}_F^- & Y_F & Y_F & 0 & \tilde{V}_2 \\
 \tilde{I}_0^F & 0 & 0 & 0 & \tilde{V}_0
 \end{array} \quad (4,23)$$

La matriz de admitancia anterior corresponde a una admitancia  $Y_F$  conectados entre las redes de secuencia positiva y negativa como se ilustra en la Figura 4.4.

**Ejemplo E4.2:** Considere el sistema de energía eléctrica de la Figura E4.2a. El sistema consta de un generador de 80 MVA, 60 Hz, 15 kV, un transformador elevador de 15kV / 115kV, 80 MVA, una línea de 115 kV de 28 millas y una carga eléctrica de impedancia constante conectada en triángulo. Suponga una falla de línea a línea en el punto A que se encuentra en la línea a 18 millas del transformador. Calcule la corriente de falla: (a) despreciando la corriente de carga y (b) sin despreciar la corriente de carga. Usar simétrico teoría de componentes en los cálculos. Los datos del sistema son los siguientes:

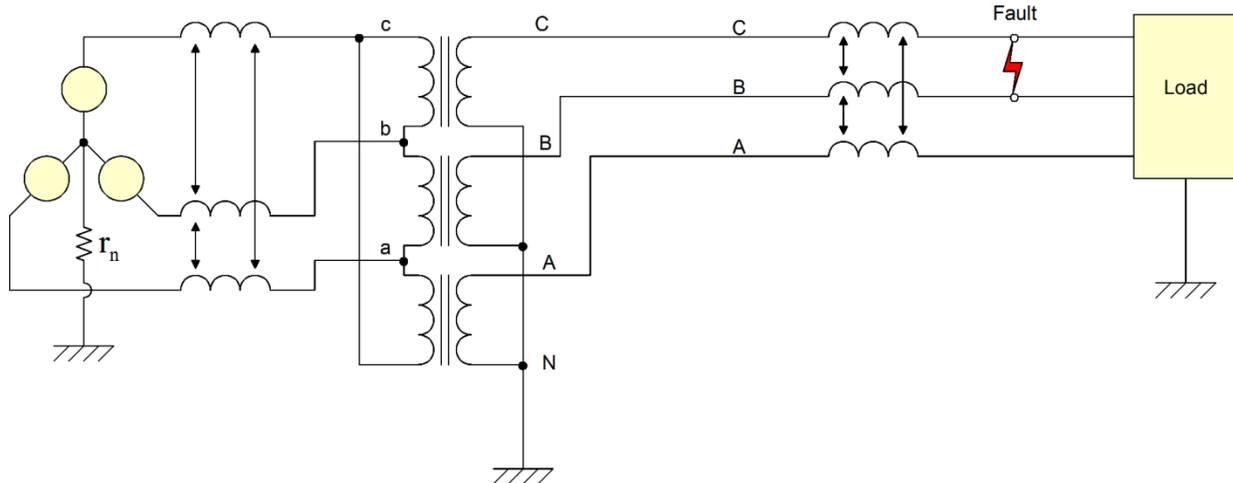
Generador:  $X'_1$  0,185 pu  $X_2$  j0,28 pu  $X_0$  j0,06 pu,  $r_{norte}$  200 ohmios

Transformador:  $X_1 \ X_2 \ X_0 \quad j0,10 \ pu$

Línea de transmisión:  $z \ z_0 \ 0,3 \ j0,7334 \text{ohmios} / \text{milla}, \quad z_0 \ 0,34 \ j1,55 \text{ohmios} / \text{milla}$

Carga eléctrica (trifásica, delta conectada):  $z \ 500 \ j50 \ \text{ohmios}, \ \text{cada pierna}$

La impedancia en derivación del transformador y la impedancia en derivación capacitiva de la línea de transmisión deben despreciarse.

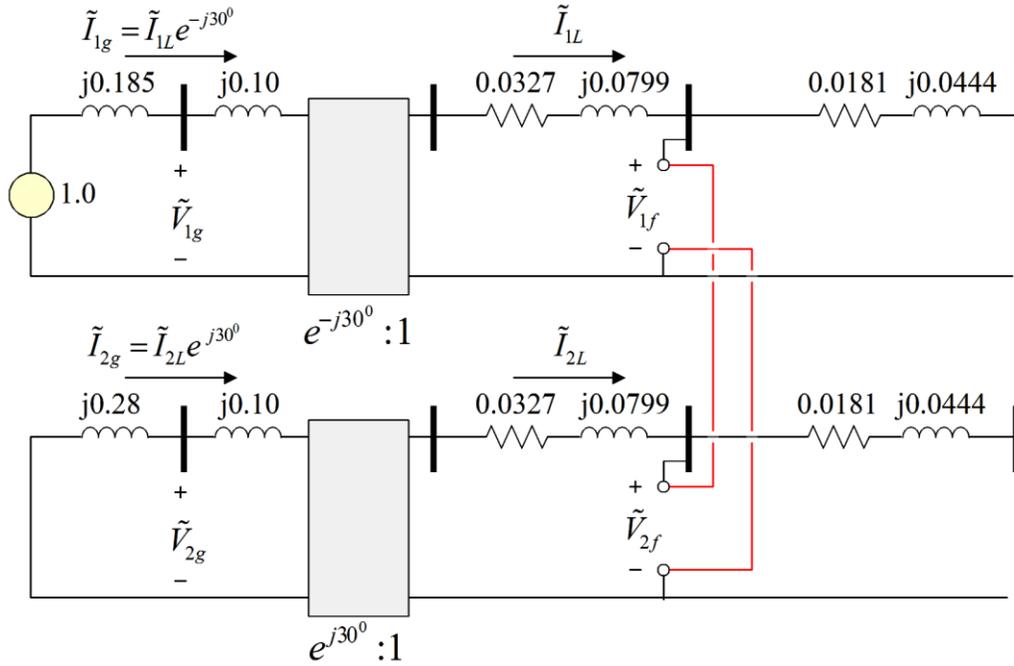


Cambiar figura: la secuencia de fases debe ser abc y ABC.

**Figura E4.2a: Ejemplo de sistema de energía con falla: falla de línea a línea**

**Solución:** Primero se desarrolla la red de secuencia del sistema y se ilustra en las Figuras E4.2b y E4.2c para el caso sin la carga eléctrica y con la carga eléctrica respectivamente. Tenga en cuenta que para este tipo de falla solo están involucrados los modelos de secuencia positiva y negativa. Posteriormente se conectan los modelos de secuencia positiva y negativa como se muestra en las Figuras.

- (a) La solución del circuito de la figura E4.2b produce las siguientes corrientes y voltajes de componentes simétricos (para completar incluimos los valores de secuencia cero que serán todo cero):



**Figura E4.2b: Redes de secuencia positiva y negativa del sistema de potencia de Figura E4.2a - Sin carga**

$$\begin{array}{ll} \tilde{I}_{1L} & 1.209 \text{ mi }_{j55,47^0} & \tilde{V}_{1L} & 0.5572 \text{ mi }_{j30,47^0} \\ \tilde{I}_{2L} & 1.209 \text{ mi }_{j124,53^0} & \tilde{V}_{2L} & 0.5572 \text{ mi }_{j30,47^0} \\ \tilde{I}_{0L} & 0.0 & \tilde{V}_{0L} & 0.0 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \tilde{I}_{1\text{gramo}} & 1.209 \text{ mi }_{j85,47^0} & \tilde{V}_{1\text{gramo}} & 0. \text{xxxx} \text{ mi }_{jyy^0} \\ \tilde{I}_{2\text{gramo}} & 1.209 \text{ mi }_{j154,53^0} & \tilde{V}_{2\text{gramo}} & 0.3384 \text{ mi }_{j153^0} \\ \tilde{I}_{0\text{gramo}} & 0.0 & \tilde{V}_{0\text{gramo}} & 0.0 \end{array}$$

$$\tilde{I}_{abc} = T_{120}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{I}_{1\text{gramo}} \\ \tilde{I}_{2\text{gramo}} \\ \tilde{I}_{0\text{gramo}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_2 \tilde{I}_{1\text{gramo}} \\ a \tilde{I}_{2\text{gramo}} \\ \tilde{I}_{0\text{gramo}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{I}_{1\text{gramo}} \\ \tilde{I}_{2\text{gramo}} \\ \tilde{I}_{0\text{gramo}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{xxx} \\ \text{xxx}e^{jyy^0} \\ \text{xxx}e^{jyy^0} \end{bmatrix}$$

$$\tilde{V}_{abc} = \begin{bmatrix} \tilde{V}_{1\text{gramo}} \\ \tilde{V}_{2\text{gramo}} \\ \tilde{V}_{0\text{gramo}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_2 \tilde{V}_{1\text{gramo}} \\ a \tilde{V}_{2\text{gramo}} \\ \tilde{V}_{0\text{gramo}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{V}_{1\text{gramo}} \\ \tilde{V}_{2\text{gramo}} \\ \tilde{V}_{0\text{gramo}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{xxx}e^{jyy^0} \\ \text{xxx}e^{jyy^0} \\ \text{xxx}e^{jyy^0} \end{bmatrix}$$

(b) La solución del circuito de la figura E4.2c produce las siguientes corrientes y voltajes de componentes simétricos (para completar, incluimos los valores de secuencia cero que serán todos cero):

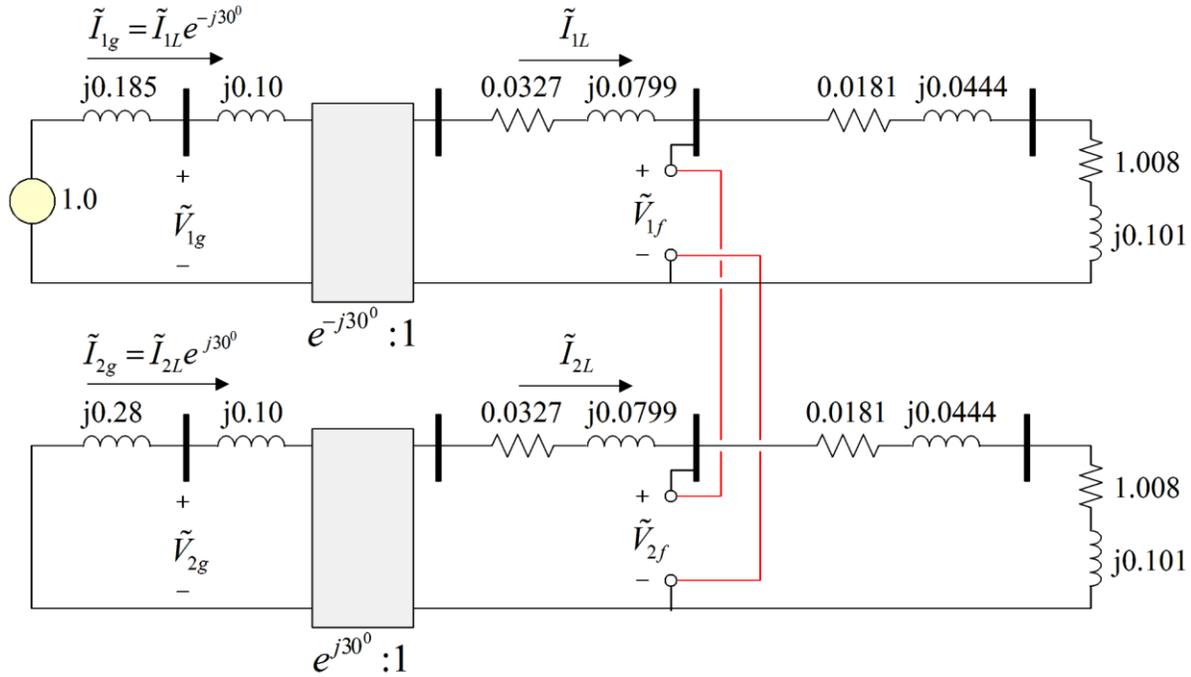


Figura E4.2c: Redes de secuencia positiva y negativa del sistema de potencia de Figura E4.2a - Con carga

$$\begin{array}{ll} \tilde{I}_{1L} & 1.543 \text{mi}_{\beta 88,71}^0 \\ \tilde{I}_{2L} & 1.049 \text{mi}_{\alpha 0}^{60} \\ \tilde{I}_{0L} & 0.0 \end{array}, \quad \begin{array}{ll} \tilde{V}_{1L} & 0.4834 \text{mi}_{\gamma 10,990} \\ \tilde{V}_{2L} & 0.4834 \text{mi}_{\gamma 10,990} \\ \tilde{V}_{0L} & 0.0 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \tilde{I}_{1_{\text{gramo}}} & 1.543 \text{mi}_{\beta 88,71}^{710} \\ \tilde{I}_{2_{\text{gramo}}} & 1.049 \text{mi}_{\beta 135,060} \\ \tilde{I}_{0_{\text{gramo}}} & 0.0 \end{array}, \quad \begin{array}{ll} \tilde{V}_{1_{\text{gramo}}} & \text{xxx}e_{\beta \gamma \gamma}^0 \\ \tilde{V}_{2_{\text{gramo}}} & \text{xxx}e_{\beta \gamma \gamma}^0 \\ \tilde{V}_{0_{\text{gramo}}} & \text{xxx}e_{\beta \gamma \gamma}^{y0} \end{array}$$

$$\tilde{I}_{abcg} = T_{120_{\text{gramo}}}^{-1} \begin{array}{l} \tilde{I}_{1_{\text{gramo}}} \\ \tilde{I}_{2_{\text{gramo}}} \\ \tilde{I}_{0_{\text{gramo}}} \end{array} = \begin{array}{l} a_2 \tilde{I}_{1_{\text{gramo}}} \\ a \tilde{I}_{2_{\text{gramo}}} \\ 2 \tilde{I}_{0_{\text{gramo}}} \end{array} = \begin{array}{l} \tilde{I}_{1_{\text{gramo}}} \\ \tilde{I}_{2_{\text{gramo}}} \\ \tilde{I}_{0_{\text{gramo}}} \end{array} = \begin{array}{l} \text{xxx}e_{\beta \gamma \gamma}^0 \\ \text{xxx}e_{\beta \gamma \gamma}^0 \\ \text{xxx}e_{\beta \gamma \gamma}^0 \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc}
 \tilde{V}_{abcg} & \tilde{V}_{\text{televisor}} & \tilde{V}_{1\text{gramo}} \tilde{V}_{2\text{gramo}} \tilde{V}_{0\text{gramo}} \\
 & & \tilde{u}_{\tilde{h}a} \tilde{V} \tilde{A} \tilde{V} \tilde{V} \\
 & & \tilde{A} \tilde{V}_{1\text{gramo}} \tilde{u}_{\tilde{h}a} \tilde{V}_{2\text{gramo}} \tilde{V}_{0\text{gramo}} \\
 & & \tilde{xxx}e \tilde{jjj}j^0 \\
 & & \tilde{xxx}e \tilde{jjj}j^0 \\
 & & \tilde{xxx}e \tilde{jjj}j^0
 \end{array}$$

### 4.3.2 Falla de línea a línea a tierra

Esta falla puede ocurrir de diferentes formas: por ejemplo, cuando se conecta una impedancia muy baja entre las fases byc y otra impedancia baja entre la fase by el neutro; o cuando se conecta una impedancia muy baja entre la fase by el neutro y otra entre la fase cy el neutro. Considere la última falla de línea a línea a tierra y suponga que la impedancia de falla es  $Z_f$ . Las corrientes de falla serán

Análisis de fallas del sistema de energía

$$\tilde{I}_a^F = 0 \quad (4.24a)$$

$$\tilde{I}_b^F = Y_f \tilde{V}_b \quad (4.24b)$$

$$\tilde{I}_c^F = Y_f \tilde{V}_c \quad (4.24c)$$

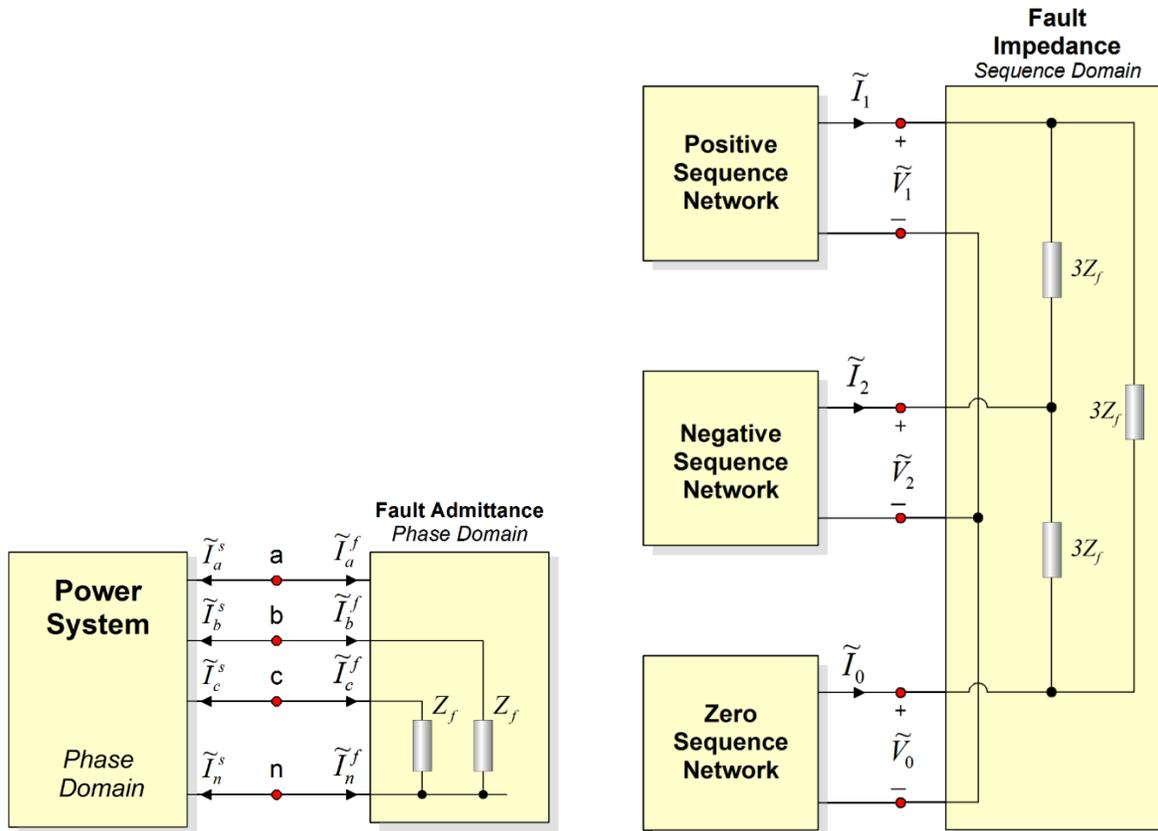
Las ecuaciones (4.24) escritas en notación matricial compacta proporcionan la matriz de admitancia de fallas,  $Y_{f,abc}$

$$\begin{array}{ccc}
 \tilde{I}_a^F & 0 & 0 & 0 & \tilde{V}_a \\
 \tilde{I}_b^F & 0 & Y_f & 0 & \tilde{V}_b \\
 \tilde{I}_c^F & 0 & 0 & Y_f & \tilde{V}_c
 \end{array} \quad \begin{array}{c} \tilde{V}_a \\ \tilde{V}_b \\ \tilde{V}_c \end{array} \quad (4.25)$$

Tras la transformación de la Ec. (4.25) en el modelo de secuencia, obtenemos

$$\begin{array}{ccc}
 \tilde{I}_1^F & 2Y_f/3 & Y_f/3 & Y_f/3 & \tilde{V}_1 \\
 \tilde{I}_2^F & Y_f/3 & 2Y_f/3 & Y_f/3 & \tilde{V}_2 \\
 \tilde{I}_0^F & Y_f/3 & Y_f/3 & 2Y_f/3 & \tilde{V}_0
 \end{array} \quad (4.26)$$

La ecuación de la matriz de admitancia (4.26) representa un circuito que conecta una admitancia de  $Y_f/3$  entre cualquier par de redes de secuencia. Estas conexiones se ilustran en la Figura 4.5. Si la admitancia de la falla es infinita (la impedancia de la falla es cero), la Figura 4.9 sugiere que las tres redes de secuencia están conectadas en paralelo.



**Figura 4.5: Red de secuencia equivalente y modelo de falla para una línea a línea a tierra**

**Ejemplo E4.3:** Considere el sistema de energía eléctrica de la Figura E4.3a. El sistema consta de un generador de 80 MVA, 60 Hz, 15 kV, un transformador elevador de 15kV / 115kV, 80 MVA, una línea de 115 kV de 28 millas y una carga eléctrica de impedancia constante conectada en triángulo. Suponga una falla de línea a línea a tierra en el punto A que se encuentra en la línea a 18 millas del transformador. Calcule la corriente de falla: (a) despreciando la corriente de carga y (b) sin despreciar la corriente de carga. Usar Teoría de componentes simétricos en los cálculos. Los datos del sistema son los siguientes:

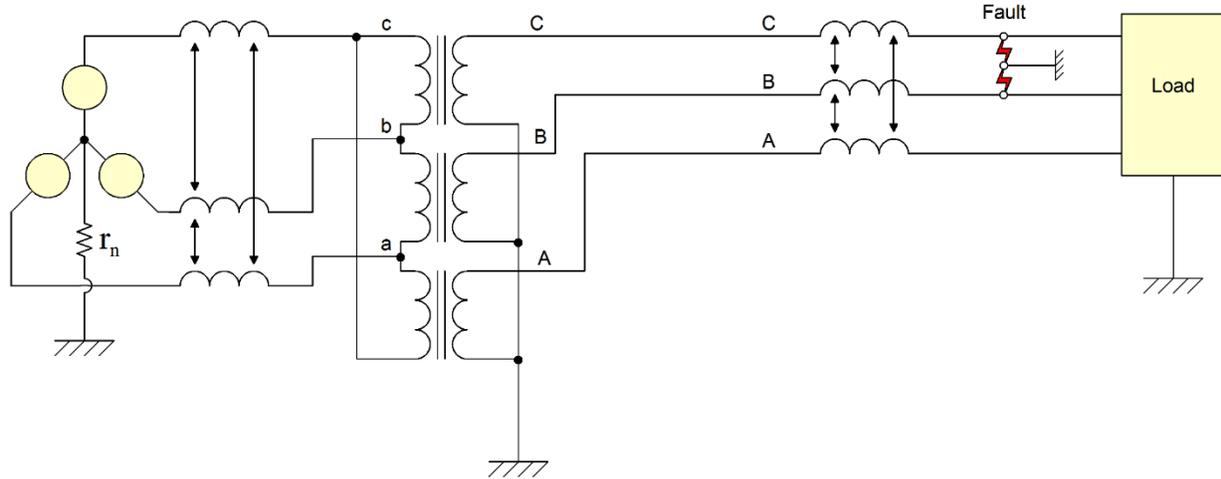
Generador:  $X'_1 \ j0,185 \ pu$     $X_2 \ j0,28 \ pu$     $X_0 \ j0,06 \ pu$ ,  $r_{norte} \ 200 \ ohmios$

Transformador:  $X \ X_2 \ X \ j0,10 \ pu$

Línea de transmisión:  $z_1 \ z_2 \ 0,3 \ j0,7334 \ ohmios / milla$ ,  $z_0 \ 0,34 \ j1,55 \ ohmios / milla$

Carga eléctrica (trifásica, delta conectada):  $z \ 500 \ j50 \ ohmios$ , cada pierna

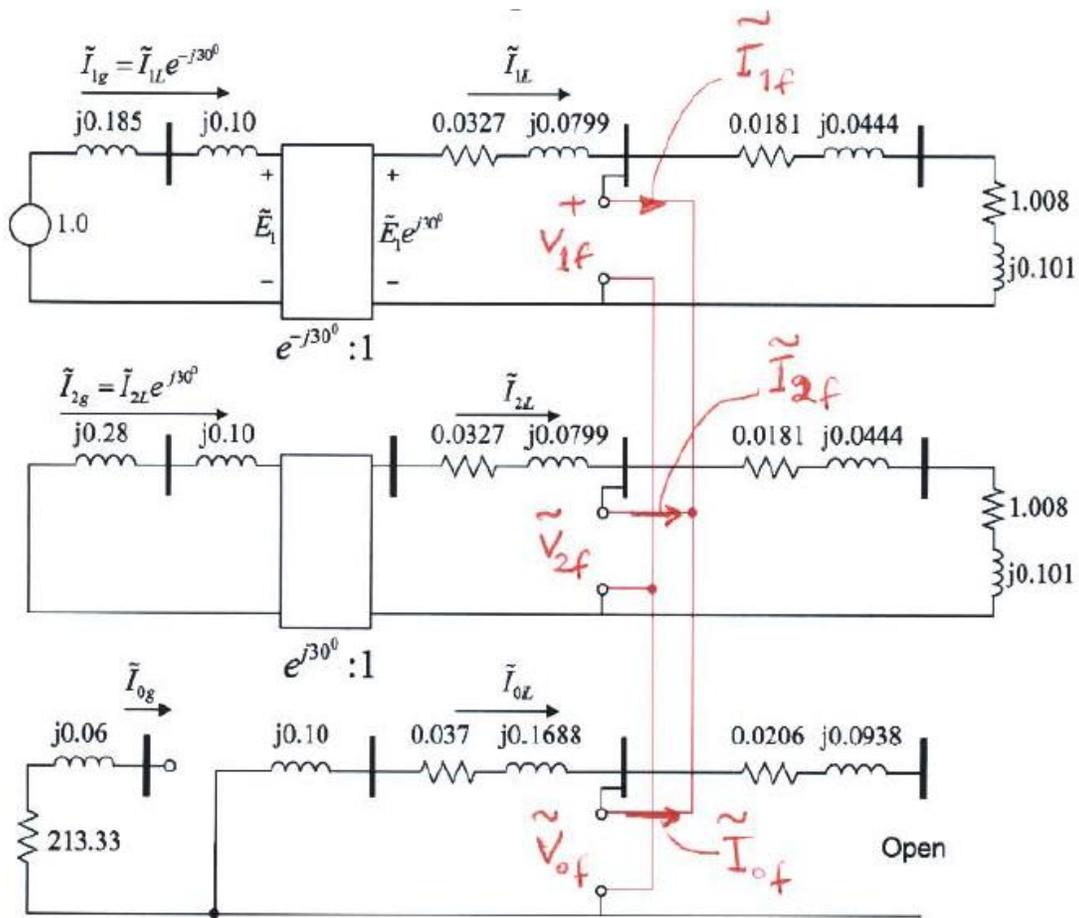
La impedancia en derivación del transformador y la impedancia en derivación capacitiva de la línea de transmisión deben descuidado.



Cambiar figura: la secuencia de fases debe ser abc y ABC.

**Figura E4.3a: Ejemplo de sistema de energía con falla: falla de línea doble a tierra**

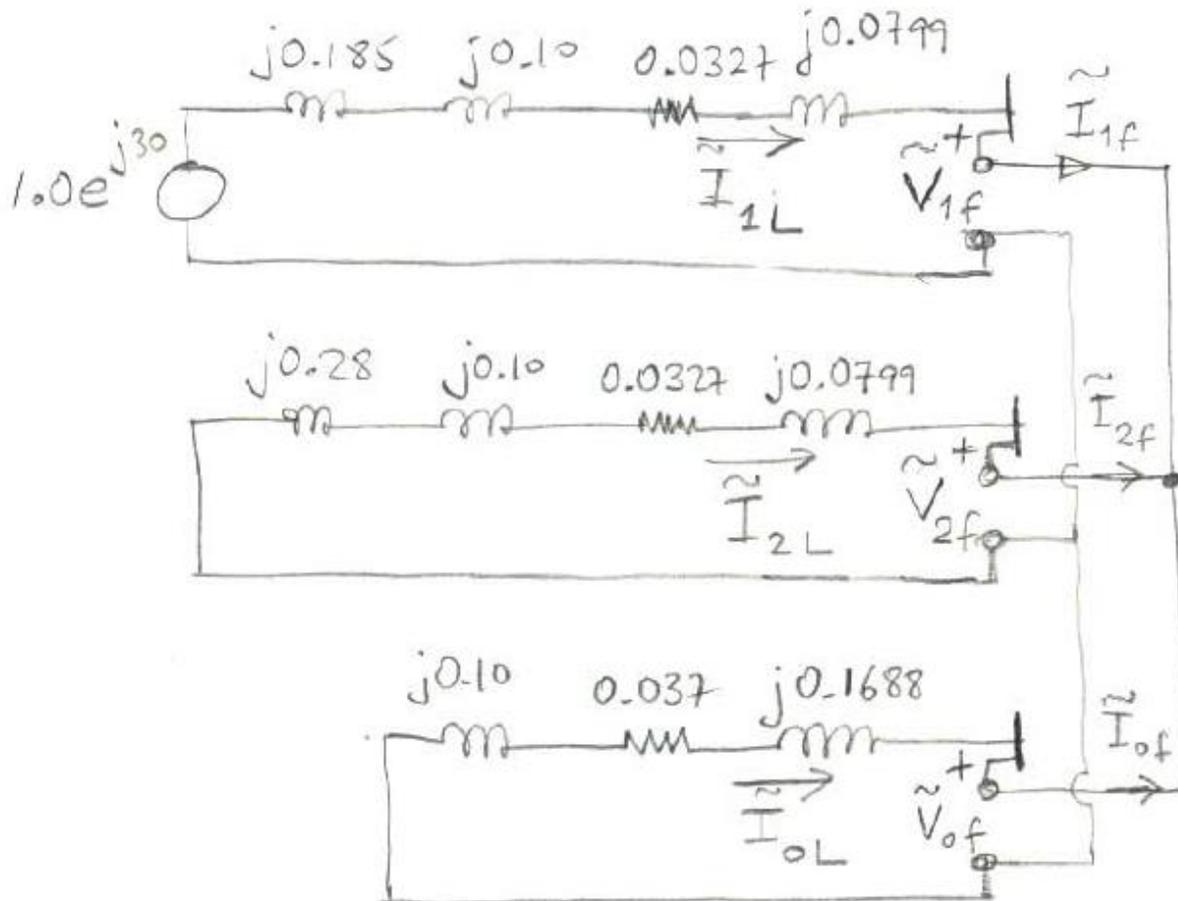
**Solución:** Primero se desarrolla la red de secuencia positiva, negativa y cero del sistema. Las redes resultantes se muestran en la Figura E4.3b. Las conexiones en el lugar de la falla para un Las fallas de doble línea a tierra también se indican en la figura.



**Figura E4.3b: Redes de secuencia del sistema de energía de la Figura E4.1a**

Para el caso (a), el circuito a la derecha de la falla se descuidará ya que no fluirá corriente eléctrica allí si se quita la carga. Para el caso (b) se aplica el circuito de la figura E4.3b.

**Caso a:** El circuito aplicable se muestra en la Figura E4.3c. Dado que los voltajes de secuencia positiva, negativa y cero en la ubicación de la falla son iguales, se puede escribir una ecuación KCL que tendrá solo este voltaje como desconocido. Sigue la ecuación.



**Figura E4.3c: Circuito de secuencia aplicable al caso (a)**

$$\begin{matrix} \tilde{V} & & \tilde{V} & & \tilde{V} & & 0 \\ \hline 0.0327 & j0.3649 & 0.0327 & j0.4599 & 0.037 & j0.2688 & \end{matrix}$$

La solución de la ecuación anterior produce:  $\tilde{V}_1 = 0.31811 \angle 29.10^\circ$ . Posteriormente los siguientes son calculados:

$$\tilde{I}_{1F} \quad \tilde{I}_{1L} \quad \frac{\tilde{V}_1 1.0 \text{mi}_{j30^\circ}}{0.0327 \quad j0.3649} \quad 1.861402 \text{mi}_{j54.459^\circ}$$

$$\tilde{I}_{2F} \quad \tilde{I}_{2L} \quad \frac{\tilde{V}_1 F}{0.0327 \quad j0.4599} \quad 0,689952 \text{mi}_{j123.167^\circ}$$

$$\tilde{I}_{0F} \quad \tilde{I}_{0L} \quad \frac{\tilde{V}_1 F}{0,037 \quad j0.2688} \quad 1.17239 \text{mi}_{j126.937^\circ}$$

Las corrientes de falla son:

$$\tilde{I}_{abcl} \quad T_{120L} \quad \tilde{I}_{1L} \quad \tilde{I}_{2L} \quad \tilde{I}_{0L} \quad 0.0$$

$$\tilde{I}_{abcl} \quad T_{120L} \quad \tilde{I}_{1L} \quad \tilde{I}_{2L} \quad \tilde{I}_{0L} \quad 2.872178 \text{mi}_{j177.172^\circ}$$

$$\tilde{I}_{abcl} \quad T_{120L} \quad \tilde{I}_{1L} \quad \tilde{I}_{2L} \quad \tilde{I}_{0L} \quad 2.77428 \text{mi}_{j74.207^\circ}$$

**Caso b:** El circuito aplicable se muestra en la Figura E4.3b. Dado que los voltajes de secuencia positiva, negativa y cero en la ubicación de la falla son iguales, se puede escribir una ecuación KCL que tener solo este voltaje como desconocido. Sigue la ecuación.

$$\frac{\tilde{V}}{0.0327 \quad j0,3649} + \frac{\tilde{V}}{1,0261 \quad j0,1454} + \frac{\tilde{V}}{0,0327 \quad j0.4599} + \frac{\tilde{V}}{1.0261 \quad j0,1454} + \frac{\tilde{V}}{0,037 \quad j0.2688} = 0$$

La solución de la ecuación anterior produce:  $\tilde{V}_1 = 0.295349 \text{mi}_{j17.414^\circ}$ . Posteriormente los siguientes son calculado:

$$\tilde{I}_{1F} \quad \frac{\tilde{V}_1 1.0 \text{mi}_{j30^\circ}}{0.0327 \quad j0,3649} + \frac{\tilde{V}_1 F}{1,0261 \quad j0.1454} \quad 1.820633 \text{mi}_{j57.429^\circ}$$

$$\tilde{I}_{2F} \quad \frac{\tilde{V}_1 F}{0.0327 \quad j0.4599} + \frac{\tilde{V}_1 F}{1.0261 \quad j0.1454} \quad 0,753862 \text{mi}_{j133.172^\circ}$$

$$\tilde{I}_{0F} \quad \frac{\tilde{V}_1 F}{0,037 \quad j0.2688} \quad 1.088507 \text{mi}_{j115.252^\circ}$$

Las corrientes de falla son:

$$\tilde{I}_{abcf} \quad T_{120F} \quad \tilde{I}_{1F} \quad \tilde{I}_{2F} \quad \tilde{I}_{0F} \quad 0.0$$

$$\tilde{I}_{abcf} \quad T_{120F} \quad \tilde{I}_{1F} \quad \tilde{I}_{2F} \quad \tilde{I}_{0F} \quad 2.50795 \text{mi}_{j175.856^\circ}$$

$$\tilde{I}_{abcf} \quad T_{120F} \quad \tilde{I}_{1F} \quad \tilde{I}_{2F} \quad \tilde{I}_{0F} \quad 2.985593 \text{mi}_{j68.209^\circ}$$

### 4.3.3 Falla de línea única a tierra

Esta falla ocurre siempre que una impedancia baja,  $Z_F$ , está conectado entre una fase y el neutro. Suponiendo que la fase en falla es la fase a, las corrientes de falla son

$$\tilde{I}_{\bar{a}} = \frac{\tilde{V}_a}{Z_F} Y_F \tilde{V}_a \quad (4.27a)$$

$$\tilde{I}_{\bar{b}} = 0 \quad (4.27b)$$

$$\tilde{I}_{\bar{c}} = 0 \quad (4.27c)$$

En compacto m notación atrix la ecuación anterior leer

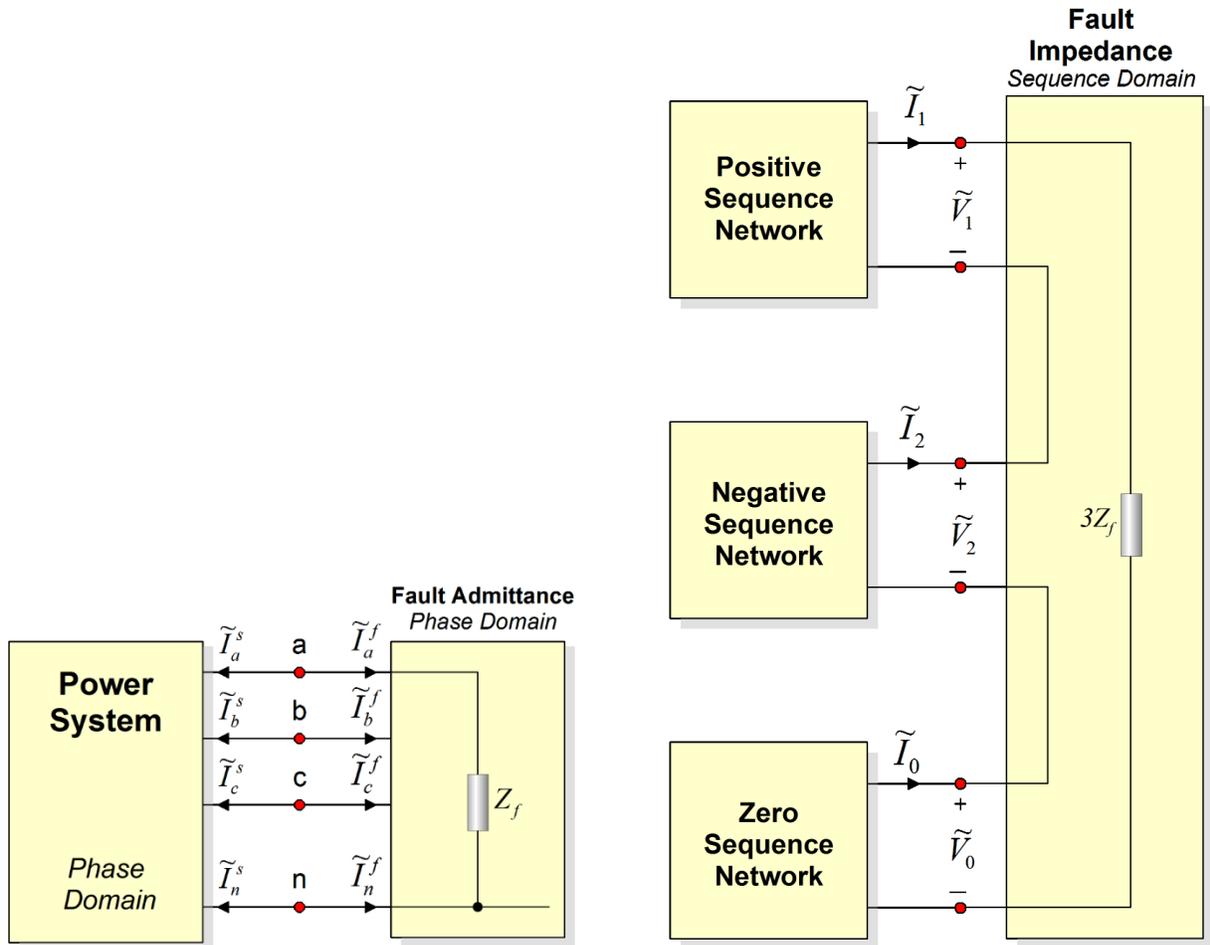
$$\begin{bmatrix} \tilde{I}_{\bar{a}} \\ \tilde{I}_{\bar{b}} \\ \tilde{I}_{\bar{c}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{V}_a \\ \tilde{V}_b \\ \tilde{V}_c \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

Tras la transformación de la ecuación anterior en el modelo de ecuación, tenemos

$$\begin{bmatrix} \tilde{I}_{1F} \\ \tilde{I}_{2F} \\ \tilde{I}_{0F} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_F/3 & Y_F/3 & Y_F/3 \\ Y_F/3 & Y_F/3 & Y_F/3 \\ Y_F/3 & Y_F/3 & Y_F/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{V}_1 \\ \tilde{V}_2 \\ \tilde{V}_0 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

La conectividad de las redes de secuencia de la Ecuación (4.29) no es obvia. Observe que la ecuación (4.29) establece que todas las corrientes de secuencia son idénticas, es decir,

$$\tilde{I}_{1F} = \tilde{I}_{2F} = \tilde{I}_{0F} = \frac{Y_F}{3} \tilde{V}_1 = \frac{Y_F}{3} \tilde{V}_2 = \frac{Y_F}{3} \tilde{V}_0 = \frac{1}{3Z_F} \tilde{V}_1 = \frac{1}{3Z_F} \tilde{V}_2 = \frac{1}{3Z_F} \tilde{V}_0$$



**Figura 4.6 Red de secuencia equivalente y modelo de falla para una línea a tierra Culpa**

Estas ecuaciones se satisfacen solo si las redes de secuencia están conectadas en serie con la impedancia  $3Z_f$ . Las conexiones se ilustran en la Figura 4.6.

**Ejemplo E4.4** Considere el sistema de energía eléctrica de la Figura E4.4a. El sistema consta de un generador de 80 MVA, 60 Hz, 15 kV, un transformador elevador de 15kV / 115kV, 80 MVA, una línea de 115 kV de 28 millas y una carga eléctrica de impedancia constante conectada en triángulo. Suponga una falla monofásica a tierra en el punto A que está ubicado en la línea a 18 millas del transformador. Calcule la corriente de falla: (a) despreciando la corriente de carga y (b) sin despreciar la corriente de carga. Utilice la teoría de componentes simétricos en los cálculos. Los datos del sistema son los siguientes:

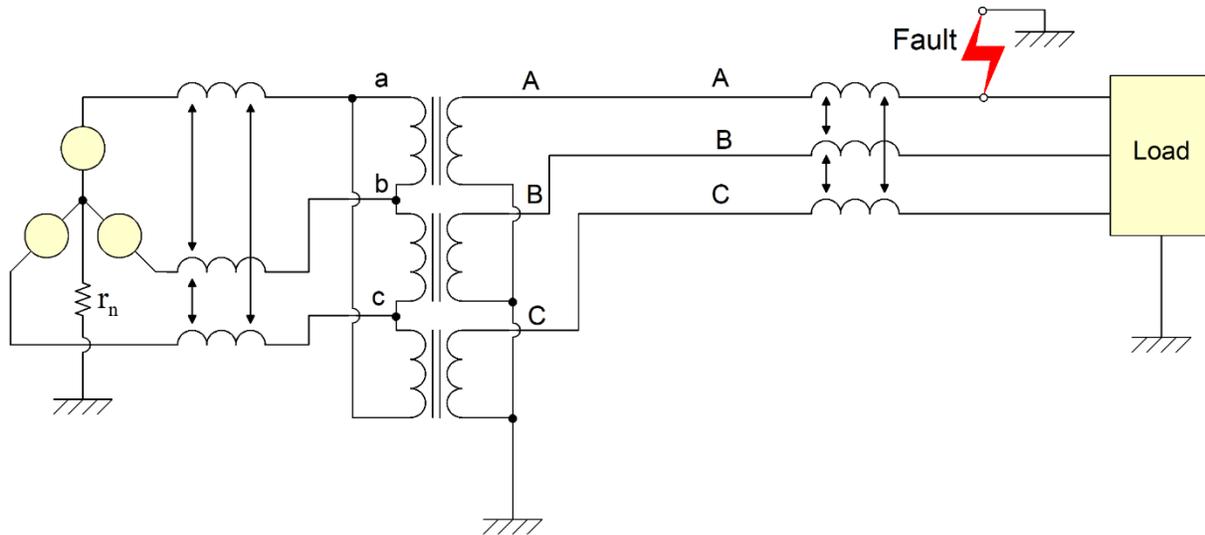
Generador:  $X_1' 0,185 pu$   $X_2 j0,28 pu$   $X_0 j0,06 pu$   $r_{norte} 50 ohmios$   
en las clasificaciones del generador

Transformador:  $X_1 X_2 X_0 0 pu$  en las clasificaciones anteriores

Línea de transmisión:  $z_1 z_2 0,3 j0,7334 ohmios / milla$ ,  $z_0 0,34 j1,55 ohmios / milla$

Carga eléctrica (trifásica, delta conectada):  $z_1 = z_2 = 500 \angle 50^\circ \text{ ohmios}$   $z_0 =$

La impedancia en derivación del transformador y la impedancia en derivación capacitiva de la línea de transmisión deben despreciarse.

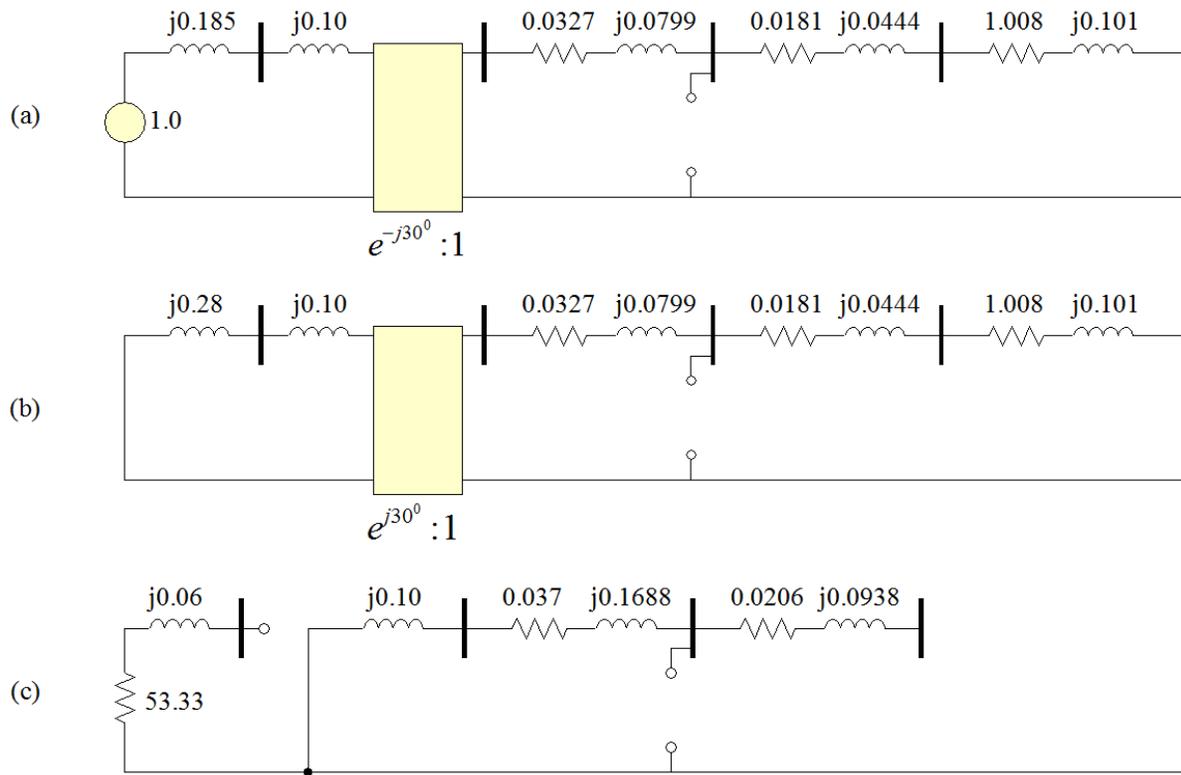


**Figura E4.4a: Ejemplo de sistema de energía con falla: falla de línea única a tierra**

**Solución:** Primero, cada elemento del sistema de energía se reemplaza con el circuito equivalente de secuencia. Este proceso crea la red de secuencia del sistema como se ilustra en la Figura E4.4a. Tenga en cuenta que todas las impedancias se han convertido en pu sobre una base de 80 MVA. Al nivel de 115 kV, la impedancia base es:

$$Z_B = \frac{115^2}{80} = 165,3 \text{ ohmios}$$

Las redes de secuencia se construyen e ilustran en la Figura E4.4b. La figura ilustra el carga eléctrica también.



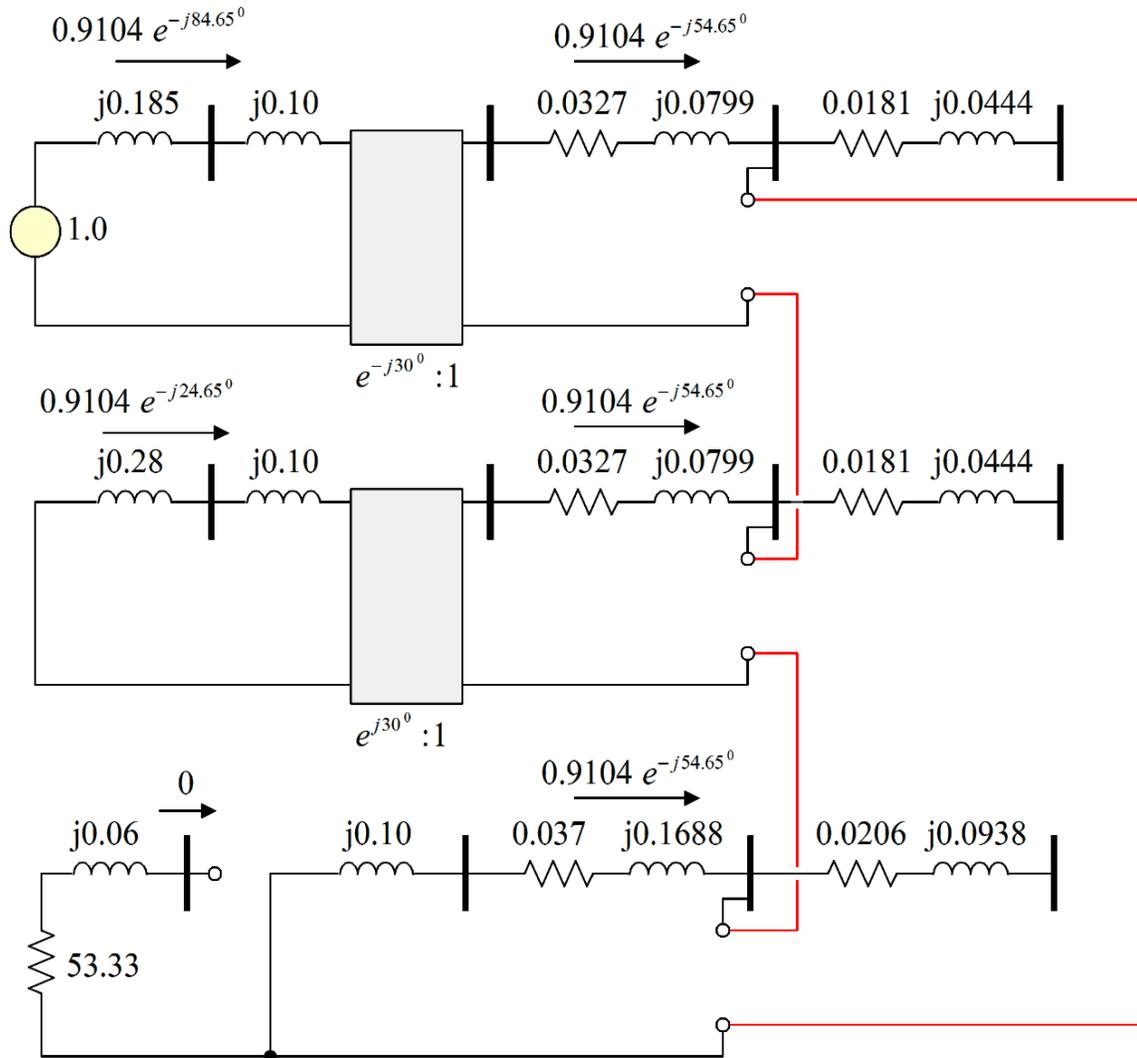
**Figura E4.4b. Redes de secuencia para el sistema de energía de la Figura E4.2.**  
**(a) secuencia positiva, (b) secuencia negativa, (c) secuencia cero**

(a) Se desprecia la carga eléctrica. En este caso, las redes de secuencia equivalente de Thevenin se construyen a partir del circuito de la figura E4.4a eliminando la carga eléctrica. En este caso, la parte del circuito en el lado derecho de la ubicación de la falla no transportará corriente eléctrica y no afectará los resultados. Las corrientes de secuencia son

$$\tilde{I}_1 \quad \tilde{I}_2 \quad \tilde{I}_0 \sim \frac{1.0 \angle -j30^\circ}{0.1024 \angle j1.0936} = 0,9104 \angle -j54,65 \text{ pu}$$

La distribución de la corriente eléctrica se ilustra en la Figura E4.4c. Las corrientes eléctricas de fase en el ubicación de la falla son:

$$\begin{aligned} \tilde{I}_a &= 3\tilde{I}_1 = 2,7312 \angle -j54,65 \text{ pu} \quad \text{o } 1.096,9 \angle -j54,65 \text{ Amperios} \\ \tilde{I}_B &= 0 \\ \tilde{I}_C &= 0 \end{aligned}$$



**Figura E4.4c Circuitos equivalentes de secuencia y flujo de corriente eléctrica - Eléctrico**  
**La carga se descuida**

Los componentes simétricos de los voltajes en el lugar de la falla son:

$$\begin{aligned} \tilde{V}_{F1} &= 1.0 m_{i\beta} \begin{pmatrix} 0.0327 & j0.3649 \\ 0.0327 & j0.4599 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.9104 m_{i j}^{j54.65^\circ} \\ 0.6665 m_{i j}^{j29.88^\circ} \end{pmatrix} \\ \tilde{V}_{F2} &= \begin{pmatrix} 0.0327 & j0.4599 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.9104 m_{i j}^{j54.65^\circ} \\ 0.4197 m_{i j}^{j148.72^\circ} \end{pmatrix} \\ \tilde{V}_{F0} &= \begin{pmatrix} 0.0370 & j0.2688 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.9104 m_{i j}^{j54.65^\circ} \\ 0.2470 m_{i j}^{j152.49^\circ} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Los voltajes de fase en el lugar de la falla son:

$$\tilde{V}_{fabc} = \text{televisor}_{F120} \tilde{V}$$

$$\tilde{V}_a = \tilde{V}_1 + \tilde{V}_2 + \tilde{V}_0 = 0 \quad \tilde{V}_b = 0 \quad \tilde{V}_c = 0$$

$$\begin{aligned} \tilde{V}_B a_2 V \tilde{A} V \tilde{V}_2 & \sim \tilde{V}_0 0,6665 mi_{j_{90,12}} \quad 0,4197 mi_{j_{28,72}} \quad 0,2470 mi_{j_{152,49}} \quad 0,9933 mi_{j_{81,454}} \\ \tilde{V}_C a \tilde{V}_1 a_2 V \tilde{V}_2 & \sim \tilde{V}_0 0,6665 mi_{j_{149,88}} \quad 0,4197 mi_{j_{268,72}} \quad 0,2470 mi_{j_{152,49}} \quad 1,0283 mi_{j_{141,51}} \end{aligned}$$

Las corrientes eléctricas del generador se muestran en la figura. Los componentes simétricos del voltajes en los terminales del generador son:

$$\begin{aligned} \tilde{V}_{gramo1} & 1.0 \quad (j0,185) \quad 0,9104 mi_{j_{84,65}} \quad 0,8325 mi_{j_{1,08}} \\ \tilde{V}_{gramo2} & (j0,28) \quad 0,9104 mi_{j_{24,65}} \quad 0,2549 mi_{j_{14,65}} \\ \tilde{V}_{gramo0} & 0 \end{aligned}$$

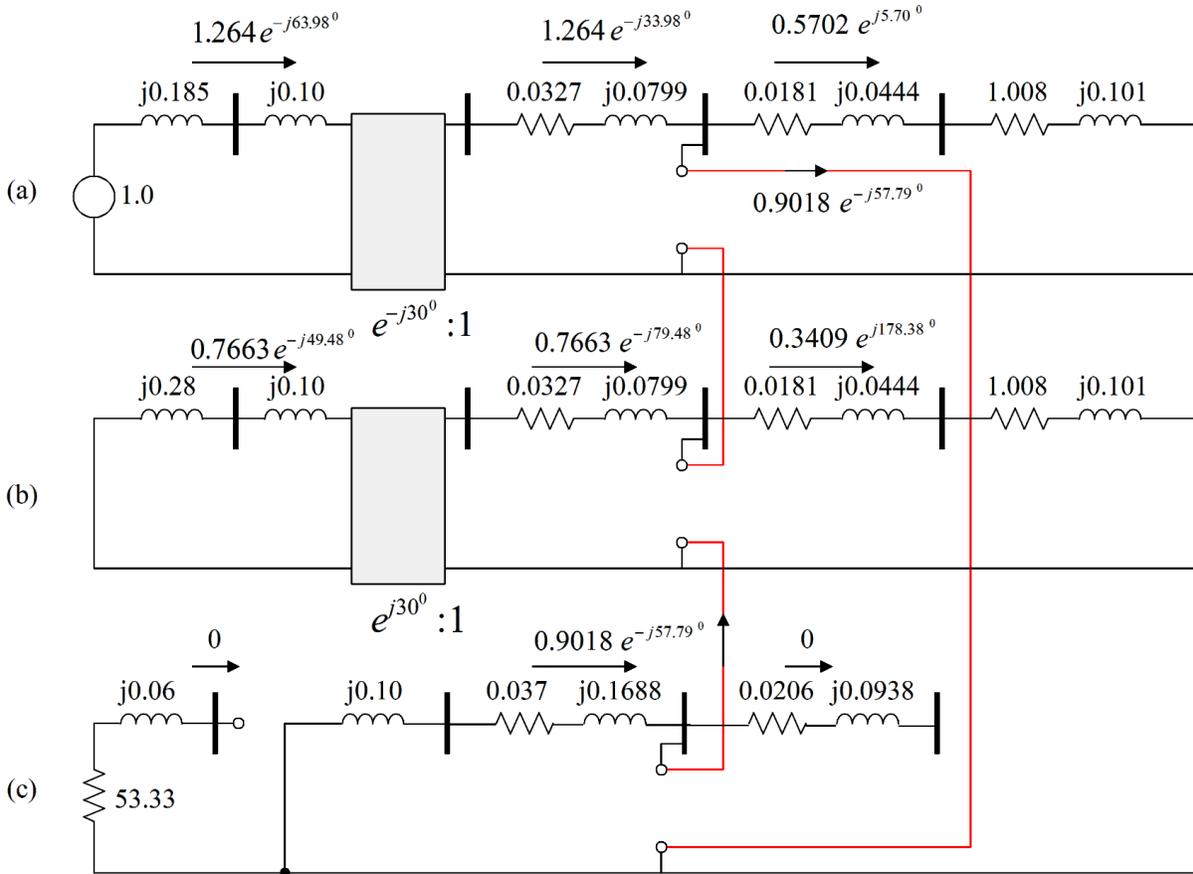
Los voltajes de fase en los terminales del generador son:

$$\begin{aligned} \tilde{V}_{abc} & \text{televisor}_{gramo120} \\ \tilde{V}_{Georgia} \tilde{V}_{gramo1} \tilde{V}_{gramo2} \tilde{V}_{gramo0} & 0,8325 mi_{j_{1,08}} \quad 0,2549 mi_{j_{14,65}} \quad 0,7670 mi_{j_{18,81}} \\ \tilde{V}_{gb} a_2 \tilde{V}_{gramo1} \tilde{A} \tilde{V}_{gramo2} \tilde{V}_{gramo0} & 0,8325 mi_{j_{21,08}} \quad 0,2549 mi_{j_{5,35}} \quad 0,7113 mi_{j_{104,32}} \\ \tilde{V}_{GC} \tilde{A} \tilde{V}_{gramo1} a_2 \tilde{V}_{gramo2} \tilde{V}_{gramo0} & 0,8325 mi_{j_{18,92}} \quad 0,2549 mi_{j_{234,65}} \quad 1,0862 mi_{j_{120,43}} \end{aligned}$$

Las corrientes de fase en los terminales del generador son:

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{g, abc} & \tilde{I}_{gramo,120} \\ \tilde{I}_{Georgia} \tilde{I}_{gramo1} \tilde{I}_{gramo2} \tilde{I}_{gramo0} & 0,9104 mi_{j_{84,65}} \quad 0,9104 mi_{j_{24,65}} \quad 1,5768591 mi_{j_{54,65}} \\ \tilde{I}_{gb} 2 \tilde{I}_{gramo1} \tilde{I}_{gramo2} \tilde{I}_{gramo0} & 0,9104 mi_{j_{155,35}} \quad 0,9104 mi_{j_{95,35}} \quad 1,5768591 mi_{j_{125,35}} \\ \tilde{I}_C 2 \tilde{I}_{gramo1} \tilde{I}_{gramo2} \tilde{I}_{gramo0} & 0,9104 mi_{j_{95,35}} \quad 0,9104 mi_{j_{144,65}} \quad 0 \end{aligned}$$

(b) No se descuida la carga eléctrica. En este caso, las redes de secuencia equivalente y su interconexión para la línea única a la falla a tierra se ilustra en la Figura E4.4c. Este circuito se puede resolver mediante cualquier método de análisis de circuitos, es decir, análisis de bucle, análisis nodal, etc. La solución es mostrado en la Figura E4.4d.



**Figura E4.4d. Circuitos equivalentes de secuencia y flujo de corriente eléctrica: la carga eléctrica es Incluido**

Las corrientes eléctricas del generador (componentes simétricos) se muestran en la Figura E4.4c. La Las corrientes eléctricas de fase del generador son:

$$\tilde{I}_{\text{gramo1},2,3} \quad \tilde{I}_{\text{gramo1,2,0}}$$

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{\text{gramo1}} &= 1.264 \text{ mi}_{j63.98^0} \quad 0.7663 \text{ mi}_{j49.48^0} \quad 2.0150 \text{ mi}_{j58.51^0} \\ \tilde{I}_{\text{gramo2}} &= 0.7663 \text{ mi}_{j183.98^0} \quad 1.264 \text{ mi}_{j79.48^0} \quad 1.2910 \text{ mi}_{j141.13^0} \\ \tilde{I}_{\text{gramo0}} &= 0.9018 \text{ mi}_{j57.79^0} \quad 0.7663 \text{ mi}_{j169.48^0} \quad 0.9094 \text{ mi}_{j96^0} \end{aligned}$$

Los voltajes del generador (componentes simétricos) son:

$$\begin{aligned} \tilde{V}_{\text{gramo1}} &= 1.0 (j0.185) \quad 1.264 \text{ mi}_{j63.98^0} \quad 0.7965 \text{ mi}_{j77.40^0} \\ \tilde{V}_{\text{gramo2}} &= (j0.28) \quad 0.7663 \text{ mi}_{j49.48^0} \quad 0.2146 \text{ mi}_{j139.48^0} \\ \tilde{V}_{\text{gramo0}} &= 0 \end{aligned}$$

Los voltajes de fase del generador son:

$$\tilde{V}_{gabc} = \text{televisor}_{\text{gramo120}}$$

$$\begin{aligned} \tilde{V}_{g1} &= 0,7965 \text{mi}_{j7,40^\circ} & \tilde{V}_{g2} &= 0,2146 \text{mi}_{j139,48^\circ} & \tilde{V}_{g0} &= 0,6718 \text{mi}_{j21,11^\circ} \\ \tilde{V}_{gB} &= 0,7965 \text{mi}_{j127,40^\circ} & \tilde{V}_{gC} &= 0,2146 \text{mi}_{j9,48^\circ} & \tilde{V}_{g0} &= 0,7584 \text{mi}_{j111,78^\circ} \\ \tilde{V}_{gC} &= 0,7965 \text{mi}_{j112,60^\circ} & \tilde{V}_{gA} &= 0,2146 \text{mi}_{j259,48^\circ} & \tilde{V}_{g0} &= 1,0073 \text{mi}_{j110,04^\circ} \end{aligned}$$

Para el cálculo de la corriente de falla, primero calculamos el positivo, el negativo y el cero secuencia de corrientes en la falla. Tenga en cuenta que:

$$\tilde{I}_{F1} \quad \tilde{I}_{F2} \quad \tilde{I}_{F0} \quad 1,264 \text{mi}_{j33,98^\circ} \quad 0,5702 \text{mi}_{j5,70^\circ} \quad 0,9018 \text{mi}_{j57,79^\circ}$$

Por lo tanto, las corrientes de falla son:

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{fabc} &= \tilde{I}_{F120} & \tilde{I}_{f0} &= 2,7054 \text{mi}_{j57,79^\circ} \\ & 0 & & 0 \\ & 0 & & 0 \end{aligned}$$

Comparando los dos casos, Es obvio que la presencia de la carga eléctrica no afectar sustancialmente la corriente de falla. Por supuesto, dado que la carga eléctrica se representa con un equivalente pasivo de R, L, no contribuye a la corriente de falla.

En resumen, hemos discutido los procedimientos mediante los cuales las redes de secuencia de un sistema de energía deben conectarse para proporcionar un circuito para el cálculo de las corrientes de falla en condiciones específicas de falla. Específicamente, en condiciones de estado estacionario pero posiblemente desequilibradas, el sistema se representa con tres redes de secuencia, como en la Figura 4.6b. En el punto de una falla (simétrica o asimétrica), las redes de secuencia deben estar interconectadas porque es esta área donde interactúan las cantidades de secuencia. El tipo de interacción y, por lo tanto, la forma en que deben interconectarse las redes de secuencia, depende del tipo de falla. Las Figuras 4.7 a 4.10 ilustran las conexiones necesarias para los cuatro tipos de fallas mencionadas anteriormente.

Computacionalmente, el análisis de fallas simétricas o asimétricas requiere los siguientes pasos:

**Paso 1:** Calcule los tres circuitos equivalentes (equivalente de Norton o Thevenin) en la ubicación de la falla (secuencia positiva, negativa y cero).

**Paso 2:** interconecte los tres circuitos equivalentes según el tipo de falla.

**Paso 3:** Calcule los voltajes y corrientes de los componentes simétricos en cualquier lugar de la red de paso 2. Posteriormente, calcule las cantidades de fase.

De las tareas anteriores, la más compleja y exigente desde el punto de vista computacional es la tarea 1. Requiere la formación de las tres redes de secuencia y la posterior reducción de estas a un equivalente de Norton o Thevenin. La formación de las tres redes de secuencia se logra mediante la interconexión de los modelos de secuencia de dispositivos individuales. El procedimiento es sencillo. Cuatro ejemplos relativamente sencillos han ilustrado el procedimiento.

El enfoque general para el análisis de fallas de sistemas grandes se analiza en la siguiente sección.

## 4.4 Análisis de fallas de grandes redes

El método de análisis de fallas presentado debe aplicarse a toda la red del sistema eléctrico de modo que se deben tener en cuenta las contribuciones de todas las fuentes de generación. Por razones prácticas, este análisis debería ser rápido. En esta sección presentamos la aplicación del análisis de componentes de secuencia a sistemas de potencia a gran escala con el propósito de calcular las corrientes de falla. En general, el proceso es bastante sencillo e incluye los siguientes pasos:

Paso 1: Primero se modela cada componente del sistema de energía con sus modelos de secuencia positiva, negativa y cero. Posteriormente, las tres redes de secuencia se crean de la siguiente manera:

Paso 2: El modelo de secuencia positiva de la red se genera simplemente sustituyendo el modelo de secuencia positiva de cada componente en la red.

Paso 3: El modelo de secuencia negativa de la red se genera simplemente sustituyendo el modelo de secuencia negativa de cada componente en la red.

Paso 4: El modelo de secuencia cero de la red se genera simplemente sustituyendo el modelo de secuencia cero de cada componente en la red.

Paso 5: A continuación, se considera el tipo de falla a analizar. Para el tipo de falla específico, conecte las redes de secuencia según lo indique el tipo de falla (consulte las Figuras 4.x, 4.x, 4.xy 4.x). Por ejemplo, para una falla de fase, simplemente inserte un elemento de impedancia cero entre la red de secuencia positiva en la ubicación de la falla y el nodo de referencia; las redes de secuencia negativa y cero no estarán involucradas. De manera similar, para una falla de una sola línea a tierra, simplemente conecte las tres redes en serie en la ubicación de la falla, etc. El resultado final es que para una falla específica tendremos una red más grande que resolver.

Paso 6: Resuelva la red resultante del Paso 5. La solución proporcionará los voltajes y corrientes en cualquier ubicación del modelo de red de secuencia positiva, negativa y cero.

Paso 7: Utilice los voltajes y corrientes de la solución del paso 6 para calcular los voltajes y corrientes de fase en cualquier lugar de la red real. Tenga en cuenta que este paso simplemente implica la conversión de los componentes de secuencia de los voltajes y corrientes en voltajes y corrientes de fase utilizando la transformación simétrica inversa.

Desde el punto de vista computacional, la tarea más exigente es la solución de la red (Tarea 6). En términos de métodos, se puede utilizar cualquier método de análisis de circuitos. Por ejemplo, análisis de bucle, análisis nodal, híbrido, etc. Sin embargo, se han desarrollado métodos muy eficientes (codificados por escasez) para el análisis nodal y es el método preferido para sistemas grandes. Para completar, en la siguiente sección discutimos los dos métodos principales de análisis de circuitos, es decir, análisis de bucle y análisis nodal.

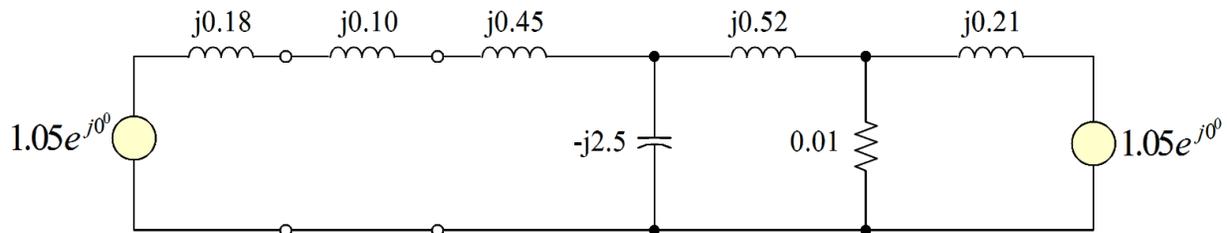
#### 4.4.1 Métodos de análisis de circuitos

En esta sección discutimos dos métodos de análisis de circuitos para el análisis de fallas: (a) el análisis de lazo y (b) el análisis nodal. La base de estos métodos también se ha discutido en el Capítulo 2. Aquí nos centraremos en los procedimientos para crear la red en una forma adecuada para una de estas formas de análisis.

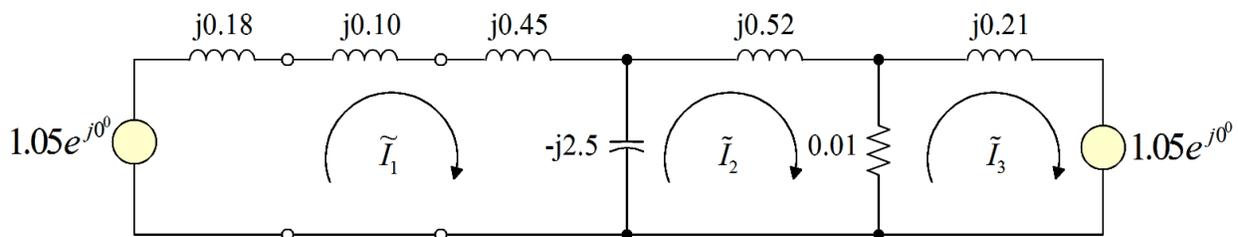
**Análisis de bucle:** La idea básica del análisis de bucles es la siguiente. Si tenemos una red grande, podemos definir un número de corrientes eléctricas de tal manera que si se conocen estas corrientes, entonces se puede calcular cualquier otra cantidad en la red, como voltajes, etc. Los valores de estas corrientes se pueden calcular mediante un conjunto de ecuaciones que se generan de la siguiente manera: un número de bucles en la red se identifican de tal manera que el número de bucles es igual al número de corrientes eléctricas desconocidas. Luego, se escribe la ley de voltaje de Kirchoff para cada uno de los bucles. Este proceso produce un número de ecuaciones que es igual al número de corrientes eléctricas desconocidas. En otras palabras, tenemos un conjunto de ecuaciones y un número igual de incógnitas. La solución de estas ecuaciones produce las corrientes eléctricas desconocidas.

El proceso se ilustrará con un ejemplo.

**Ejemplo E4.6:** El circuito equivalente de una red con fallas se muestra en la Figura E4.6. La falla se indica con la resistencia de falla de 0.01 pu. Resuelva esta red mediante análisis de bucle.



**Solución:** Tenga en cuenta que tres bucles se identifican fácilmente. La definición de una corriente de bucle en cada uno de los tres bucles da como resultado el sistema a continuación. Tenga en cuenta que las corrientes de bucle se definen como la corriente en las ramas de bucle que no se comparten con otros bucles. En las ramas que son compartidas por bucles, como la rama del condensador que se muestra en la figura, el flujo de corriente será una combinación de corrientes de bucle, en este caso  $I_1$ - $I_2$ .



La ley de voltaje de Kirchoff alrededor de cada uno de los bucles produce las siguientes tres ecuaciones:

$$\begin{aligned} 1.05 \quad j0.75 \quad j2.5 \quad I_1 \quad I_2 \quad \tilde{\varphi} \quad \tilde{I}_2 \\ j0.52 \quad j0.01 \quad I_2 \quad I_3 \quad j2.5 \quad I_1 \quad I_2 \quad 0 \quad \tilde{I}_2 \\ j0.21 \quad I_3 \quad 1.05 \quad 0.01 \quad I_2 \quad I_3 \quad 0 \quad \tilde{I}_3 \end{aligned}$$

Las ecuaciones anteriores se pueden escribir en forma de matriz de la siguiente manera:

$$\begin{array}{cccccc} j1.75 & j2.5 & 0 & \tilde{I}_1 & 1.05 & \\ j2.5 & 0.01 & j1.98 & 0.01 & \tilde{I}_2 & 0 \\ 0 & 0.01 & 0.01 & j0.21 & \tilde{I}_3 & 1.05 \end{array}$$

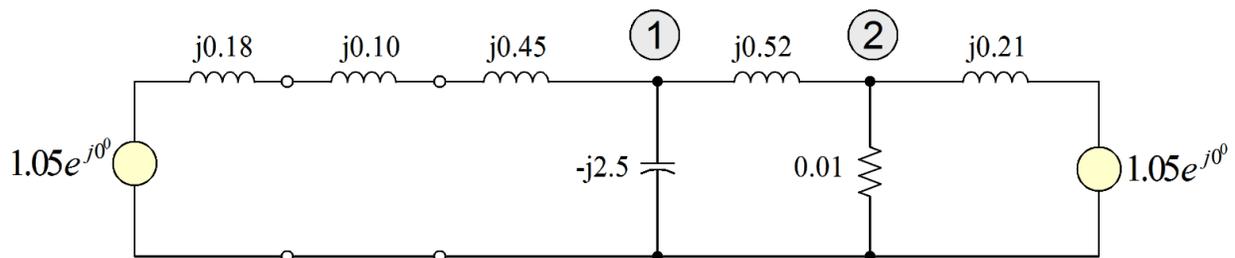
La solución de la ecuación anterior produce:

$$\begin{aligned} \tilde{I}_1 &= xxe_{jxx} \\ \tilde{I}_2 &= xxe_{jxx} \\ \tilde{I}_3 &= xxe_{jxx} \end{aligned}$$

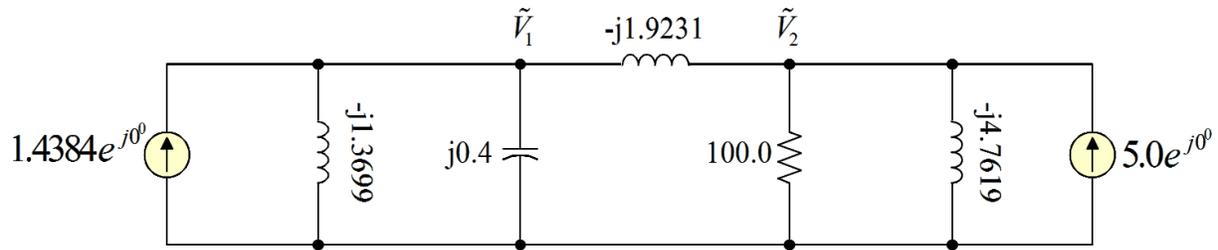
**Análisis nodal:** La idea básica del análisis nodal es el reconocimiento de que el conocimiento de los voltajes en cada nodo de una red puede proporcionar cualquier otra cantidad de interés, por ejemplo corrientes, etc. Por esta razón, el método define los voltajes en cada nodo de la red como las incógnitas a calcular. Posteriormente, se escribe la ley actual de Kirchoff para cada nodo del sistema. Cada corriente se expresa en función de los voltajes desconocidos de los nodos. Este proceso produce tantas ecuaciones como nodos y se expresan en términos de los voltajes de los nodos. En otras palabras, tenemos un conjunto de ecuaciones y un número igual de incógnitas. La solución de estas ecuaciones produce los voltajes de nodo desconocidos. El proceso se ilustrará con un ejemplo.

**Ejemplo E4.7:** Considere el circuito equivalente de una red con falla, el mismo que en el Ejemplo E4.6. Resuelva esta red mediante análisis nodal.

**Solución:** Primero observe que podemos identificar dos nodos (además del nodo de referencia) donde si se conocen los voltajes en estos nodos, podemos calcular cualquier otra cosa en el circuito. Estos dos nodos se identifican como 1 y 2 en la figura.



Posteriormente reemplazamos los elementos del circuito con equivalentes de Norton como se muestra en la figura siguiente, es decir, todas las impedancias se convierten en admitancias y todas las fuentes de voltaje en corriente fuentes.



Las ecuaciones nodales para la red anterior son:

$$\begin{aligned} 1.4384 - j1.3699 V_1 - j0.4 V_1 + j1.9231 V_1 - V_2 &= 0 \\ 5.0 - j4.7619 V_2 - 100.0 V_2 + j1.9231 V_2 - V_1 &= 0 \end{aligned}$$

Las ecuaciones anteriores se pueden escribir en forma de matriz de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} j2.8930 & j1.9231 \\ j1.9231 & 100.0 - j6.6850 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.4384 \\ 5.0 \end{bmatrix}$$

La solución de la ecuación anterior produce:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} xxe \\ xxe \end{bmatrix}$$

Los procedimientos descritos anteriormente se pueden aplicar de forma sistemática en redes de cualquier tamaño. Se puede pensar que cualquier red de energía eléctrica consta de varios componentes. Para el análisis de fallas basado en componentes simétricos, los elementos básicos y más usuales que se encuentran son: (a) fuentes, (b) resistencias, (c) inductores, (d) capacitores y (e) elementos acoplados magnéticamente. Si el método de análisis seleccionado es el análisis de bucle, es conveniente escribir las ecuaciones del modelo en términos de impedancias y fuentes de voltaje; en este caso, es más fácil escribir las ecuaciones de bucle. Nos referimos a esta forma como la forma equivalente de Thevenin. La figura 4.7, columna tres, proporciona la forma equivalente de Thevenin para los componentes más habituales. Si el método de análisis seleccionado es el análisis nodal, es conveniente escribir las ecuaciones del modelo en términos de admitancias y fuentes de corriente; en este caso, es más fácil escribir las ecuaciones nodales. Nos referimos a este formulario como el formulario equivalente de Norton. Figura 4.7, columna cuatro proporciona la forma equivalente de Norton para el componentes más habituales.

Elemento	Ecuaciones modelo Frecuencia de poder	Equivalente de Thevenin	Equivalente de Norton
Fuente		$\tilde{V} = z\tilde{I} + m\tilde{i}$	$\tilde{I} = y\tilde{V} + S.M$ $y = 1/z$
Resistor  Vermont) $R i(t)$	 V Rhode Island	 V Rhode Island	 $\tilde{I} = G\tilde{V}$
Inductor  Vermont) $L \frac{di(t)}{dt}$	 $\tilde{V} = jL\tilde{I}$	 $\tilde{V} = jL\tilde{I}$	 $\tilde{I} = \frac{1}{jL}\tilde{V}$
Condensador  eso) $C \frac{dv(t)}{dt}$	 $\tilde{I} = jC\tilde{V}$	 $\tilde{V} = \frac{1}{jC}\tilde{I}$	 $\tilde{I} = jC\tilde{V}$
Elementos acoplados		$\tilde{V}_1 = Z_{s1}\tilde{I}_1 + Z_{metro2}\tilde{I}_2$ $\tilde{V}_2 = Z_{metro1}\tilde{I}_1 + Z_{s2}\tilde{I}_2$	$\tilde{I}_1 = A Z_{s2} \tilde{V}_2 + Z_{metro1} \tilde{V}_1$ $\tilde{I}_2 = A^1 Z_{s1} \tilde{V}_1 + Z_{metro2} \tilde{V}_2$
Repartido Circuito de parámetros $R, L, C$ $length = l$  Rhode Island y, t	$R, L, C$ $length = l$ $\tilde{V}(y) = R jL Y_0 \tilde{y}$ $\tilde{Y}_0(y) = jCV(\tilde{años})$	 $\tilde{V}_1(\omega) = \frac{Z_{aportar pag l}}{pecado pag} \tilde{I}_1 + \frac{Z_0}{pecado pag}$ $\tilde{V}_2(\omega) = \frac{Z_0}{pecado pag} \tilde{I}_1 + \frac{Z_{aportar pag l}}{pecado pag} \tilde{I}_2$ $Z = Z_0 \sinh pagl$ $Z' = \frac{Z_0 \sinh pagl}{aportar(pag) 1}$ $Z_0 = R \sqrt{jL / jC}$ $pag = \sqrt{R jL jC}$	 $\tilde{I}_1(\omega) = \frac{aportar pag l}{Z_{pecado pag}} \tilde{V}_1 + \frac{1}{Z_{pecado pag}} \tilde{V}_2$ $\tilde{I}_2(\omega) = \frac{1}{Z_{pecado pag}} \tilde{V}_1 + \frac{aportar pag l}{Z_{pecado pag}} \tilde{V}_2$ $Y = \frac{1}{Z_0 \sinh pagl}$ $Y = \frac{aportar(pag) 1}{Z_0 \sinh pagl}$ $Z_0 = R \sqrt{jL / jC}$ $pag = \sqrt{R jL jC}$

Figura 4.7: Elementos del circuito equivalente de Thevenin y Norton

#### 4.4.2 Métodos de reducción de red

Muchas veces es conveniente calcular las impedancias equivalentes de secuencia positiva, negativa y cero en la ubicación de la falla. Esto se logra de manera más eficiente utilizando la técnica de reducción de red. El proceso es sencillo. Primero, las redes de secuencia positiva, negativa y cero se construyen simplemente reemplazando cada componente del sistema con los modelos de secuencia positiva, negativa y cero de los componentes. El resultado final de este proceso serán tres redes: el modelo de red de secuencia positiva, negativa y cero del sistema. Posteriormente, la red de secuencia positiva se puede reducir a un equivalente de Thevenin o Norton en la ubicación de la falla utilizando métodos de reducción de red. De manera similar, la red de secuencia negativa se puede reducir a un equivalente de Thevenin o Norton en la ubicación de la falla utilizando métodos de reducción de red.

El método de reducción de la red se ilustrará con un ejemplo sencillo.

**Ejemplo E4.7:** Considere el circuito equivalente de una red con fallas. La red de secuencia positiva para el sistema se ilustra en la Figura E4.7. Calcule el equivalente de Thevenin y el equivalente de Norton en la ubicación de la falla.

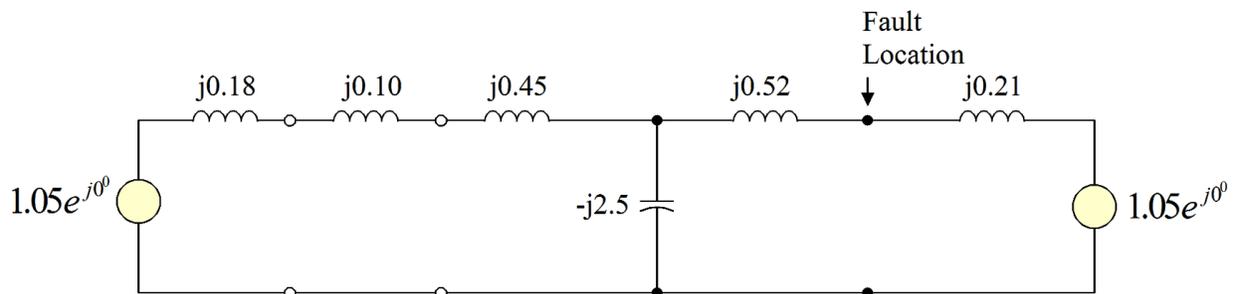


Figura E4.7

**Solución:** Primero usaremos el análisis nodal para calcular el equivalente de Norton. Para este propósito convertimos la red de secuencia positiva en:

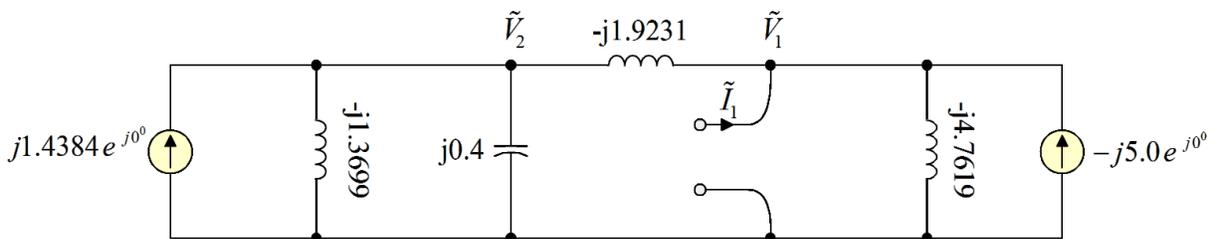


Figura E4.7a

Las siguientes ecuaciones nodales están escritas para esta red:

$$\tilde{I}_1 - j1.9231 V_1 - \tilde{V}_2 - \tilde{I}_4.7619 V_1 - j5.0 \tilde{V}_1 = 0$$

$$j1,9231 \tilde{V}_2 \quad \tilde{V}_1 \quad j0,4 \tilde{V}_2 \quad j1,3699 \tilde{V}_2 \quad j1,4384 \quad 0$$

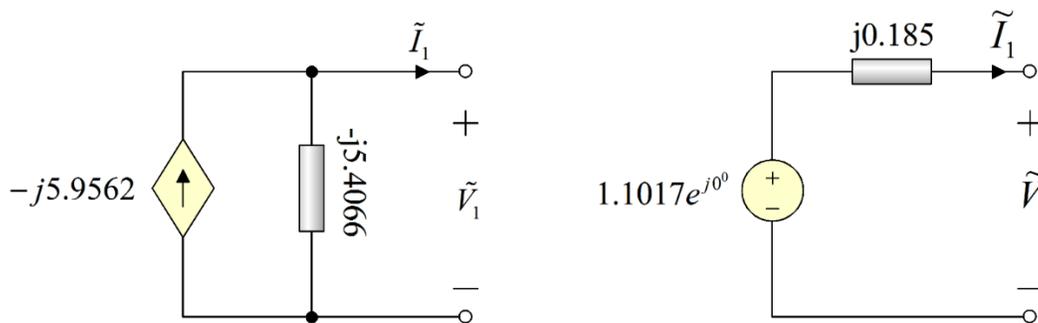
Las ecuaciones anteriores se pueden escribir en la siguiente forma compacta:

$$\begin{array}{r} \tilde{I}_1 \\ 0 \end{array} \quad \begin{array}{r} j6,6850 \\ j1,9231 \end{array} \quad \begin{array}{r} j1,9231 \tilde{V}_1 \\ j2,8930 \tilde{V}_1 \end{array} \quad \begin{array}{r} j5,0 \\ j1,4384 \end{array}$$

Tras la eliminación de  $\tilde{V}_2$  de las ecuaciones anteriores:

$$\tilde{I}_1 \quad \sim \quad \sim \quad \sim$$

La primera ecuación corresponde al equivalente de Norton que se muestra en la Figura E4.7b (a) y la segunda ecuación corresponde al equivalente de Thevenin que se muestra en la Figura E4.7b (b).

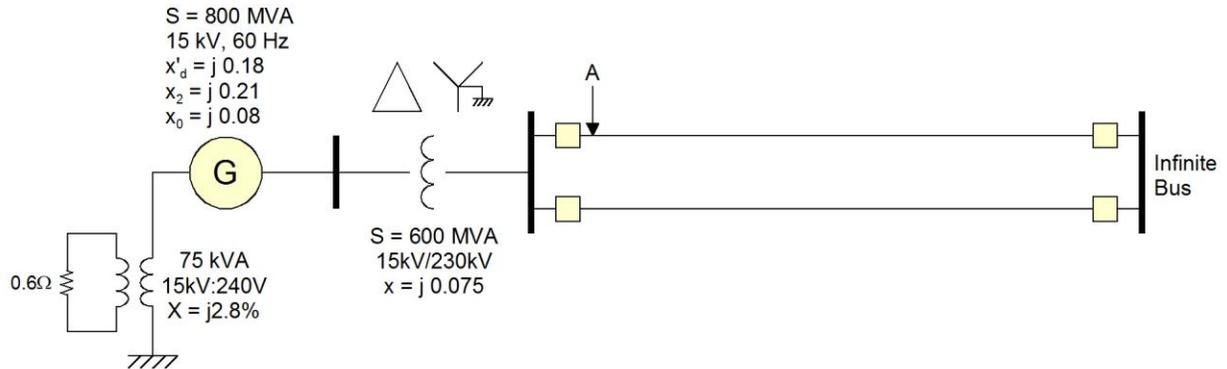


**Figura E4.7b** Equivalentes de Norton y Thevenin del circuito de la figura E4.7

En resumen, el análisis de fallas de sistemas a gran escala se puede realizar configurando las redes de secuencia positiva, negativa y cero del sistema, aplicando la falla a esta red y resolviendo el problema de red resultante. La solución se puede hacer directamente o calculando los equivalentes de Thevenin o Norton de la red de secuencia positiva, negativa y cero primero y luego aplicando el modelo de falla a los equivalentes.

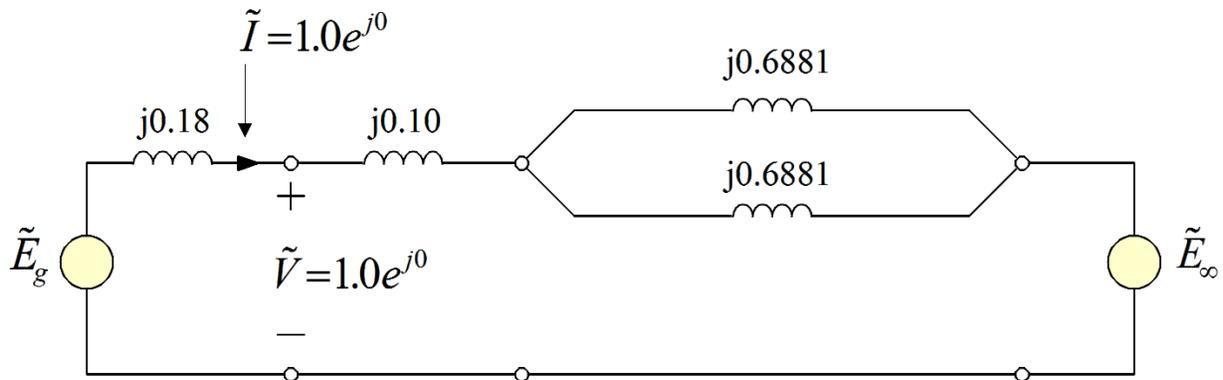
Los procedimientos descritos anteriormente se ilustrarán con un ejemplo.

**Ejemplo E4.5:** Considere el sistema de energía eléctrica de la Figura E4.5. Los parámetros de los distintos componentes del sistema se muestran en la Figura. Considere una falla de línea única a tierra en la ubicación A. La ubicación A se indica en la Figura. Está muy cerca del bus de 230 kV del transformador y prácticamente la impedancia entre el bus y la ubicación A es cero. Calcule la corriente de secuencia negativa en el generador durante esta falla. También se da que antes de la falla la unidad opera bajo voltaje nominal en sus terminales, potencia nominal y factor de potencia unitario. La impedancias de secuencia positiva, negativa y cero de cada línea son:  $z_1 = z_2 = j45,5 \text{ ohmios}$  y  $z_0 = j106,4 \text{ ohmios}$ . La impedancia mutua entre las dos líneas (solo secuencia cero) es:  $z_{0\text{metro}} = j24,5 \text{ ohmios}$ .


**Figura E4.5**

**Solución: Condiciones previas a la falla:** Primero necesitamos calcular las condiciones de operación de este sistema antes de la falla. El sistema opera en condiciones equilibradas antes de la falla y, por lo tanto, se aplica la red de secuencia positiva que se muestra en la Figura E4.5a. La figura también muestra los datos dados, específicamente el generador opera bajo voltaje nominal, potencia nominal y factor de potencia unitario. Por lo tanto, el voltaje y la corriente del terminal del generador es:

$$\tilde{V}_1 1.0 \text{mi}_{\rho}, \quad \tilde{I}_1 1.0 \text{mi}_{\rho}$$

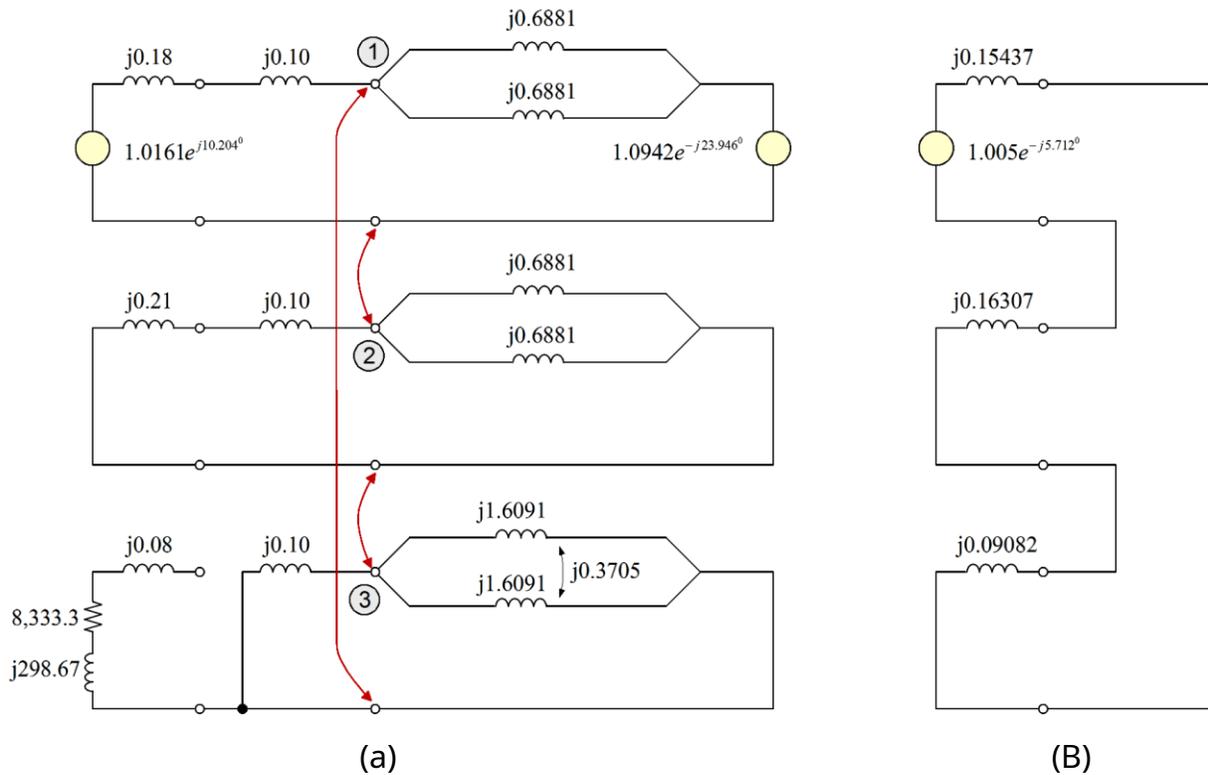

**Figura 4.5a: Modelo de red antes de la falla**

El voltaje interno del generador y el voltaje de fuente infinito son:

$$\tilde{m}_{i_{\text{grano}}} 1.0 \text{mi}_{\rho} \quad j 0,18 \quad 1.0 \text{mi}_{\rho} \quad 1.0161 e^{j10,2046}$$

$$\tilde{m}_i 1.0 \text{mi}_{\rho} \quad j 0,10 \quad \frac{0,6881}{2} \quad 1.0 \text{mi}_{\rho} \quad 1.0942 \text{mi}_{\rho} \quad j23,9460$$

**Condiciones de falla:** Dado que tenemos una sola línea a la falla a tierra, necesitamos construir las redes equivalentes de secuencia positiva, negativa y cero. La figura E4.5b (a) ilustra las redes equivalentes de secuencia pos, neg y cero y las conexiones para una sola línea a la falla a tierra. Las redes de secuencia también se pueden reducir a las redes de secuencia equivalente en la ubicación de la falla, como se muestra en la Figura E4.5b (b). Presentamos a continuación el análisis de estas condiciones con dos métodos: (a) el método uno simplemente resuelve la red de la figura E4.5b (a) y (b) el método dos primero calcula los modelos de secuencia equivalente reducida y luego resuelve las corrientes de falla.



**Figura 4.5b: Modelo de red con fallas**  
**(a) Redes de secuencia, (b) Redes de secuencia reducida)**

**Método de solución (a):** Primero, los dos elementos acoplados mutuamente se pueden reemplazar con una impedancia de admitancia equivalente. Para este propósito, use las ecuaciones de la Figura 4.7:

$$\begin{bmatrix} \tilde{I}_1 \\ \tilde{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ Z_{S2} \\ Z_{metro} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{S1} \\ Z_{metro} \\ V_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{V}_1 \\ A_1 \\ Z_{S1} Z_{S2} \\ Z_{metro} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 \\ 2 \end{bmatrix}$$

Tenga en cuenta que el voltaje en cada uno de los elementos acoplados es el mismo y la corriente neta es la suma de las corrientes, es decir

$$\tilde{V} \sim \sim \sim \sim \sim \sim$$

Esta la entrada equivalente es:

$$y_{eq} = A Z_{s2} Z_{s1} 2Z_{metro} \quad j1.010305, 0 \quad Z_{eq} \quad j0,9898$$

Las ecuaciones nodales para la red de la figura E4.5b (a) son:

$$\begin{aligned} 0 \quad \tilde{V} & \sim \frac{\sim}{j0,28} \sim \sim \sim \frac{\sim}{j0,6881} \sim \sim \frac{\sim}{j0,1} \sim \sim \frac{\sim}{j0,9898} \\ 0 \quad \tilde{V} & \sim \frac{\sim}{j0,31} \sim \sim \frac{\sim}{j0,6881} \sim \sim \sim \frac{\sim}{j0,28} \sim \sim \sim \frac{\sim}{j0,6881} \\ 0 \quad \tilde{V} & \sim \frac{\sim}{j0,1} \sim \sim \frac{\sim}{j0,9898} \sim \sim \sim \frac{\sim}{j0,31} \sim \sim \sim \frac{\sim}{j0,6881} \end{aligned}$$

La solución de las ecuaciones nodales produce:

$$\tilde{V}_1 \quad xxe_{jxx}, \quad \tilde{V}_2 \quad \tilde{x}xe_{jxx}, \quad \tilde{V}_3 \quad xxe_{jxx}$$

La corriente de secuencia negativa en el generador es:

$$\tilde{I}_2 \quad \tilde{V}_2 \quad \tilde{V}_3 \quad \frac{1}{j0,31} \quad xxe^{jxx}$$

**Método de solución (b):** En este método, las redes de secuencia se reducen primero a un equivalente de Thevenin en la ubicación de la falla. La figura E4.5b (b) ilustra los equivalentes de Thevenin calculados. A continuación presentamos el cálculo de la secuencia positiva del equivalente de Thevenin.

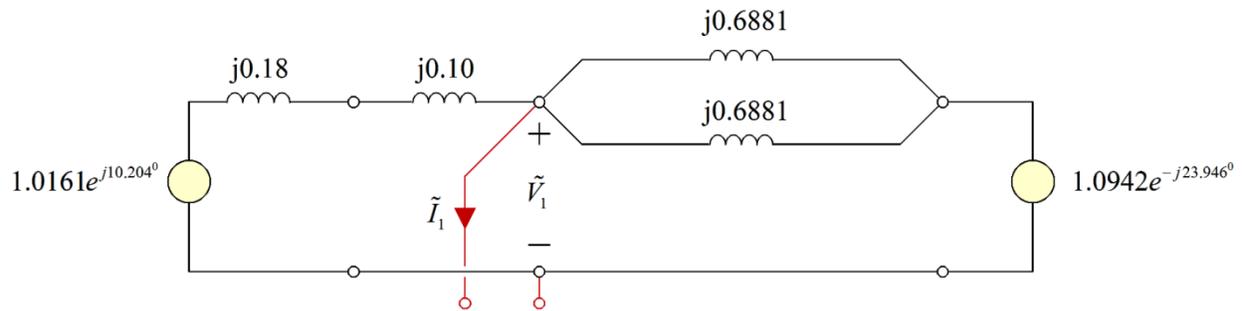


Figura E4.5c: Cálculo del equivalente de Thevenin de secuencia positiva en la ubicación de la falla

$$0 \quad \tilde{V} \quad \frac{\sim}{j0,28} \quad \sim \quad \frac{\sim}{j0,6881} \quad \sim$$

La ecuación anterior se convierte en la forma:

$$\tilde{V}_1 \quad j0.15437I \quad \tilde{I}_1 \quad 0,0050mi \quad j5.7120$$

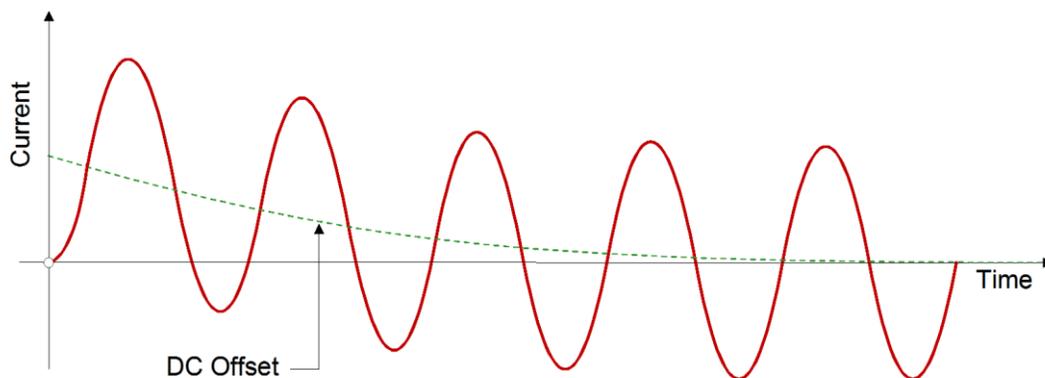
La ecuación anterior corresponde a la secuencia positiva del equivalente de Thevenin en la Figura E4.5b (b). De manera similar, los equivalentes de Thevenin de las redes de secuencia negativa y cero se calculan e ilustran en la Figura E4.5b (b).

## 4.5 Transitorios eléctricos

La iniciación y eliminación de fallas desencadena transitorios que pueden afectar el desempeño de los interruptores y su capacidad para interrumpir el circuito. Examinamos dos tipos de transitorios que afectan en gran medida el rendimiento del interruptor. El primer tipo de transitorios afecta la magnitud de la corriente eléctrica a interrumpir. Nos referimos a estos transitorios como transitorios de corriente de falla. El segundo afecta los voltajes a los que está sujeto un interruptor después de la interrupción de la falla. Nos referimos a estos transitorios como recuperación de voltaje transitorio. El mecanismo de generación de estos transitorios se describirá a continuación.

### 4.5.1 Transitorios de corriente de falla

Los transitorios de corriente de falla incluyen típicamente un componente de CC que disminuye exponencialmente, así como un componente que disminuye la frecuencia de potencia. El componente de CC que decae exponencialmente puede ocurrir en cualquier lugar. El componente de CA que decae exponencialmente es más profundo cerca de una unidad generadora y es causado por las impedancias variables del generador durante una falla. En la Figura 4.9 se muestra una forma de onda de corriente de falla típica. El transitorio de corriente de falla afecta al relé, así como a la capacidad del interruptor para interrumpir la falla. El efecto sobre la operación del relé se discutirá en la siguiente sección. La capacidad del interruptor para interrumpir la falla depende del valor rms de la corriente de falla en el momento de la interrupción. El valor rms debe estar por debajo de la capacidad del interruptor. La forma de onda de la corriente de falla eléctrica en la Figura 4.9 indica que el valor rms de la corriente varía con el tiempo. Es importante analizar la forma de onda de la corriente de falla para determinar cuál es el valor eficaz de la corriente de falla en el momento de la operación del interruptor. Este análisis se presentará con un ejemplo.



**Figura 4.9: Transitorios de corriente de falla eléctrica**

Considere un sistema de energía eléctrica y suponga que el sistema opera en condiciones normales de estado estacionario cuando de repente ocurre un cortocircuito entre una fase y el neutro del sistema. Deseamos examinar los transitorios de fallas eléctricas. Para simplificar el análisis, consideramos

el equivalente de Thevenin del sistema en el punto de la falla, que se ilustra en la Figura 4.10. En general, el circuito equivalente consistirá en una fuente de voltaje ideal equivalente detrás de la impedancia de Thevenin que para la mayoría de los sistemas de energía consistirá en una resistencia R e inductancia L. El voltaje de fuente equivalente es:

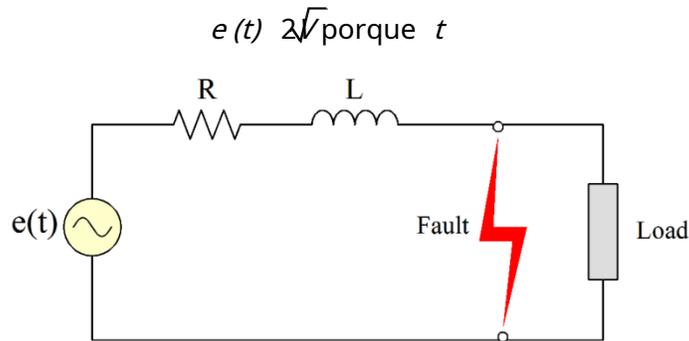


Figura 4.10: Circuito equivalente de Thevenin de un sistema de energía en una ubicación de falla

La corriente de falla se calcula resolviendo la ecuación diferencial que describe el circuito equivalente. Específicamente, después del inicio de la falla, el voltaje a través de los terminales de falla es cero, por lo tanto:

$$e(t) - R i(t) - L \frac{di(t)}{dt} = 0$$

La solución general de la ecuación anterior, asumiendo que la falla ocurre en  $t = 0$  es:

$$i_f(t) = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin(\omega t - \phi) + I(0) e^{-\frac{R}{L}t}$$

dónde:

$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

Tenga en cuenta que la corriente de falla consta de un componente sinusoidal más un componente de CC que decae exponencialmente. La amplitud del componente de CC depende principalmente de la fase de la forma de onda del voltaje de la fuente en el momento en que ocurre la falla (ángulo  $\phi$ ). Despreciando la corriente previa a la falla  $i(0)$ , la amplitud máxima del componente de CC ocurre para  $\phi = 90^\circ$ . Para esta condición, el componente de CC se convierte en:

$$I_{F, DCmax}(t) = \frac{E}{\omega L} e^{-\frac{R}{L}t}$$

mientras que el componente sinusoidal (AC) es:

$$I_{F, AC}(t) = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \sin(\omega t - \phi)$$

Por lo tanto, el valor RMS de la corriente de falla bajo el supuesto anterior ( ) es:

$$I_F = I_2 \sqrt{2I_2 m i \frac{2R}{L} t}$$

La expresión anterior es máxima en  $t = 0$ . Específicamente en  $t = 0$  el valor RMS máximo de la corriente de falla es:

$$I_{Fmax} = I_2 \sqrt{\frac{V \sqrt{3}}{\sqrt{R_2 + 2L_2}}}$$

Tenga en cuenta que la duración del componente de CC depende de la constante de tiempo  $L/R$ , es decir, la relación entre la inductancia del circuito equivalente de Thevenin y la resistencia en la ubicación de la falla.

Tenga en cuenta que el valor rms de la corriente de falla varía con el tiempo. Esto es muy importante porque la capacidad de los interruptores automáticos para interrumpir la corriente de falla depende del valor eficaz de la corriente de falla en el momento de la interrupción. Por ejemplo, un interruptor con capacidad nominal de 40 kA podrá interrumpir una falla siempre que el valor eficaz de la falla sea inferior a 40 kA en el momento de la interrupción. Por lo tanto, es importante calcular la corriente de falla en el momento de la operación del interruptor. El problema se ilustrará con un ejemplo.

**Ejemplo E4.9:** En la ubicación de un interruptor, las impedancias de secuencia equivalentes son:

(a) secuencia pos / neg:  $R_1 + jL_1 = 0,001 + j0,075 \text{ pu}$ , @13,8kV (L Tierra 36MVA)

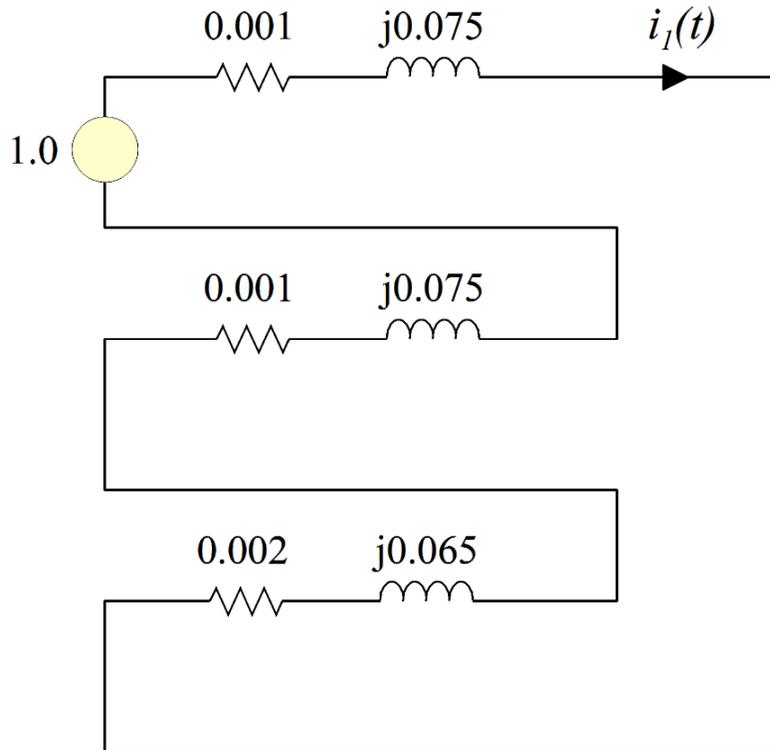
(b) secuencia cero:  $R_0 + jL_0 = 0,002 + j0,065 \text{ pu}$ , @13,8kV (L Tierra 36 MVA)

El interruptor está configurado para despejar una falla en cuatro ciclos y medio de 60 Hz. Calcule el **valor rms máximo posible** de una sola fase a la corriente de falla a tierra (en amperios) en el momento de la operación del interruptor, es decir, cuatro ciclos y medio después del inicio de la falla.

**Solución:** Con el fin de calcular el valor rms máximo, debemos suponer el máximo

Desplazamiento de CC.

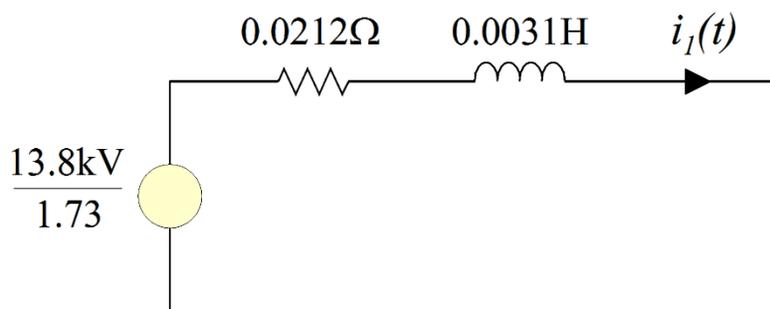
El circuito equivalente es:



La resistencia e inductancia equivalentes convertidas en unidades reales son:

$$R = 0.0212 \text{ ohmios} \quad L = 0.0031 \text{ H}$$

El circuito equivalente en unidades reales es:



La corriente de falla es:

$$I_{f, rms}(t) = \frac{3\sqrt{2} I_m e^{\frac{0.0212}{0.0031} t}}{\sqrt{0.0212^2 + 1.1381^2}} = \frac{13.8 \sqrt{3}}{0.0212 \sqrt{1.1381^2}} = 7.0004 \text{ kA}$$

En  $t = 4,5$  ciclos,  $t = 0,075$  segundos. Por lo tanto

$$I_{f, rms}(t = 0,075) = 3 \sqrt{I^2 2 \frac{2R}{E_s^2 \text{decir } L} 0,075} = 27,51 \text{ kA}$$

#### 4.5.2 Evolución de la corriente de falla

El análisis simplificado de la evolución de la corriente de falla basado en un circuito equivalente de Thevenin en la ubicación de la falla, aunque se usa ampliamente, no representa con precisión la evolución de la falla en sistemas reales.

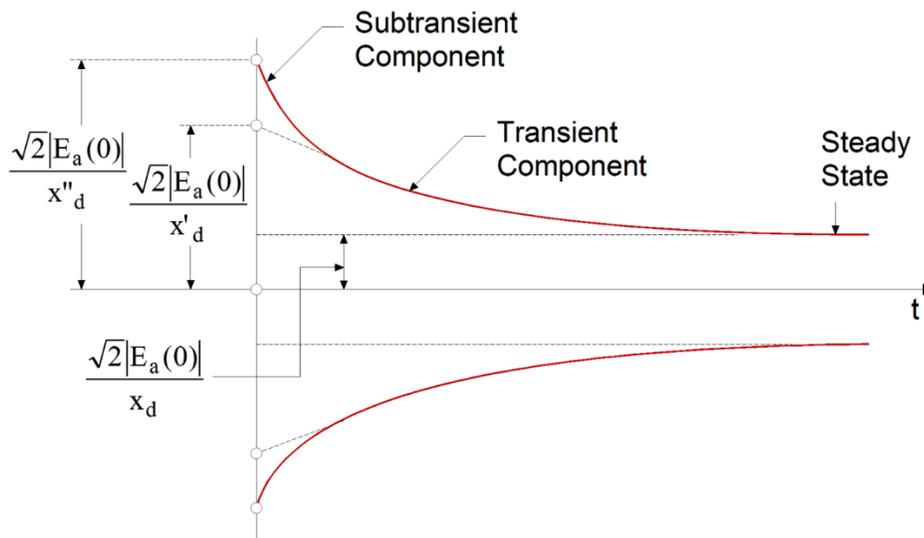


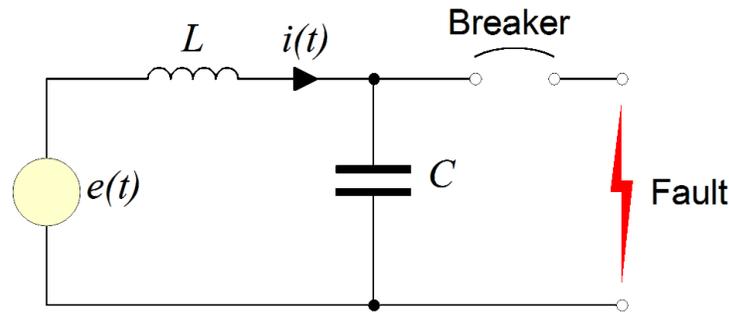
Figura 4.3: Componentes de corriente de cortocircuito durante una falla cerca de un generador

#### 4.6 Voltaje de recuperación transitorio

Después de la ocurrencia de una falla, el sistema de protección abre el interruptor apropiado para interrumpir la corriente de falla. Un interruptor interrumpe la corriente de falla abriendo un conjunto de contactos. Debido a que el circuito detrás del interruptor es principalmente inductivo, el flujo de corriente no se interrumpirá hasta que la corriente cruce un valor cero. En este instante, el arco eléctrico deja de existir y se interrumpe la corriente de falla. Una vez que se interrumpe la corriente de falla, el voltaje a través de los contactos del interruptor se acumula muy rápidamente. Este fenómeno se denomina "Voltaje de recuperación transitorio". Si la velocidad con la que aumenta esta tensión es muy alta (normalmente del orden de 10 microsegundos para alcanzar la tensión nominal del circuito), es posible que se vuelva a encender el arco eléctrico. En este caso, la corriente de falla eléctrica continuará. Nos referimos a este fenómeno como un *reencendido del interruptor*. Los reencendidos del interruptor dañan el interruptor y los reencendidos repetidos pueden causar la falla del interruptor.

El modelo matemático que describe el voltaje acumulado a través de las placas de un interruptor se describe con la ayuda de la Figura 4.x. La fuente  $e(t)$  y el inductor  $L$  representan el equivalente del sistema de potencia en los terminales del interruptor. Tenga en cuenta que este es el equivalente de Thevenin en la ubicación del interruptor y la resistencia de la impedancia equivalente se ha despreciado durante

conveniencia. El capacitor  $C$  representa la capacitancia parásita del equipo de potencia en esa ubicación (transformador, disyuntor, etc.).



**Figura 4.x Circuito equivalente para análisis de voltaje de recuperación transitoria**

Considere el período durante las condiciones de falla. La corriente de falla es:

$$\tilde{I} = \frac{\tilde{m}i}{jL}$$

Cuando la corriente se vuelve cero y asumiendo que en este caso se ha interrumpido el circuito, tendremos el siguiente modelo:

$$e(t) = L \frac{di(t)}{dt} + v_C(t)$$

$$e(t) = C \frac{dv_C(t)}{dt}$$

y condiciones iniciales:  $v_C(0) = 0$ ,  $i(0) = 0$ .

La solución a este problema es:

$$e(t) = \frac{\sqrt{2}mi}{L} \frac{1}{\omega} \sin(\omega t - \frac{1}{\omega} \sin(\omega t)) \text{ , donde } \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

y el voltaje a través del capacitor es:

$$v_c(t) = e(t) L \frac{di(t)}{dt} = \sqrt{2} m i_s t \frac{1}{2} \text{ porque } t^{-1} \text{ porque } t^2$$

Tenga en cuenta que por encima del voltaje consta de tres componentes, dos componentes que varían con la potencia frecuencia y otra que varía con una frecuencia mucho mayor.

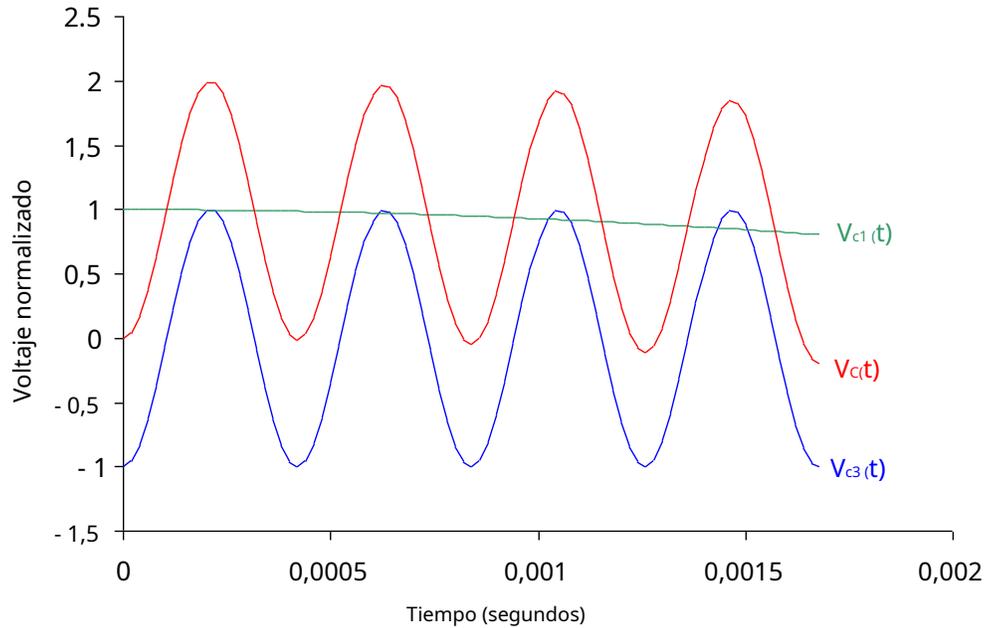
$$v_{c1}(t) = 2 m i_s \text{ porque } t$$

$$v_{c2}(t) = \sqrt{2} m i_s \frac{1}{2} \text{ porque } t^{-1}$$

$$v_{c3}(t) = \sqrt{2} m i_s \frac{1}{2} t^{-1} \text{ porque } t^2$$

Normalmente, la frecuencia angular  $\omega_1$  es mucho mayor que la frecuencia de potencia  $\omega$ . En este caso del componente  $v(t)$  es insignificante  $\omega_1$ , mientras que los otros dos componentes tienen casi iguales magnitudes pero diferente frecuencia. En la Figura 4.x se muestra un gráfico típico de los tres componentes y el voltaje total. Es importante observar en el gráfico que el valor pico del voltaje total ocurre en un tiempo igual a la mitad del período del voltaje  $v(t)$ . Por lo tanto, el momento de el voltaje pico es:

$$\frac{T_1}{2} = \frac{1}{2\omega_1} = \frac{2}{\omega_1} = \sqrt{LC}$$



**Figura 4.x: Ilustración del voltaje de recuperación transitorio**

**Ejemplo E4.10:** En la ubicación de un interruptor, la inductancia equivalente de Thevenin es de 0.05 pu sobre una base de 13.8 kV (voltaje L a L), 10 MVA (trifásico total). La capacitancia parásita total en este punto es de 0.05 microFaradios. Calcule el voltaje de recuperación transitorio de este interruptor, es decir, el valor máximo en voltios y el tiempo de subida al valor máximo en microsegundos.

**Solución:** La impedancia base en esta ubicación es:

$$Z_{BLL} = \frac{V_2^2}{S} = 19.044 \text{ Ohmios}$$

$$L = \frac{(0,05)(19,044)}{377} = 2.5257 \cdot 10^{-3} \text{ Henries}$$

La frecuencia angular es:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 88985,98 \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

El voltaje a través del interruptor es:

$$V_B(t) = e(t) L \frac{di(t)}{Dt} = \sqrt{2}V \text{ porque } t = \frac{1}{\omega} \text{ porque } t = \frac{1}{\omega} \text{ porque } t = \frac{1}{\omega}$$

$$V_B(t) = 2\sqrt{2}(13,8 \cdot 10^3) \sqrt{3} \text{ porque } t = \frac{1}{\omega} \text{ porque } t = \frac{1}{\omega} \text{ (Voltios)}$$

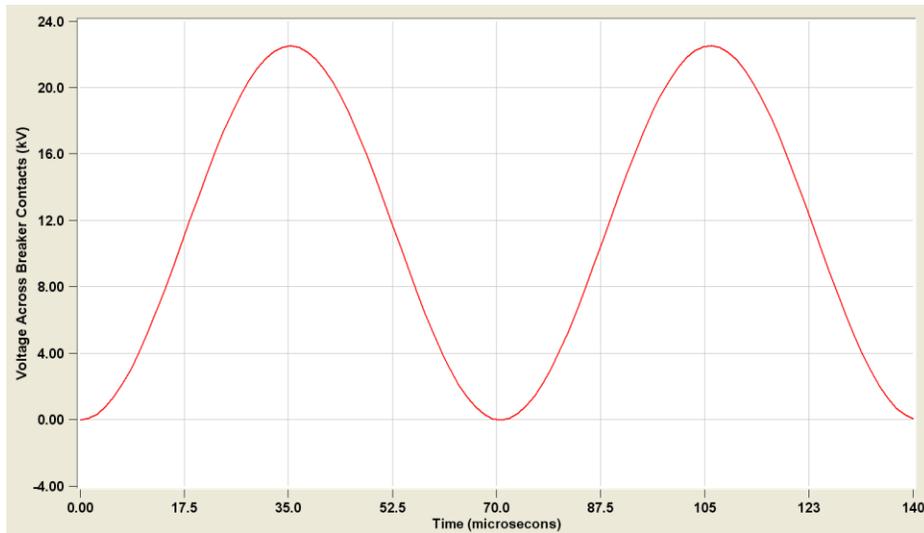
El tiempo de subida es:

$$t = 35.304 \cdot 10^{-6} \text{ (s)}$$

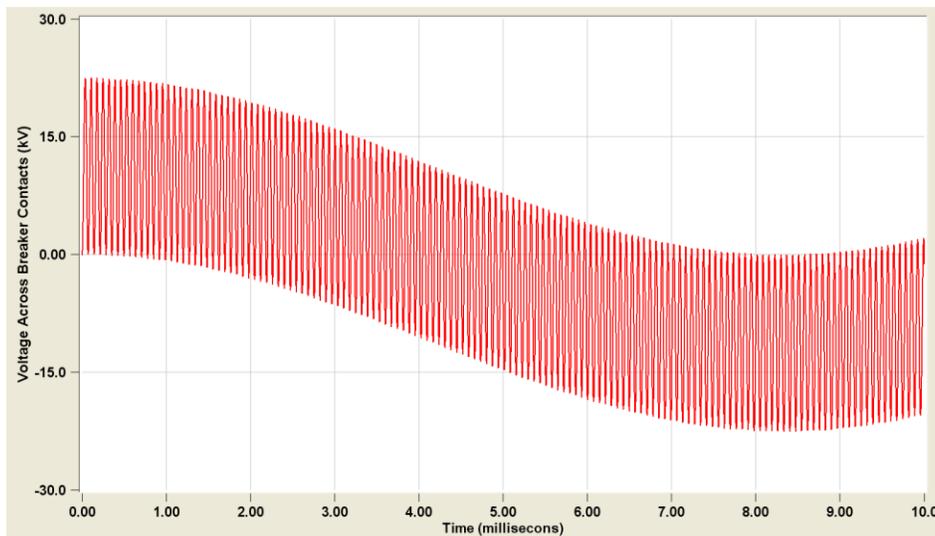
$V_B(t)$  es máximo en  $t = 35.304 \cdot 10^{-6}$ . El voltaje máximo es:

$$V_B(t) = 2\sqrt{(13,8 \cdot 10^3 / 3)^2} = 22.5353 \cdot 10^3 \text{ (Voltios)}$$

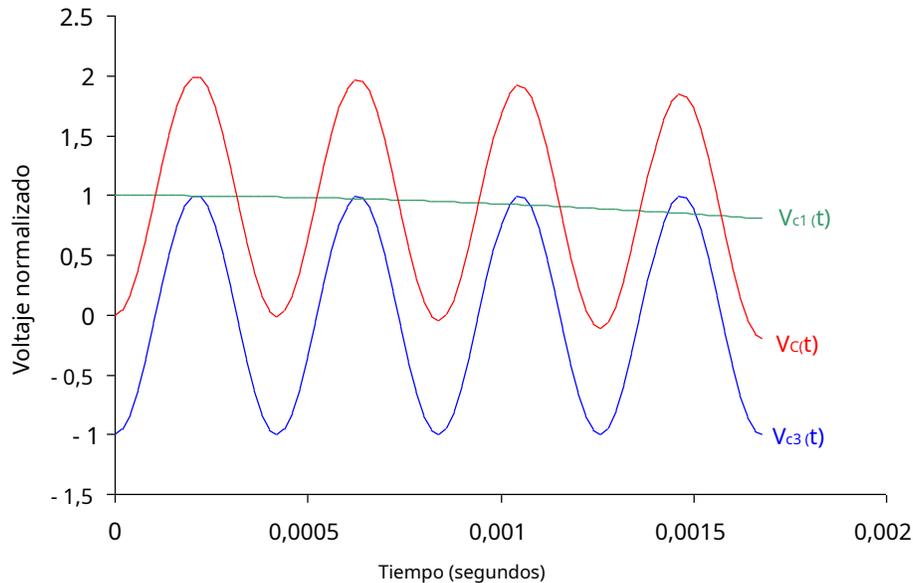
En la figura E4.10a se ilustra un gráfico de la forma de onda de voltaje.



**Figura E4.10a: Voltaje de recuperación transitorio, gráfico de 10 microsegundos**



**Figura E4.10b: Voltaje de recuperación transitorio, gráfico de 10 milisegundos**



**Figura E4.10c. Ilustración del voltaje de recuperación transitorio normalizado**

#### 4.7 Efectos de la puesta a tierra

Muchas condiciones de falla eléctrica involucran las tierras de una instalación eléctrica y el suelo como caminos de flujo de corriente. Estos caminos tienen impedancia eléctrica y, como tal, el flujo de corriente genera voltajes en los neutros y las estructuras conectadas a tierra del sistema. Estos voltajes, más comúnmente conocidos como Aumento del potencial de tierra, pueden causar descargas eléctricas a las personas que tocan estructuras conectadas a tierra y generar problemas de seguridad. El análisis adecuado de estos fenómenos es modelar explícitamente las tierras y la ruta de tierra en el circuito utilizado para el análisis de fallas. El análisis de este modelo proporcionará el nivel de elevación del potencial de tierra, el nivel de corriente eléctrica en las rutas de tierra y otra información pertinente. La inclusión de las tierras del sistema, neutros, cables de tierra, etc. en el análisis se puede lograr de dos formas diferentes: (a) utilizando componentes simétricos, en cuyo caso los motivos se incluyen en el modelo mediante la aplicación adecuada de la transformación simétrica y (b) utilizando análisis de fase directo o sistemas de base física. En esta sección seguimos el primer enfoque. Más adelante, en la sección 4.7, se introduce el segundo enfoque.

Como hemos visto en secciones anteriores, para el análisis de fallas es necesario construir las redes de secuencia de un sistema de energía eléctrica dado. Para poder determinar la distribución de la corriente de falla entre todos los caminos disponibles, es necesario modelar explícitamente las tierras, los neutros, los cables de blindaje, el suelo, etc. alambres, alambres blindados, etc.? Considere los supuestos básicos en la definición de circuitos de secuencia. Uno de los supuestos para los modelos de secuencia es que los elementos del sistema de energía son simétricos. Una consecuencia de esta suposición es que las corrientes de secuencia positiva o negativa fluyen solo en los conductores de fase. Las corrientes eléctricas en el sistema de puesta a tierra (tierra) y los conductores de blindaje o neutro son de secuencia cero únicamente.

secuencia equivalente de red. Por lo tanto, las redes de secuencia positiva y negativa se calculan de la manera habitual ignorando las tierras, los neutros, etc. La red de secuencia cero, sin embargo, debe construirse de tal manera que represente explícitamente (a) el blindaje o los cables neutros, (b) el camino de tierra, (c) las resistencias de la base de la torre y así sucesivamente. Posteriormente, las redes de secuencia se conectan de una manera correspondiente al tipo de falla (es decir, en serie para una sola línea a falla a tierra, etc.). Este procedimiento da como resultado un gran problema de red. Tras la solución de esta red, se obtienen los componentes de secuencia de la corriente eléctrica y el voltaje en todas partes del sistema. A partir de esta información, la corriente eléctrica y el voltaje reales en todas partes del sistema se pueden calcular con la transformación inversa de los componentes simétricos.

Como se ha señalado, la distribución de corriente entre conductores de fase, cables de cielo, conductores neutros y tierra se determina solo con la red de secuencia cero. Esta observación permite una simplificación del procedimiento computacional. Específicamente, necesitamos analizar solo la red de secuencia cero para determinar la distribución de corriente relativa entre todas las rutas paralelas. Los niveles reales de corriente de falla se determinan mediante el análisis de falla habitual. El procedimiento general incluye los siguientes pasos:

**Paso 1:** Calcular y diseñar la red de secuencia positiva del sistema.

**Paso 2:** Calcule y trace la red de secuencia negativa del sistema.

**Paso 3:** Calcule y diseñe la red de secuencia cero para el sistema en consideración. La tierra, los cables de blindaje, los cables neutros, las resistencias de las bases de las torres, las impedancias de las conexiones a tierra de las subestaciones, etc., deben representarse explícitamente.

**Paso 4:** Para una ubicación de falla y un tipo de falla específicos, conecte las redes de secuencia positiva, negativa y cero según lo indique el tipo de falla.

**Paso 5:** Realice un análisis de circuito para la red equivalente del paso 4.

**Paso 6:** Utilice la transformación simétrica inversa para calcular las cantidades de fase reales a partir de la solución en el paso 5.

El procedimiento de cálculo es sencillo. Sin embargo, es necesario aclarar un par de puntos: (a) el cálculo de las resistencias de la base de la torre y la impedancia de tierra de la subestación, y (b) la construcción de la red de secuencia cero de tal manera que se mantenga la identidad de los cables blindados, cables neutros, tierra, etc.

**Impedancia de la estructura de puesta a tierra:** Para sistemas simples de puesta a tierra, por ejemplo, una sola varilla de puesta a tierra, existen fórmulas aproximadas para calcular la resistencia de puesta a tierra. Para los sistemas de puesta a tierra más complicados, como los de una subestación, las tierras de las torres de celosía, etc., el análisis es algo complejo. Para una revisión concisa de los procedimientos computacionales y más información, consulte la referencia [???].

**Construcción de la red de secuencia cero:** La red de secuencia cero se puede construir con el siguiente procedimiento: Primero, cada ruta de flujo de corriente de secuencia cero debe identificarse y caracterizarse con auto-impedancia y posible impedancia mutua con otras rutas. Posteriormente, las corrientes eléctricas en los terminales del dispositivo se pueden expresar como funciones de los voltajes de los terminales del dispositivo o viceversa. Finalmente, las ecuaciones del circuito se transforman con la transformación de componentes simétricos. Las ecuaciones resultantes proporcionan el cero equivalente

red de secuencia. El procedimiento se demostrará con un ejemplo. Específicamente, consideramos el desarrollo de la red de secuencia cero de una línea de transmisión.

La construcción de la red de secuencia cero con representación explícita del cable blindado, la ruta de tierra, etc., se ilustra en la Figura 4.7. La figura 4.7 ilustra el sistema físico con un conjunto de corrientes trifásicas no balanceadas. La figura es útil para determinar la representación de la red de secuencia de la línea. Considere un tramo de la línea. En general, si las corrientes

$\tilde{I}_a, \tilde{I}_b, \tilde{I}_c, y \tilde{I}_{\text{gramo}}$  flujo en los conductores de fase y el cable blindado, respectivamente, de un tramo específico de la línea, los voltajes inducidos a lo largo de los conductores de línea son:

$$\begin{aligned} \tilde{V}_{L,a} - \tilde{V}_{R,a} &= Z_{\text{Real academia de bellas artes}} \tilde{I}_a + Z_{\text{Automóvil club británico}} \tilde{I}_b + Z_{C.A} \tilde{I}_c + Z_{ag} \tilde{I}_{\text{gramo}} \\ \tilde{V}_{L,b} - \tilde{V}_{R,b} &= Z_{\text{licenciado en Letras}} \tilde{I}_a + Z_{\text{cama y desayuno}} \tilde{I}_b + Z_{\text{antes de Cristo}} \tilde{I}_c + Z_{bg} \tilde{I}_{\text{gramo}} \\ \tilde{V}_{L,c} - \tilde{V}_{R,c} &= Z_{\text{California}} \tilde{I}_a + Z_{cb} \tilde{I}_b + Z_{cc} \tilde{I}_c + Z_{cg} \tilde{I}_{\text{gramo}} \\ \tilde{V}_{L,g} - \tilde{V}_{R,g} &= Z_{\text{Georgia}} \tilde{I}_a + Z_{gb} \tilde{I}_b + Z_{GC} \tilde{I}_c + Z_{gg} \tilde{I}_{\text{gramo}} \end{aligned}$$

Los parámetros que aparecen en las ecuaciones anteriores se pueden calcular usando las ecuaciones de Carson exactas o cualquiera de los métodos aproximados discutidos en el Capítulo 3. Para simplificar las ecuaciones Usaremos el método equivalente de profundidad de retorno. (ver Capítulo 3). Usando este método anterior las ecuaciones son:

$$\begin{aligned} \tilde{V}_{L,a} - \tilde{V}_{R,a} &= r_{mi} \tilde{I}_a + jX_{\text{Automóvil club británico}} \tilde{I}_a + r_{mi} jX_{ab} \tilde{I}_b + r_{mi} jX_{CA} \tilde{I}_c + r_{mi} jX_{ag} \tilde{I}_{\text{gramo}} \\ \tilde{V}_{L,b} - \tilde{V}_{R,b} &= r_{mi} jX_{\text{licenciado en Letras}} \tilde{I}_a + r_{mi} jX_{\text{cama y desayuno}} \tilde{I}_b + r_{mi} jX_{\text{antes de Cristo}} \tilde{I}_c + r_{mi} jX_{bg} \tilde{I}_{\text{gramo}} \\ \tilde{V}_{L,c} - \tilde{V}_{R,c} &= r_{mi} jX_{\text{California}} \tilde{I}_a + r_{mi} jX_{cb} \tilde{I}_b + r_{mi} jX_{cc} \tilde{I}_c + r_{mi} jX_{cg} \tilde{I}_{\text{gramo}} \\ \tilde{V}_{L,g} - \tilde{V}_{R,g} &= r_{mi} jX_{\text{Georgia}} \tilde{I}_a + r_{mi} jX_{gb} \tilde{I}_b + r_{mi} jX_{GC} \tilde{I}_c + r_{mi} jX_{gg} \tilde{I}_{\text{gramo}} \end{aligned}$$

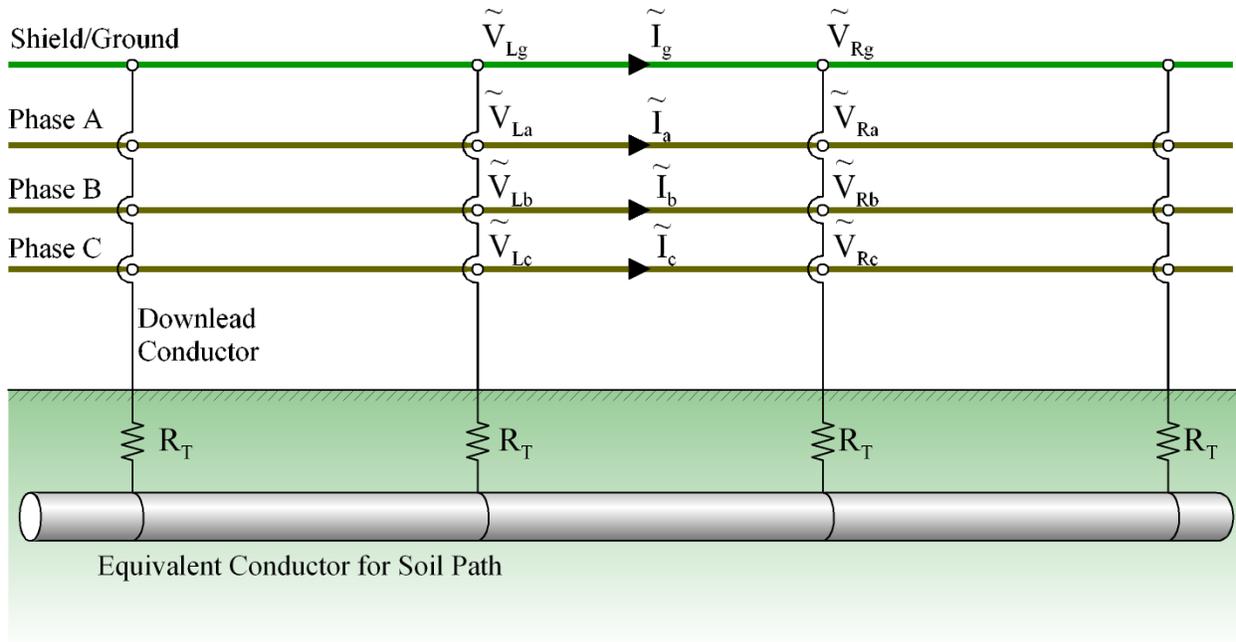
dónde:

$$\begin{aligned} X_{\text{Automóvil club británico}} &= \frac{j}{2} \ln \frac{D}{D_{\text{pag}}}, & X_{gg} &= \frac{j}{2} \ln \frac{D}{D_{\text{gramo}}} \\ X_{ab} &= X_{ba} = \frac{j}{2} \ln \frac{D_{mi}}{D_{ab}}, & X_{\text{antes de Cristo}} &= X_{cb} = \frac{j}{2} \ln \frac{D_{mi}}{D_{\text{antes de Cristo}}}, & X_{\text{California}} &= X_{CA} = \frac{j}{2} \ln \frac{D_{mi}}{D_{\text{California}}} \\ X_{ag} &= X_{\text{Georgia}} = \frac{j}{2} \ln \frac{D_{mi}}{D_{ag}}, & X_{bg} &= X_{gb} = \frac{j}{2} \ln \frac{D_{mi}}{D_{bg}}, & X_{cg} &= X_{GC} = \frac{j}{2} \ln \frac{D_{mi}}{D_{cg}} \\ r_{mi} &= \frac{1}{8}, & D_{mi} &= 2160 \sqrt{\frac{1}{F}} \text{ pies} = 658.368 \sqrt{\frac{1}{F}} \text{ metros}, & & \text{en ohmios } m, f \text{ en Hz} \end{aligned}$$

$D_{\text{pag}}$ : es el radio medio geométrico de los conductores de fase.

$D_g$ : es el radio medio geométrico del conductor blindado (tierra).

$D_{xy}$ : es la distancia entre los conductores xey, x, y puede ser a, b, c o g.



**Figura 4.7 Línea de transmisión trifásica con un conductor de blindaje / tierra**

Con el fin de derivar el circuito equivalente de secuencia de la línea anterior, debemos suponer que la línea es simétrica. Para ello realizamos las siguientes simplificaciones:

$$Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = \frac{1}{3} Z_{aa} + Z_{bb} + Z_{cc} - \frac{1}{3} Z_{ab} - \frac{1}{3} Z_{bc} - \frac{1}{3} Z_{ca}$$

$$Z_{ag} = Z_{bg} = Z_{cg} = \frac{1}{3} Z_{aa} + Z_{bb} + Z_{cc} + Z_{mg} - r_{mi} - jX_{mg} r_{mi} = \frac{j}{2} \ln \frac{D_{mi}}{\sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ca}}}$$

Usando las aproximaciones anteriores, las ecuaciones se pueden convertir en forma de matriz compacta de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \tilde{V}_{L,abc} \\ \tilde{V}_{L,g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{ab} & Z_{ag} \\ Z_{ag} & Z_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{I}_{a,b,c} \\ \tilde{I}_{g} \end{bmatrix}$$

dónde:

$$\tilde{I}_{a,b,c} = \begin{bmatrix} \tilde{I}_a \\ \tilde{I}_b \\ \tilde{I}_c \end{bmatrix}, \quad \tilde{V}_{L,abc} = \begin{bmatrix} \tilde{V}_{La} \\ \tilde{V}_{Lb} \\ \tilde{V}_{Lc} \end{bmatrix}, \quad \tilde{V}_{R,abc} = \begin{bmatrix} \tilde{V}_{Ra} \\ \tilde{V}_{Rb} \\ \tilde{V}_{Rc} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{matrix} & X_s & X_{\text{metro}} & X_{\text{metro}} \\ X & X_{\text{metro}} & X_s & X_{\text{metro}} \\ & X_{\text{metro}} & X_{\text{metro}} & X_s \end{matrix}$$

Las ecuaciones (7.31) se convierten en el marco de componentes simétricos sustituyendo el Corrientes y tensiones trifásicas con sus componentes simétricos. El resultado es

$$\begin{aligned} \tilde{V}_{L,120} - \tilde{V}_{R,120} &= T^{-1} r Y_0 r_{mi} \quad jX \tilde{I}_{120} \quad T^{-1} r_{mi} jX_{mg} \tilde{I}_{\text{gramo}} \\ \tilde{V}_{L,g} - \tilde{V}_{R,g} &= r_{mi} jX_{mg} T_{120}^T \quad r_{\text{gramo}} r_{mi} jX_{gg} \tilde{I}_{\text{gramo}} \end{aligned}$$

Tenga en cuenta que:

$$\begin{matrix} r_{mi} jX_s X_{\text{metro}} & 0 & 0 & r_{mi} jX_1 & 0 & 0 \\ T^{-1} r_{mi} jX T & 0 & r_{mi} jX_s X_{\text{metro}} & 0 & 0 & r_{mi} jX_2 & 0 \\ & 0 & 0 & r_{mi} 3r_{mi} jX_s 2X_{\text{metro}} & 0 & 0 & r_{mi} 3r_{mi} jX_0 \\ & 0 & & & & & \\ T^{-1} r_{mi} jX_{mg} & 0 & & & & & \\ & r_{mi} jX_{mg} & & & & & \\ r_{mi} jX_{mg} T^T & 0 & 0 & 3r_{mi} jX_{mg} & & & \end{matrix}$$

Tras la sustitución de estos resultados en las ecuaciones anteriores y expandiendo la ecuación matricial:

$$\tilde{V}_{L,1} - \tilde{V}_{R,1} = r_{mi} jX_1 \tilde{I}_1 \quad (7.33a)$$

$$\tilde{V}_{L,2} - \tilde{V}_{R,2} = r_{mi} jX_2 \tilde{I}_2 \quad (7.33b)$$

$$\tilde{V}_{L,0} - \tilde{V}_{R,0} = r_{mi} 3r_{mi} jX_0 \tilde{I}_0 + r_{mi} jX_{mg} \tilde{I}_{\text{gramo}} \quad (7.33c)$$

$$\tilde{V}_{L,g} - \tilde{V}_{R,g} = 3r_{mi} jX_{mg} \tilde{I}_0 + r_{\text{gramo}} r_{mi} jX_{gg} \tilde{I}_{\text{gramo}} \quad (7.33d)$$

Las ecuaciones derivadas expresan los voltajes versus las corrientes de componentes simétricos en las fases de la línea y la corriente real en el cable blindado / neutro. Para hacer los dos últimos ecuaciones simétricas, la corriente eléctrica  $\tilde{I}_{\text{gramo}}$  es sustituido por  $3\tilde{I}_0$ . Ahora las ecuaciones leer:

$$\tilde{V}_{L,1} - \tilde{V}_{R,1} = r_{mi} jX_1 \tilde{I}_1 \quad (4.33a)$$

$$\tilde{V}_{L,2} - \tilde{V}_{R,2} = r_{mi} jX_2 \tilde{I}_2 \quad (4.33b)$$

$$\tilde{V}_{L,0} \quad \tilde{V}_{R,0} \quad r \quad 3r_{mi} \quad jx_0 \quad I_0 \quad \tilde{3} \quad r_{mi} \quad jx_{mg} \quad I_{gramo0} \quad \tilde{\quad} \quad (4.33c)$$

$$\tilde{V}_{L,g} \quad \tilde{V}_{R,g} \quad \tilde{3} \quad r_{mi} \quad jx_{mg} \quad I_0 \quad \tilde{3} \quad r_{gramo} \quad r_{mi} \quad jx_{gg} \quad I_{gramo0} \quad \tilde{\quad} \quad (4.33d)$$

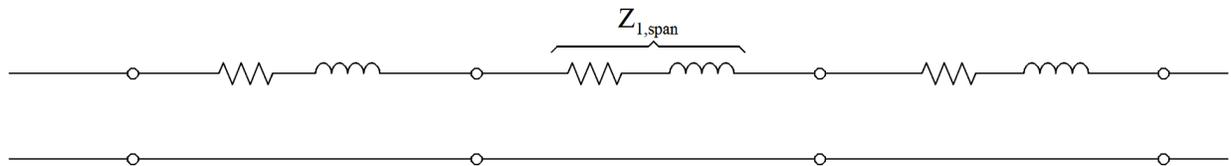
Las ecuaciones (7.34) representan el circuito equivalente que se muestra en la figura 4.8a, by c. Específicamente, la Figura 4.8a ilustra la red de secuencia positiva, la Figura 4.8b ilustra la red de secuencia negativa y la Figura 4.8c ilustra la red de secuencia cero. La comparación de las ecuaciones con el circuito equivalente de la figura 4.8 produce

$$Z_{1,lapso} \quad r \quad jx_1$$

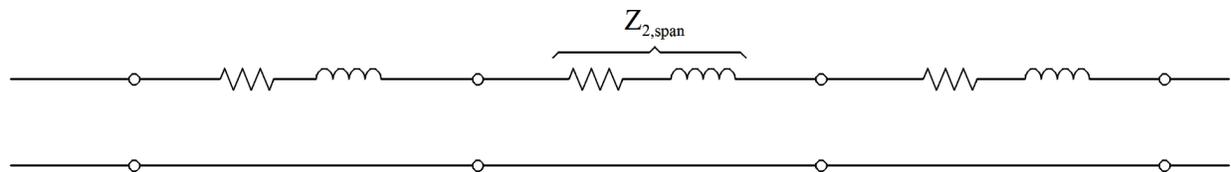
$$Z_{0,lapso} \quad r \quad 3r_{mi} \quad jx_0$$

$$Z_{0g,lapso} \quad 3 \quad r_{gramo} \quad r_{mi} \quad jx_{gg}$$

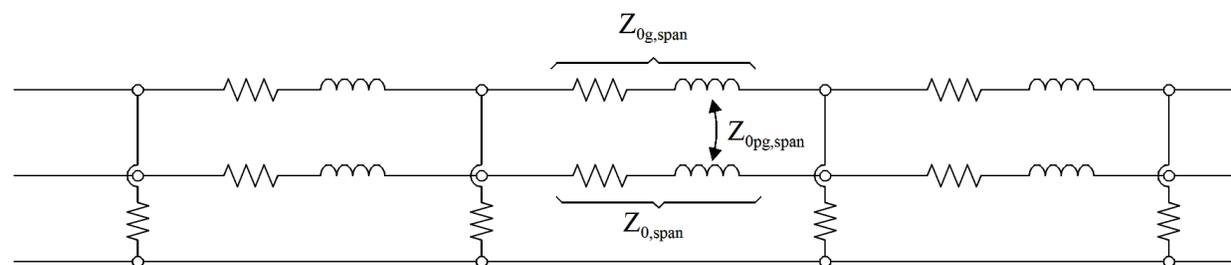
$$Z_{0pg,lapso} \quad 3 \quad r_{mi} \quad jx_{mg}$$



(a)



(b)



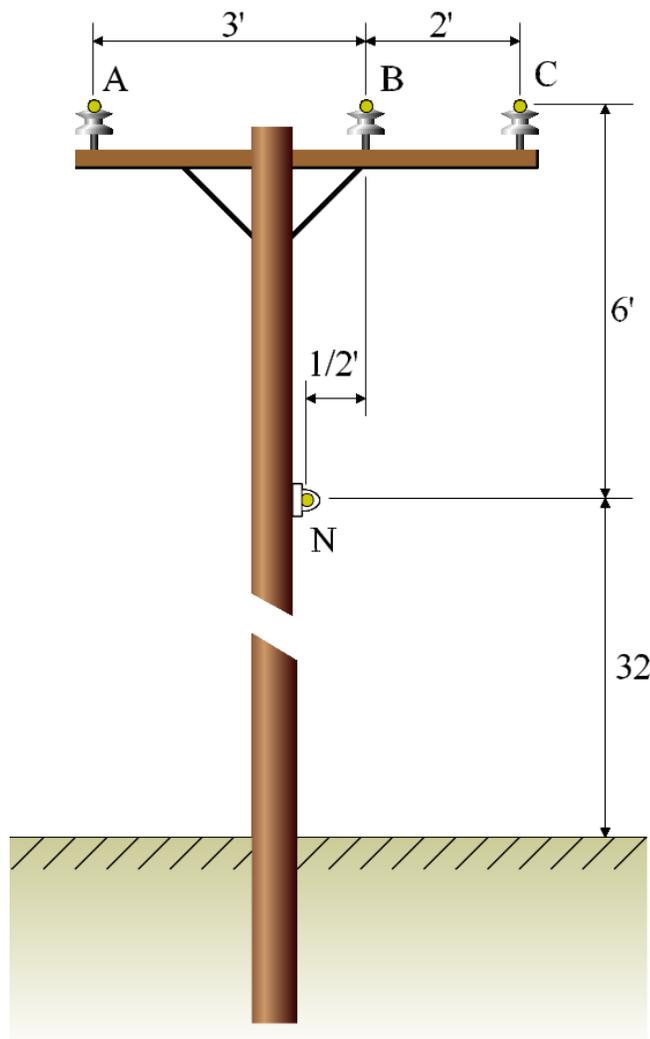
(c)

**Figura 4.8: Circuitos equivalentes de secuencia de la línea eléctrica de la figura 4.7**  
 [(a) Circuito equivalente de secuencia positiva, (b) Circuito equivalente de secuencia negativa, (c) Secuencia cero  
 Circuito equivalente]

Los circuitos de secuencia de las líneas de transmisión se demostrarán con un ejemplo.

**Ejemplo E4.7:** Considere la línea de distribución de la figura E4.7. Los conductores de fase son ACSR, 4/0 con los siguientes parámetros:  $r = 0.592 \text{ ohmios / milla}$ ,  $d = 0.00814 \text{ pies}$ . El neutral conductor es ACSR, 3/0 con los siguientes parámetros:  $r = 0.723 \text{ ohmios / milla}$ ,  $d = 0.006 \text{ pies}$ .

La línea tiene 3,1 millas de largo y la longitud del tramo es de 0,05 millas, es decir, hay 20 postes por milla. La resistividad del suelo es de 100 ohmios metros. La resistencia de tierra del polo es de 25 ohmios. Calcule las redes de secuencia de esta línea de distribución. El conductor neutro debe estar representado explícitamente en el modelo de secuencia cero.



**Figura E4.7** Ejemplo de línea de distribución

**Solución:** Tenga en cuenta que esta línea tendrá 62 tramos. La secuencia de circuitos equivalentes para un tramo de las líneas se calculan y se muestran en la Figura E4.7a.

En resumen, para propósitos de análisis de la distribución de corriente de falla y del aumento del potencial de tierra de los neutros del sistema, las redes de secuencia se pueden emplear como una aproximación aceptable. Para ello, la red de líneas de transmisión de secuencia cero debe representar explícitamente todos los caminos disponibles para el flujo de corrientes de secuencia cero. La red de secuencia cero de una línea de transmisión que cumple con este requisito se ha desarrollado e ilustrado en la figura 4.8c. Una vez que se han desarrollado las redes de secuencia, el resto del procedimiento es similar al análisis de fallas habitual. El procedimiento se ilustrará con un ejemplo.

**Ejemplo E4.8.** Considere el sistema de energía eléctrica de la Figura E4.8. El sistema comprende una subestación de distribución con un transformador conectado delta-estrella, una línea de transmisión, una fuente trifásica equivalente y una línea de distribución. La línea de distribución alimenta una casa a través de una distribución transformador. Los parámetros del sistema son:

Fuente equivalente (115 kV):

$$z_1 = j28,5 \text{ ohmios}, z_2 = j32,5 \text{ ohmios} \quad z_0 = j19,5 \text{ ohmios} \quad r = 50 \text{ ohmios}$$

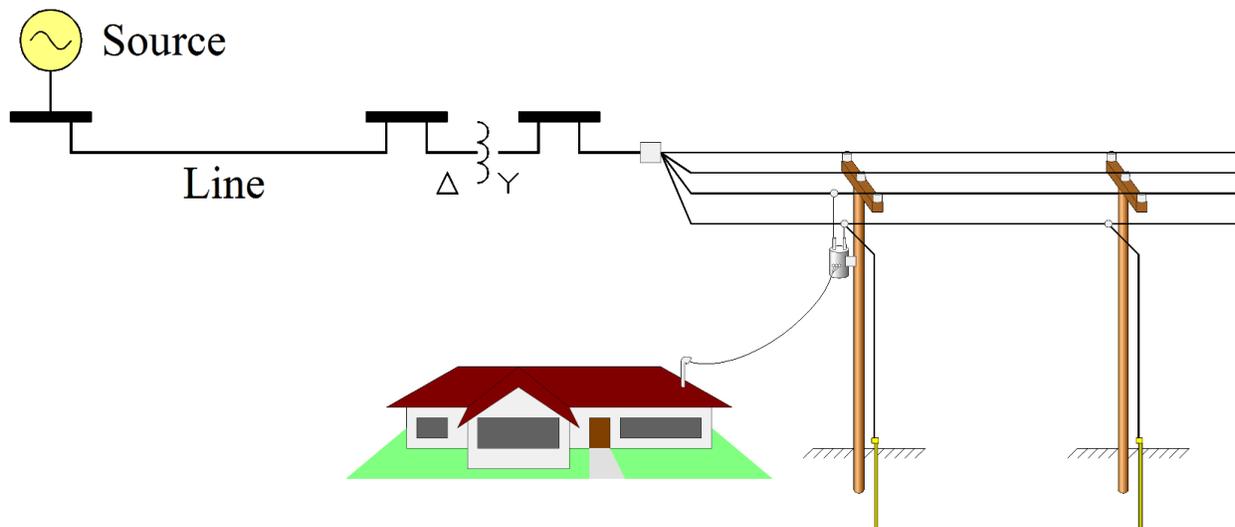
Línea de transmisión: (línea de tres cables):

$$z_1 = z_2 = j31,5 \text{ ohmios}, z_0 = 2,8 \text{ ohmios} \quad j68,5 \text{ ohmios}$$

Transformador (20 MVA, 115kV: 12kV);  $X_1 = X_2 = X_0 = 0,10 \text{ pu}$   $20 \text{ MVA}$   $B_{\text{hermana}}$

La impedancia de tierra de la subestación es de 1,0 ohmios. La línea de distribución es la línea descrita en el Ejemplo E4.7. Se puede descuidar la presencia del sistema eléctrico de la casa.

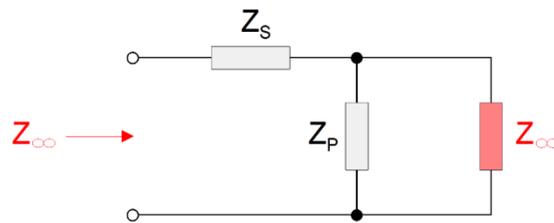
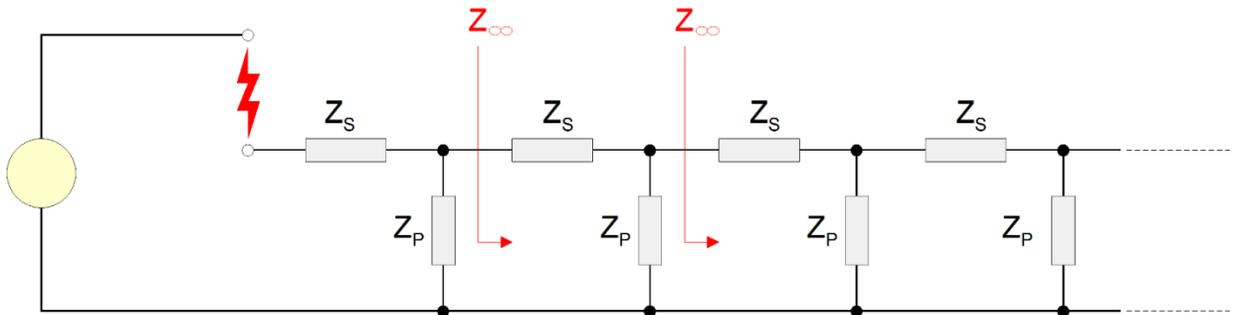
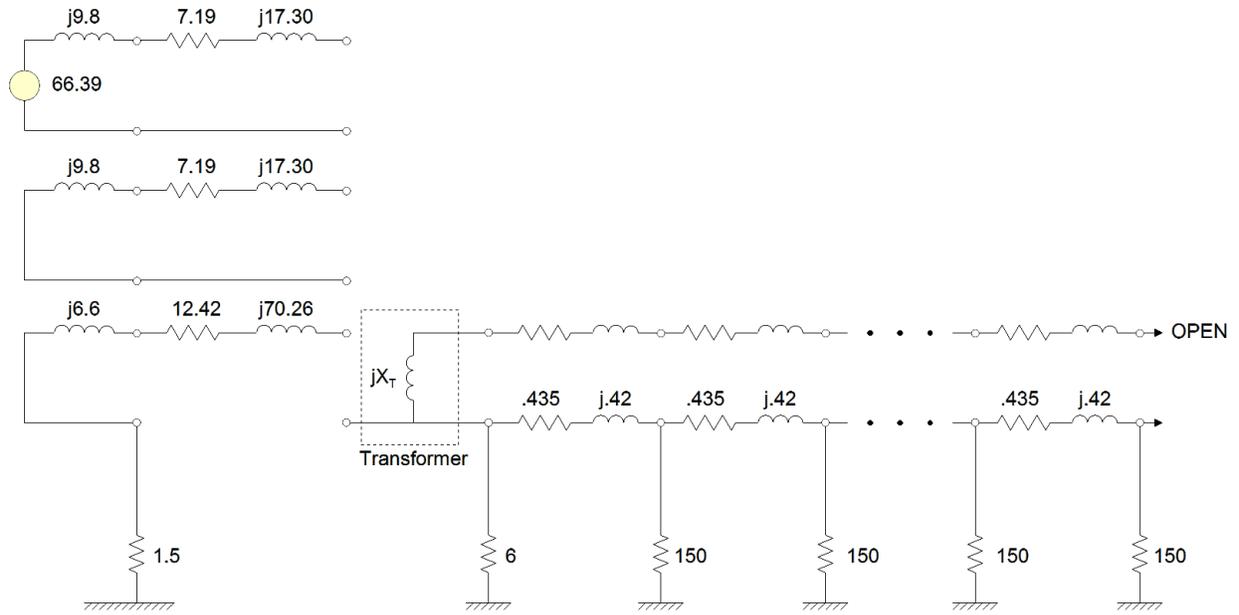
Calcule el aumento del potencial de tierra en la tierra del polo (cerca de la casa) durante una falla de línea única a tierra en el lado alto del transformador conectado delta-estrella.



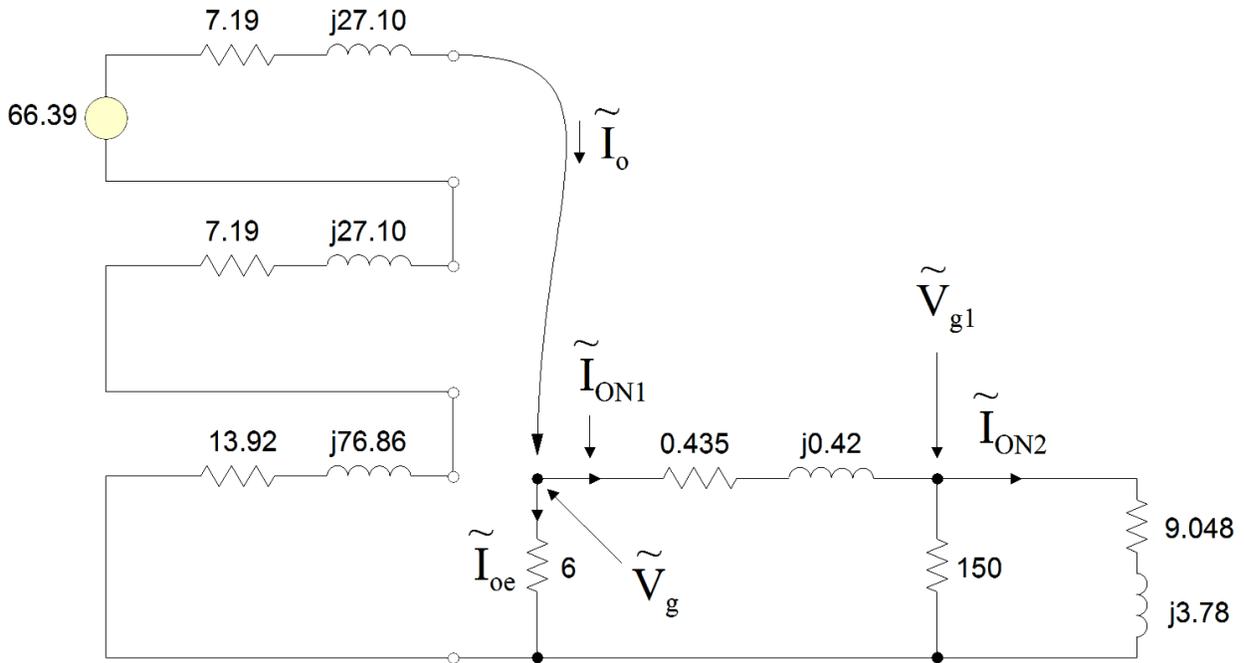
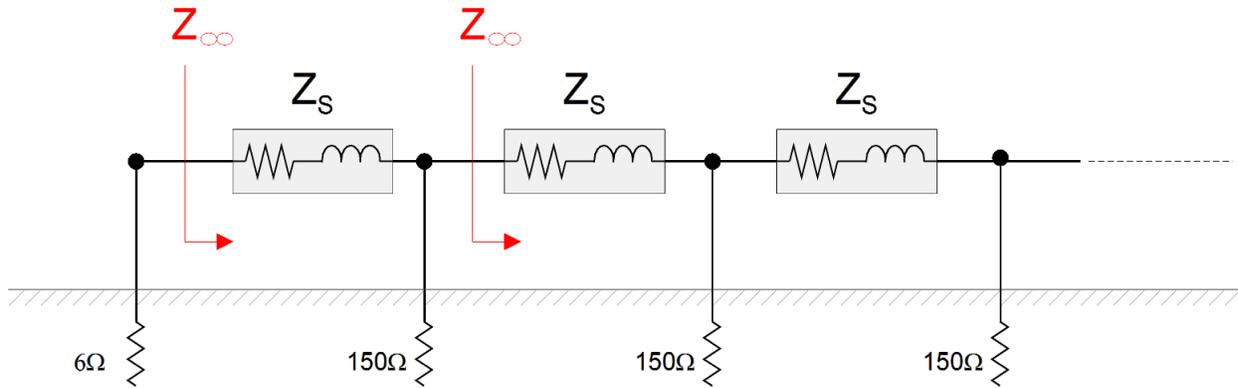
**Figura E4.8. Subestación de distribución simplificada y línea de distribución que atiende a casa**

**Solución:** Las redes de secuencia equivalente para este sistema se construyen en la Figura E4.8a.

Tenga en cuenta que el circuito equivalente de la línea de distribución se tomó del ejemplo E4.7.



$$Z = \frac{Z_S}{2} \sqrt{\frac{Z_S^2}{2} + Z_S Z_{PAG}}$$



$$\tilde{V}_{gramo1} = 1,752 \text{ mi } \angle 69,11^\circ \text{ kV}$$

$$\tilde{I}_{oe} = 0,31 \text{ mi } \angle 7,75^\circ \text{ kA}$$

$$\tilde{I}_{EN1} = 0,1894 \text{ mi } \angle 90,42^\circ \text{ kA}$$

$$\tilde{I}_0 = 0,49 \text{ mi } \angle 76,32^\circ \text{ kA}$$

$$\tilde{V}_{gramo} = 1,858 \text{ mi } \angle 67,75^\circ \text{ kV}$$

$$\tilde{I}_{EN2} = 0,179 \text{ mi } \angle 91,79^\circ \text{ kA}$$

## 4.8 Análisis de fallas: métodos directos

El método de componentes simétricos ha sido ampliamente aceptado y utilizado en la ingeniería de energía eléctrica. Sin embargo, su aplicabilidad se limita a los problemas de análisis de sistemas de potencia para los que la suposición de sistemas trifásicos simétricos es aceptable. En general, las impedancias de las tres fases pueden variar entre un 4 y un 6 por ciento en los sistemas típicos de transmisión aérea. En este caso, la suposición de componentes simétricos incurre en un error de alrededor del 4 al 6 por ciento. Para muchos problemas de análisis, como el análisis de cortocircuitos, el análisis de flujo de potencia, la estabilidad transitoria, etc., esta suposición ha sido ampliamente aceptada. Para otras aplicaciones, como el análisis de redes multifásicas generales o redes trifásicas con derivaciones monofásicas y bifásicas, el método de componente simétrico se vuelve engorroso. Con el fin de calcular la distribución de la corriente de falla entre varias rutas, como cables de protección, neutro, tierra, etc. y aumento del potencial de tierra, el método de componente simétrico se vuelve muy complejo y, por lo tanto, poco atractivo. Para una introducción sobre cómo se puede utilizar el método de componente simétrico para la distribución de corriente de falla y el aumento del potencial de tierra, consulte la referencia [???]. El método de componentes simétricos se desarrolló en una era en la que la potencia informática era limitada. La aproximación fue bastante aceptable considerando los beneficios y la simplificación del procedimiento de análisis. Hoy en día, la potencia informática está disponible y no es necesario hacer esta aproximación. Aquí describimos una metodología que se basa en el análisis de fase directo (sin transformaciones). Este enfoque proporciona un análisis preciso de las corrientes de falla, su distribución,

El análisis de fase directa se basa en la representación de la matriz de admitancia de los elementos del sistema eléctrico. Este enfoque de modelado se puede considerar como una generalización de la representación equivalente de Norton. El método es simple y puede dar cuenta de (a) asimetrías de elementos del sistema de energía (es decir, líneas sin transponer, bancos de transformadores con impedancias desiguales, etc.), (b) sistemas monofásicos o bifásicos, y (c) sistemas multifásicos generales. Por otro lado, el método es computacionalmente intensivo.

### 4.8.1 Base del método

La metodología se basa en una representación de admitancia de elementos del sistema de energía eléctrica simétricos o asimétricos de una o varias fases. Por ejemplo, considere un transformador monofásico. Este elemento puede verse como un bloque con cuatro terminales, como en la Fig. 4.12. Sin tener en cuenta la saturación del núcleo magnético, el dispositivo es lineal. Por tanto, existe una relación lineal entre los voltajes terminales y las corrientes terminales. Es decir,

$$\begin{bmatrix} \tilde{I}_1 \\ \tilde{I}_2 \\ \tilde{I}_3 \end{bmatrix} = Y \begin{bmatrix} \tilde{V}_1 \\ \tilde{V}_2 \\ \tilde{V}_3 \end{bmatrix}$$

La ecuación anterior es una forma general del equivalente de Norton del elemento en consideración. Por definición, la matriz  $Y$  es la matriz de admitancia del transformador. En caso de que el dispositivo esté activo, es decir, contenga fuentes (por ejemplo, un generador), una relación similar

existe entre las corrientes y voltajes terminales con la adición de que habrá fuentes equivalentes en la ecuación. La forma general de las ecuaciones será:

$$\begin{array}{r} \tilde{I}_1 \\ \tilde{I}_2 \\ \tilde{I}_3 \end{array} Y \begin{array}{r} \tilde{V}_1 \\ \tilde{V}_2 \\ \tilde{V}_3 \end{array} B \begin{array}{r} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{array}$$

La matriz de admitancia y las fuentes equivalentes, si están presentes, se determinan considerando los circuitos específicos del elemento. En el Capítulo 3, discutimos el cálculo de la matriz de admitancia de una línea de transmisión. En general, cualquier elemento del sistema de energía lineal puede asumir una descripción similar. Una vez que todos los elementos se describen de esta manera, el análisis nodal se aplica directamente para analizar el sistema de energía eléctrica en estado estacionario.

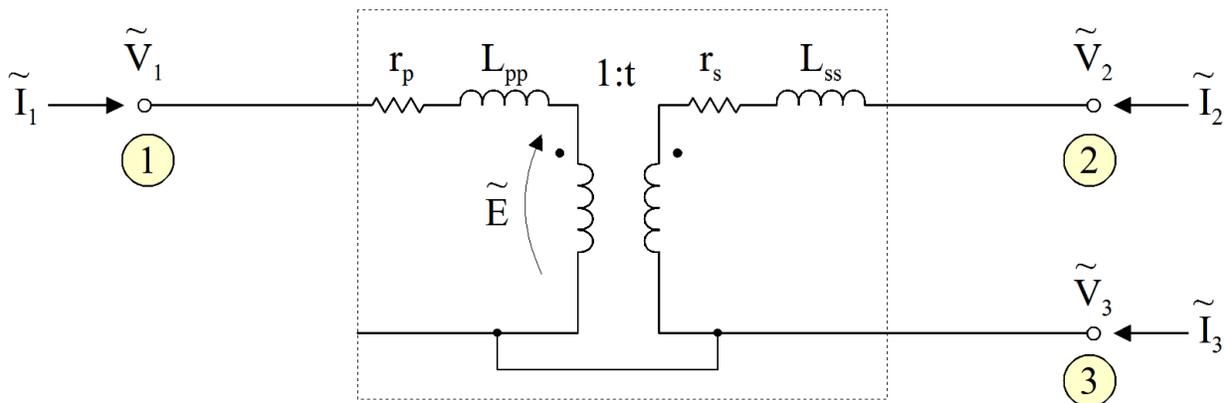
En las secciones siguientes se describe el procedimiento de modelado y se describe la aplicación del análisis nodal. Se empleará un ejemplo para demostrar el análisis de fallas en cantidades de fase directa.

#### 4.8.2 Matriz de admitancia de los elementos del sistema de potencia

En esta sección presentamos los procedimientos básicos de modelado mediante los cuales se calcula la matriz de admitancia de los elementos del sistema eléctrico. La idea básica de estos procedimientos es simple: se escriben las ecuaciones del circuito que describen los elementos del sistema de potencia. Entonces se eliminan todas las variables excepto los voltajes terminales. El resultado proporciona la matriz de admitancia. Dependiendo de la complejidad del elemento del sistema de energía en consideración, el procedimiento puede ser simple o complejo. Los procedimientos se ilustran aquí con aplicaciones típicas.

##### *Transformador monofásico*

Un transformador monofásico se ilustra en la Figura 4.12.



**Figura 4.12. Un transformador monofásico**

Las ecuaciones que describen el transformador son

$$\begin{aligned} \tilde{V}_1 - \tilde{V}_3 - r_{pag} j L_{pp} \tilde{I}_1 - m \tilde{i} &= 0 \\ \tilde{V}_2 - \tilde{V}_3 - r_s j L_{ss} \tilde{I}_2 - t \tilde{E} &= 0 \\ 0 - \tilde{I}_1 - \tilde{I}_2 - \tilde{I}_3 &= 0 \\ 0 - \tilde{I}_1 - t \tilde{I}_2 - \tilde{E} &= 0 \end{aligned}$$

Definir:

$$\begin{aligned} Z_{pag} = r_{pag} + j L_{pp}, \quad y_{pag} = \frac{1}{Z_{pag}} \\ Z_s = r_s + j L_s, \quad y_s = \frac{1}{Z_s} \end{aligned}$$

La última ecuación se puede utilizar para eliminar la variable  $E$ . Específicamente, resuelve la primera ecuación por  $\tilde{I}_1$  y la segunda ecuación de  $\tilde{I}_2$ , sustituir en la última ecuación y resolver para  $E$ :

$$\begin{aligned} \tilde{I}_1 = y_{pag} \tilde{V}_1 - \tilde{V}_3 - m \tilde{i} \\ \tilde{I}_2 = y_s \tilde{V}_2 - \tilde{V}_3 - t \tilde{E} \end{aligned}$$

La sustitución en la última ecuación produce:

$$y_{pag} \tilde{V}_1 - \tilde{V}_3 - m \tilde{i} - t y_s \tilde{V}_2 - \tilde{V}_3 - t \tilde{E} = 0$$

Sobre la solución para  $\tilde{E}$ :

$$\tilde{E} = y_{pag} \tilde{V}_1 - t y_s \tilde{V}_2 - 2 \tilde{V}_3 - m \tilde{i}$$

Al sustituir la variable  $m \tilde{i}$  en las ecuaciones (4.39):

$$\begin{aligned} \tilde{V}_1 - \tilde{V}_3 - y_{pag} t y_s \tilde{V}_2 - 2 \tilde{V}_3 - y_{pag} \tilde{V}_1 + t y_s \tilde{V}_2 + 2 \tilde{V}_3 &= Z_{pag} \tilde{I}_1 \\ \tilde{V}_2 - \tilde{V}_3 - t y_s \tilde{V}_2 - \tilde{V}_3 - y_{pag} t y_s \tilde{V}_2 - 2 \tilde{V}_3 - y_{pag} \tilde{V}_1 + t y_s \tilde{V}_2 + 2 \tilde{V}_3 &= Z_s \tilde{I}_2 \\ 0 - \tilde{I}_1 - \tilde{I}_2 - \tilde{I}_3 &= 0 \end{aligned}$$

Las ecuaciones (4.36) se escriben en notación matricial compacta de la siguiente manera:

$$\tilde{A} \tilde{V} = \tilde{Z} \tilde{I}$$

dónde

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \frac{y_{pag}}{y_{pag}^2 t y_s^2} & \frac{t y_s}{y_{pag} t y_s^2} & \frac{y_{pag} t y_s}{y_{pag} t y_s^2} & 1 \\ \frac{t y_{pag}}{y_{pag} t y_s^2} & 1 & \frac{t^2 y_s}{y_{pag} t^2 y_s^2} & \frac{t y_{pag} t^2 y_s}{y_{pag} t y_s^2} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$Z = \begin{bmatrix} z_{pp} & 0 & 0 \\ 0 & z_s & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{I} = \begin{bmatrix} \tilde{I}_1 \\ \tilde{I}_2 \\ \tilde{I}_3 \end{bmatrix}, \quad \tilde{V} = \begin{bmatrix} \tilde{V}_1 \\ \tilde{V}_2 \\ \tilde{V}_3 \end{bmatrix}$$

La matriz Z no es singular. Así Z<sup>-1</sup> existe. Pre-multiplicación de la ecuación anterior por Z<sup>-1</sup>

rendimientos

$$\tilde{I} Z^{-1} A \tilde{V} = \tilde{Y} \tilde{V}$$

Por tanto, la matriz de admitancia del transformador monofásico de la figura 4.11 es

$$Y = Z^{-1} A$$

**Ejemplo E4.11:** Un transformador monofásico tiene una clasificación de 15 kVA, 7200/240 V. La impedancia de fuga es del 2,2% en su clasificación y la resistencia es del 0,8%. La corriente de magnetización es del 0,7%. Calcule la matriz de admitancia del transformador.

**Solución:** Suponiendo que la impedancia del transformador se divide por igual entre los dos devanados (por unidad), los parámetros  $r_{pag}$ ,  $L_{pp}$ , y así sucesivamente, se calculan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 r_{pag} &= \frac{(0,4) \frac{7200}{240} (0,01) (7,2)_2}{0,015} = 13.824 \text{ ohmios} \\
 r_s &= \frac{(0,4) (0,01) (0,24)_2}{0,015} = 0.01536 \text{ ohmios} \\
 L_{PD} &= \frac{(100,0 / 0,7) (7,2) (0,24)}{0,015} = 9600.0 \text{ ohmios}
 \end{aligned}$$

$$L_{página\ norte\ L_{PD}} \frac{(1,1) (0,01) (7,2)_2}{0,015} \quad 288038.016\ ohmios$$

$$L_{ss} \frac{L_{PD}}{norte} \frac{(1,1) (0,01) (0,24)_2}{0,015} \quad 320.04224\ ohmios$$

$$Z_{pag} \quad 13.824 \quad j288038.016\ ohmios$$

$$Z_s \quad 0.01536 \quad j320.04224\ ohmios$$

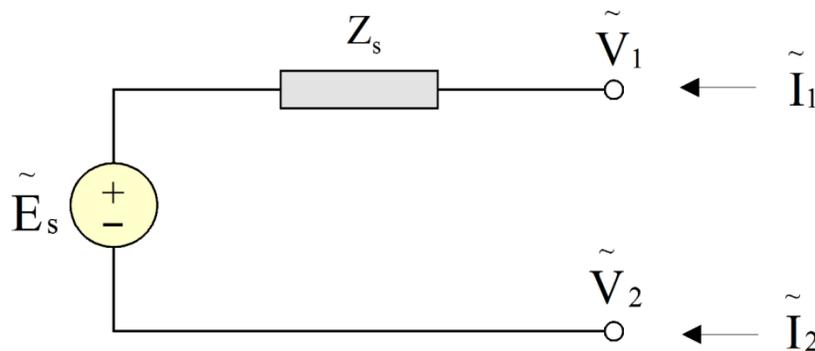
$$Z_{metro} \quad j600.0\ ohmios$$

Tras la sustitución en la ecuación (4.41) y la evaluación, tenemos

$$Y \begin{bmatrix} 0,004224 & j0,011616 & 0,12673 & j0,34851 & 0 \\ 0,12673 & j0,34851 & 3,8017 & j10,4565 & 0 \\ 0 & 0 & j0,001823 & 0 & j0,001823 \end{bmatrix}$$

### Fuente monofásica

El circuito equivalente de Thevenin de una fuente monofásica se ilustra en la Figura 4.13.



**Figura 4.13: Una fuente monofásica**

La representación de la matriz de admitancia de una fuente monofásica se calcula de la siguiente manera. Las ecuaciones que describen el modelo de la Figura 4.13 son:

$$\begin{bmatrix} \tilde{V}_1 \\ \tilde{V}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_s \tilde{I}_1 \\ m_i \tilde{I}_2 \end{bmatrix}$$

Tras la solución de la ecuación (4.42) para  $\tilde{I}_1, \tilde{I}_2$ :

$$\begin{bmatrix} \tilde{I}_1 \\ \tilde{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_s & y_s \\ y_s & y_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{V}_1 \\ \tilde{V}_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} y_s m_i \\ y_s m_i \end{bmatrix}, \quad y_s = \frac{1}{z_s}$$

Las ecuaciones (4.43) están en la forma deseada.

**Ejemplo E4.12:** Considere una fuente monofásica de 7200 V de impedancia interna  $j2$  . Calcular la ecuación de la matriz de admitancia de la fuente.

**Solución:** La matriz de admitancia es

$$\begin{array}{ccccc} \tilde{I}_1 & j0,5 & j0,5 & \tilde{V}_1 & j3600.0 \\ \tilde{I}_2 & j0,5 & j0,5 & \tilde{V}_2 & j3600.0 \end{array}$$

### 4.8.3 Análisis nodal

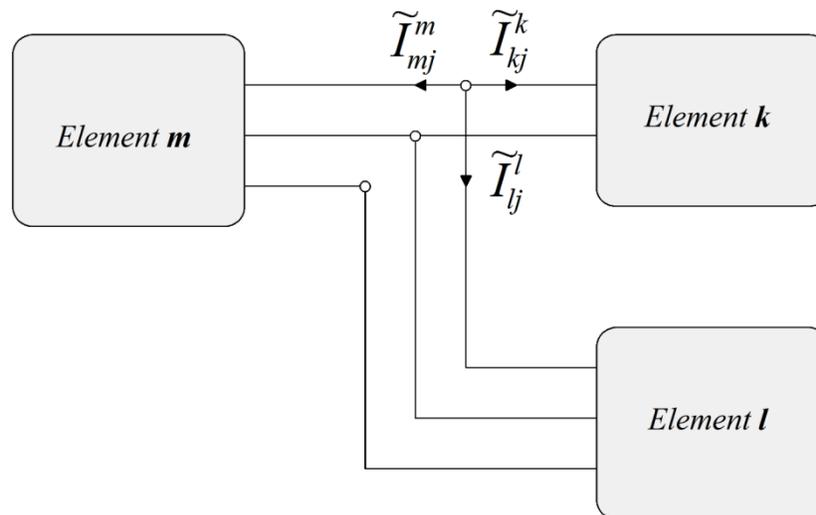
Considere un sistema de energía eléctrica que consta de  $n$  elementos interconectados. La representación de la matriz de admitancia para el elemento  $k$  es

$$\tilde{I}_k \tilde{Y}_k V_k B_k \quad \text{para dispositivos } k = 1, 2, \dots, K$$

dónde  $Y_k$  es el a matriz de dmitancia del elemento  $k$  y  $B_k$  es la fuente equivalente del elemento  $k$ .

Tenga en cuenta que el superíndice denota el dispositivo.

Para el análisis de fallas, la falla también se considera un elemento y se calcula la representación de la matriz de admitancia de la falla. En este caso, una de las ecuaciones (4.44) representa el modelo de falla. Las ecuaciones (4.44) establecen que la corriente eléctrica en cualquier terminal de un elemento del sistema de energía eléctrica es una combinación lineal de los voltajes terminales del elemento más una constante. Por otro lado, el elemento puede estar conectado a otros elementos. Considere un nodo de interconexión  $j$  como se ilustra en la Figura 4.14.



**Figura 4.14: Un nodo de interconexión general**

La ley de la corriente de Kirchhoff aplicada en el nodo  $j$  produce

$$\tilde{I}_{j(k)}^k \quad \tilde{I}_{j(m)}^m \quad \dots \quad 0$$

Dónde:  $\tilde{I}_{j(k)}^k$  es la corriente eléctrica que fluye hacia la terminal j del dispositivo k,

$\tilde{I}_{j(m)}^m$  es la corriente eléctrica que fluye hacia la terminal j del dispositivo m, etc.

Considere una red con muchos dispositivos. La ecuación de Norton generalizada para cada dispositivo se expresa con la ecuación (). Los terminales del dispositivo k están en general numerados  $1, 2, \dots, n(k)$ , donde  $n(k)$  es el número de terminales del dispositivo k. Ahora considere toda la red. Asume eso para a cada nodo de la red se le asigna un número y que el número total de nodos es n. Los números asignados a los nodos de la red serán  $1, 2, \dots, n$ . Necesitamos establecer un correspondencia entre los números de nodo de la red y los números de nodo del terminal del dispositivo. Esto se logra con la matriz de incidencia del dispositivo k,  $A_k$ . Específicamente, la matriz de incidencia del dispositivo k se define de la siguiente manera:

$$A_k: \quad A_{kj} \quad \begin{cases} 1, & \text{si el nodo } j \text{ del dispositivo } k \text{ está conectado al nodo de red } i \\ 0, & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

Ahora considere el producto del vector de corriente del terminal del dispositivo y la matriz de incidencia:

$$A_k \mathbf{I}_k$$

La expresión anterior es un vector de dimensión igual al número de nodos de red y contiene en la entrada j la corriente terminal del dispositivo k si el dispositivo k está conectado al nodo de red j, de lo contrario es cero. Usando este vector, la ley de la corriente de Kirchoff en cada nodo de la red se expresa de la siguiente manera:

$$\sum_{k=1}^K A_k \mathbf{I}_k = \mathbf{0}$$

Tras la sustitución de las corrientes del dispositivo:

$$\sum_{k=1}^K A_k Y_k \tilde{V}_k - B_k = \mathbf{0}$$

Ahora considere el vector de voltajes terminales del dispositivo,  $\tilde{V}_k$  y el vector de nodo de red voltajes  $V$ . Los dos vectores están interrelacionados con la matriz de incidencia de la siguiente manera:

$$\tilde{V}_k = A_k^T V$$

Tras la sustitución y reorganización:

$$\sum_{k=1}^K Y_k A_k^T A_k V - \sum_{k=1}^K B_k = \mathbf{0}$$

Esta ecuación se puede escribir como:

$$Y \tilde{V} = B$$

Dónde:

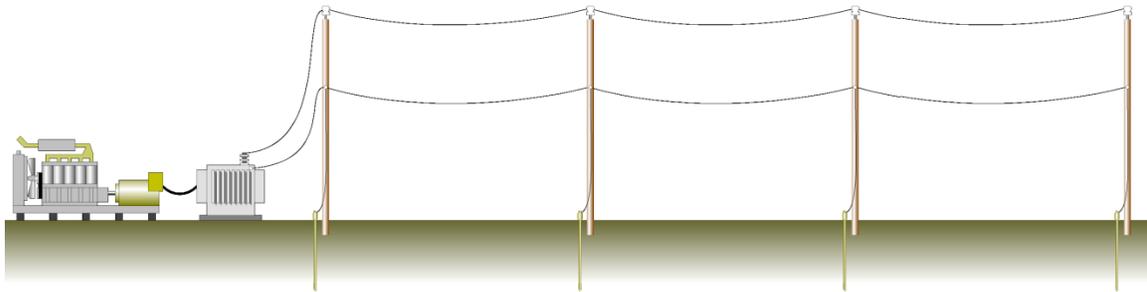
$Y = \sum_{k=1}^K A_k Y_k A_k^T$  es la matriz de admitancia de toda la red

$B = \sum_{k=1}^K A_k B_k$  es un vector de fuentes de corriente independientes

$\tilde{V}$  es el vector de voltajes en los nodos del sistema

La solución de la ecuación anterior produce el voltaje en cada nodo del sistema. La sustitución inversa en las ecuaciones (xxx) produce la corriente eléctrica en los terminales de cada dispositivo. A partir de esta información, se puede calcular cualquier otra cantidad de interés. Por ejemplo, el aumento del potencial de tierra de un sistema de conexión a tierra de una subestación es el voltaje en el nodo que representa el neutro, y así sucesivamente. El procedimiento se ilustrará con un ejemplo.

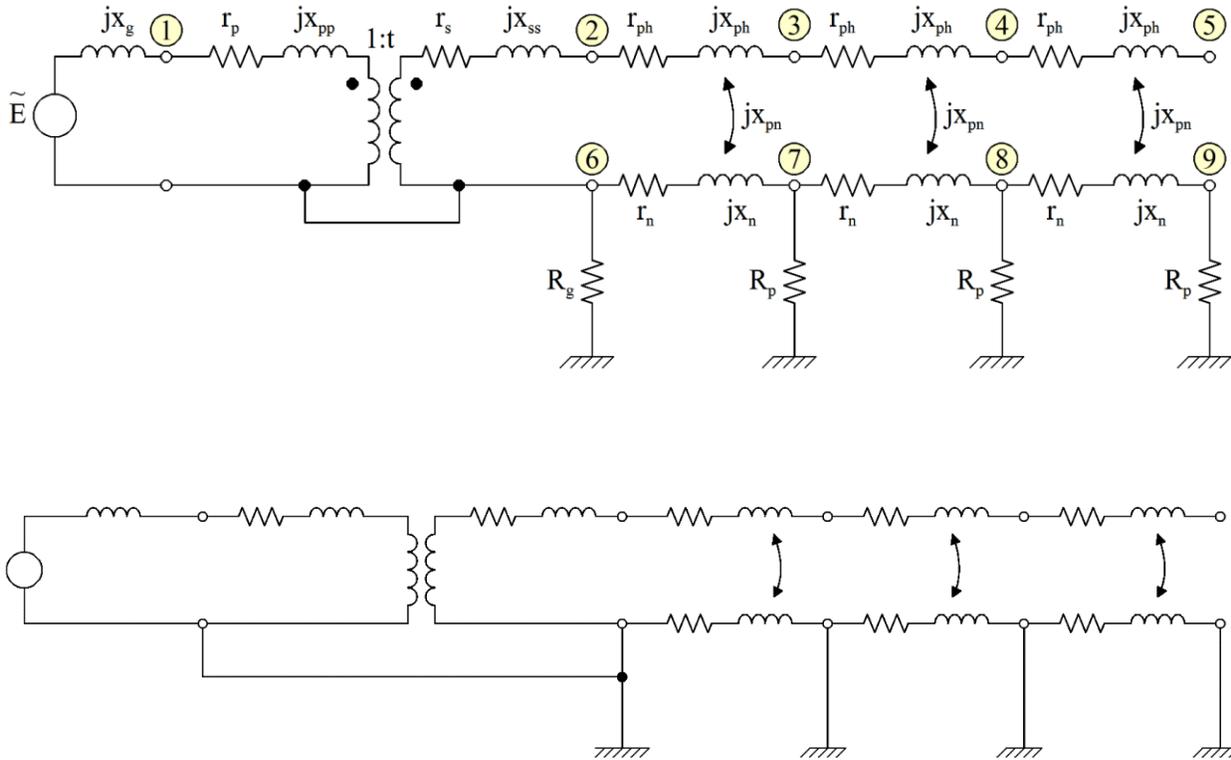
**Ejemplo E4.13:** Considere un sistema de energía simple (inventado) que consta de un generador monofásico de 277 voltios, 60 Hz, un transformador monofásico de 277 V / 7200 V y una línea de distribución monofásica de 7,2 kV. El sistema se ilustra en la Figura E4.13. La resistencia a tierra de la tierra del generador / transformador es de 2 ohmios y la resistencia de tierra del polo es de 35 ohmios. Suponga una falla de fase a neutro al final de la línea de distribución monofásica. Para esta condición, calcule (1) la corriente de falla, (2) la corriente en la tierra del generador / transformador y (3) el aumento del potencial de tierra en el transformador y (4) el aumento del potencial de tierra en el lugar de la falla. Repita los cálculos anteriores asumiendo que todas las tierras son ideales, es decir, su impedancia es cero.



**Figura E4.13: Un sistema de energía monofásico simple**

**Solución:** El circuito equivalente de este sistema se muestra en la Figura E4.13a.

a completar



**Figura E4.13a: Circuito equivalente**

#### 4.8.4 Discusión del análisis de fase directa

En esta sección hemos presentado procedimientos para el análisis de fallas en sistemas eléctricos basados en una representación de matriz de admitancia generalizada de elementos del sistema eléctrico (forma equivalente de Norton generalizada). Esta representación de los elementos del sistema de energía es una generalización de los equivalentes de Norton. El único supuesto involucrado en esta representación es que los elementos del sistema de energía son dispositivos lineales (es decir, se ignoran las no linealidades o se utiliza un modelo linealizado de los elementos del sistema de energía). El método de solución es una aplicación sencilla del análisis nodal. El procedimiento es computacionalmente intensivo y adecuado para la implementación informática. La ventaja del método proviene de las capacidades de la representación de la matriz de admitancia. Específicamente, la matriz de admitancia puede modelar (a) asimetrías de línea de transmisión, (b) sistemas de puesta a tierra, etc.

#### 4.9 Sobretensiones temporales de frecuencia de potencia

Una falla eléctrica inicia transitorios y condiciones anormales. Los transitorios típicos son: inmediatamente después de que se inicia la falla eléctrica, ocurren transitorios eléctricos que normalmente decaen rápidamente. Estos transitorios pueden causar altas sobretensiones temporales. Las duraciones típicas de estos voltajes anormales son fracciones de un ciclo o varios ciclos, es decir, típicamente menores que la duración de la falla eléctrica.

Otro fenómeno que dura mientras la falla está encendida, es la ocurrencia de voltajes anormales en las fases con falla y sin falla. Por ejemplo, las fases con falla típicamente experimentarán caídas de voltaje, mientras que las fases sin falla experimentarán sobretensión. Otro fenómeno es que la presencia de una falla eléctrica en un sistema de energía perturba el equilibrio entre la entrada de energía mecánica de un generador y la capacidad del generador para entregar energía eléctrica a la red. Como resultado, los generadores pueden acelerar o desacelerar durante una falla dependiendo de la relación entre la potencia de entrada mecánica y la salida de potencia eléctrica del generador.

En esta sección, examinamos las sobretensiones temporales durante las condiciones de falla. Las oscilaciones electromecánicas provocadas por una falla se examinan en el Capítulo x. Para conocer los transitorios eléctricos provocados por una falla, consulte la referencia [???].

**Coefficiente de puesta a tierra:** Las sobretensiones de frecuencia de potencia experimentadas por las fases sin falla durante una falla dependen en gran medida de la forma en que el sistema está conectado a tierra. Considere, por ejemplo, un sistema que prácticamente no está conectado a tierra, es decir, las impedancias de tierra son muy altas. Cuando ocurre una falla monofásica a tierra en este sistema, el punto de la falla se convierte en la tierra del sistema y el voltaje de la fase fallada en este punto será cercano a cero. El neutro del sistema flotará y se elevará a un voltaje aproximadamente igual al voltaje de fase nominal. El voltaje de las fases sin falla será aproximadamente igual al voltaje nominal línea a línea del sistema, es decir, una sobretensión de alrededor del 73%. Por otro lado, considere un sistema que está perfectamente conectado a tierra, es decir, las impedancias de tierra son muy pequeñas. Una falla monofásica a tierra en este sistema no afectará los voltajes del neutro ya que el neutro está casi perfectamente conectado a tierra. El voltaje del neutro permanecerá cerca de cero y, por lo tanto, los voltajes de las fases sin falla permanecerán cerca de la fase nominal a los voltajes neutros. En otras palabras, la sobretensión de las fases sin falla será cero para este sistema. Los sistemas prácticos no están perfectamente conectados a tierra ni sin conexión a tierra. Para sistemas prácticos y en caso de falla a tierra, las fases sin falla experimentarán una sobretensión que se encuentra entre 0 y 73%, el valor exacto depende de los parámetros del sistema de conexión a tierra. Para cuantificar esta sobretensión se ha introducido el coeficiente de puesta a tierra.

El coeficiente de conexión a tierra depende de la impedancia de tierra y las otras impedancias del sistema. Para un sistema específico, el coeficiente de conexión a tierra se puede calcular simplemente analizando la condición de falla, calculando los voltajes de las fases sin falla y tomando la relación de la sobretensión sobre la tensión nominal. Consideraremos estos cálculos primero usando componentes simétricos y luego usando análisis de fase directo.

**Cálculo del coeficiente de puesta a tierra por componentes simétricos:** considere un tres sistema de fase. En una determinada ubicación, los parámetros de secuencia del sistema son  $Z_0, Z_1, Z_2$ .

Tenga en cuenta que el valor de la impedancia de secuencia cero depende de las impedancias de puesta a tierra del sistema, mientras que las impedancias de secuencia positiva y negativa son casi independientes de las impedancias de puesta a tierra. Considere una falla monofásica a tierra en este sistema de energía. La culpa las corrientes serán:

$$\tilde{I}_1 \tilde{I}_2 \tilde{I}_0 \sim \frac{1}{z_1 z_2 z_0} pu$$

Los voltajes de secuencia serán:

$$\tilde{V}_1 = 1.0 - z_1 \tilde{I}_0 = 1.0 - \frac{z_1}{z_1 z_2 z_0}$$

$$\tilde{V}_2 = z_2 \tilde{I}_2 = \frac{z_2}{z_1 z_2 z_0}$$

$$\tilde{V}_0 = z_0 \tilde{I}_0 = \frac{z_0}{z_1 z_2 z_0}$$

Los voltajes reales en las tres fases son:

$$\tilde{V}_a = \tilde{V}_1 \tilde{V}_2 \tilde{V}_0 = 0$$

$$\tilde{V}_B = a^2 \tilde{V}_1 + A \tilde{V}_2 + \tilde{V}_0 = a^2 \frac{z_1 z_2 - z_0}{z_1 z_2 z_0}$$

$$\tilde{V}_C = A \tilde{V}_1 + a \tilde{V}_2 + \tilde{V}_0 = a \frac{z_1 z_2 - z_0}{z_1 z_2 z_0}$$

Se debe observar que para muchos sistemas las impedancias de secuencia positiva y negativa son prácticamente las mismas. Para estos sistemas, las expresiones anteriores se simplifican aún más en:

$$\tilde{V}_B = a^2 \tilde{V}_1 + A \tilde{V}_2 + \tilde{V}_0 = a^2 \frac{z_0 z_1}{2z_1 z_0}$$

$$\tilde{V}_C = A \tilde{V}_1 + a \tilde{V}_2 + \tilde{V}_0 = a \frac{z_0 z_1}{2z_1 z_0}$$

Observe que cuando tenemos un sistema sin conexión a tierra, la impedancia de secuencia cero será extremadamente alta. En el límite cuando la impedancia de secuencia cero se vuelve infinita:

$$\tilde{V}_B \lim_{z_0 \rightarrow \infty} a^2 \frac{z_0 z_1}{2z_1 z_0} = \sqrt{3} \tilde{V}_{150}$$

$$\tilde{V}_C \lim_{z_0 \rightarrow \infty} a \frac{z_0 z_1}{2z_1 z_0} = \frac{1}{\sqrt{3}} \tilde{V}_{150}$$

Tenga en cuenta que en este caso ambas fases sin fallas experimentarán un voltaje de 1,73 (raíz cuadrada de 3) pu, o una sobretensión del 73%.

Otro caso extremo será un sistema con impedancias de secuencia iguales (la secuencia positiva, negativa y cero son todas iguales). Este caso corresponde a un sistema perfectamente conectado a tierra y con un acoplamiento mutuo entre fases insignificante. En este caso:

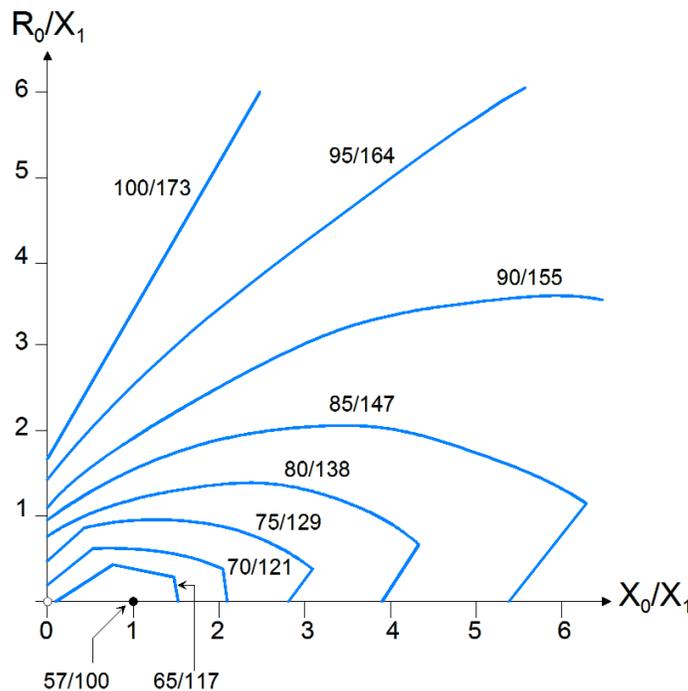
$$\tilde{V}_B \lim_{z_0, z_1} a \approx \frac{z_0}{2z_1} \frac{z_1}{z_0} m_{i,j240} \approx m_{i,j240}$$

$$\tilde{V}_C \lim_{z_0, z_1} a \approx \frac{z_0}{2z_1} \frac{z_1}{z_0} m_{i,j120} \approx m_{i,j120}$$

Tenga en cuenta que en este caso ambas fases B y C tendrán voltaje nominal, es decir, no experimentarán ninguna sobretensión durante la falla a tierra de la fase A.

Para cualquier otro valor de las impedancias (y por lo tanto la calidad de las tierras), los voltajes de las fases sin fallas se pueden calcular a partir de las ecuaciones anteriores.

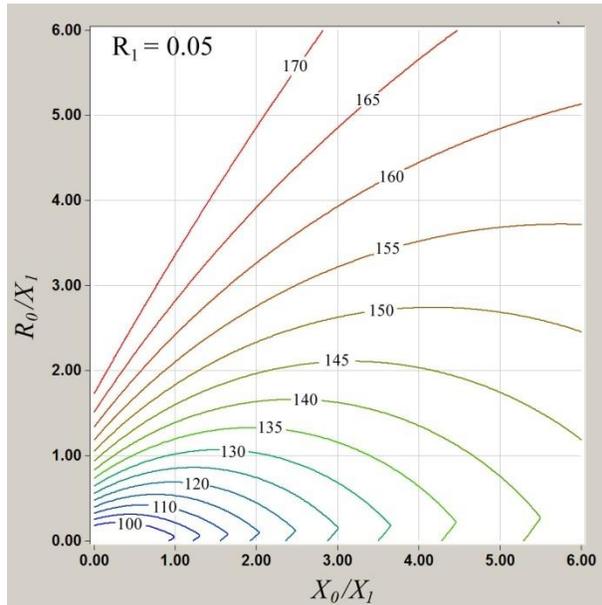
En la Figura 4.x se da una representación gráfica aproximada de estas ecuaciones. Tenga en cuenta que esta figura ha sido desarrollada por un comité de IEEE. Las suposiciones simplificadoras en esta figura son: (a) los dispositivos del sistema están representados con circuitos equivalentes de secuencia (b) las impedancias de secuencia positiva y negativa son iguales en la ubicación de la falla, y (c) la resistencia de secuencia positiva / negativa se ignora .



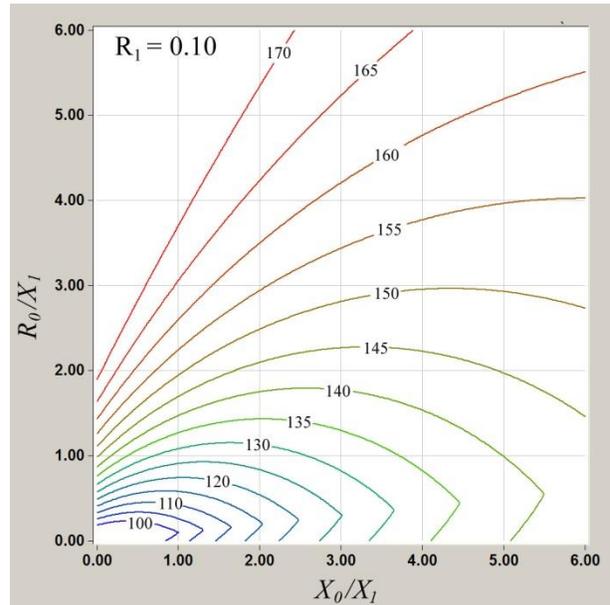
**Figura 4.x. Representación paramétrica de la sobretensión de las fases sin falla durante una falla a tierra - Análisis simplificado (  $Z_2 = Z_1, r_1 = 0$  )**

En la Figura 4.y se proporciona una mejor representación de las sobretensiones de las fases sin falla. Los supuestos utilizados para desarrollar los datos de la Figura 4.y son: (a) los dispositivos del sistema están representados con circuitos equivalentes de secuencia y (b) las impedancias de secuencia positiva y negativa son igual en el lugar de la falla.

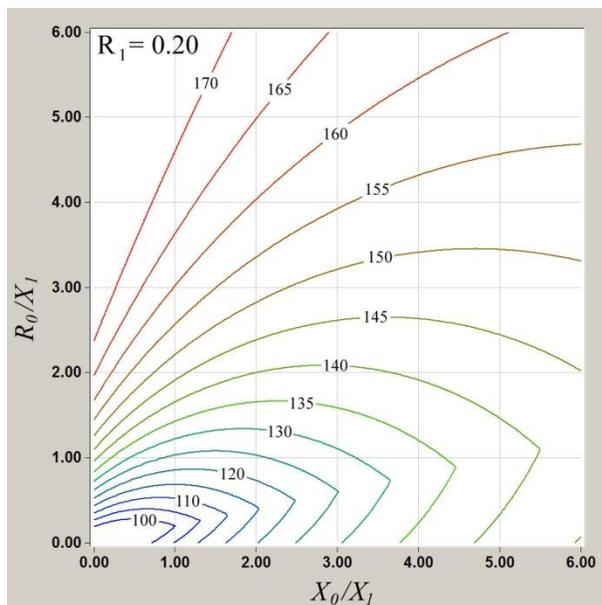
*Caso a:*  $z_2 = z_1$ ,  $r_1 = 0,05X_1$



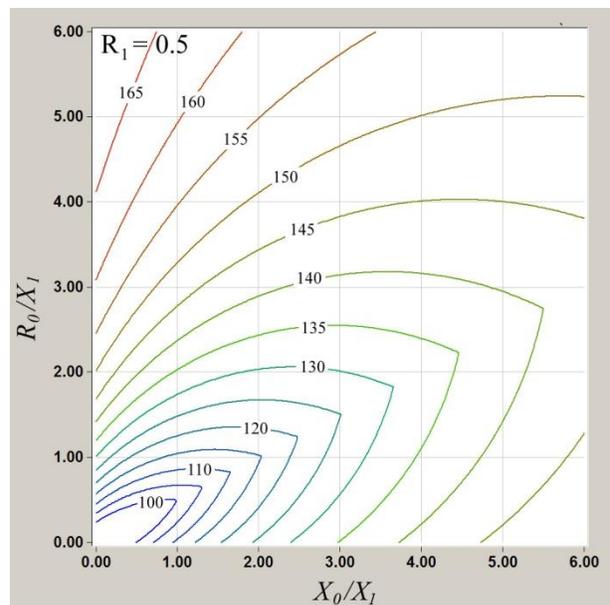
*Caso b:*  $z_2 = z_1$ ,  $r_1 = 0,10X_1$



*Caso c:*  $z_2 = z_1$ ,  $r_1 = 0,20X_1$



*Caso d:*  $z_2 = z_1$ ,  $r_1 = 0,50X_1$



**Figura 4.x. Representación paramétrica de la sobretensión de fases sin fallas durante una Fallo a tierra para varios valores de resistencia de secuencia positiva**

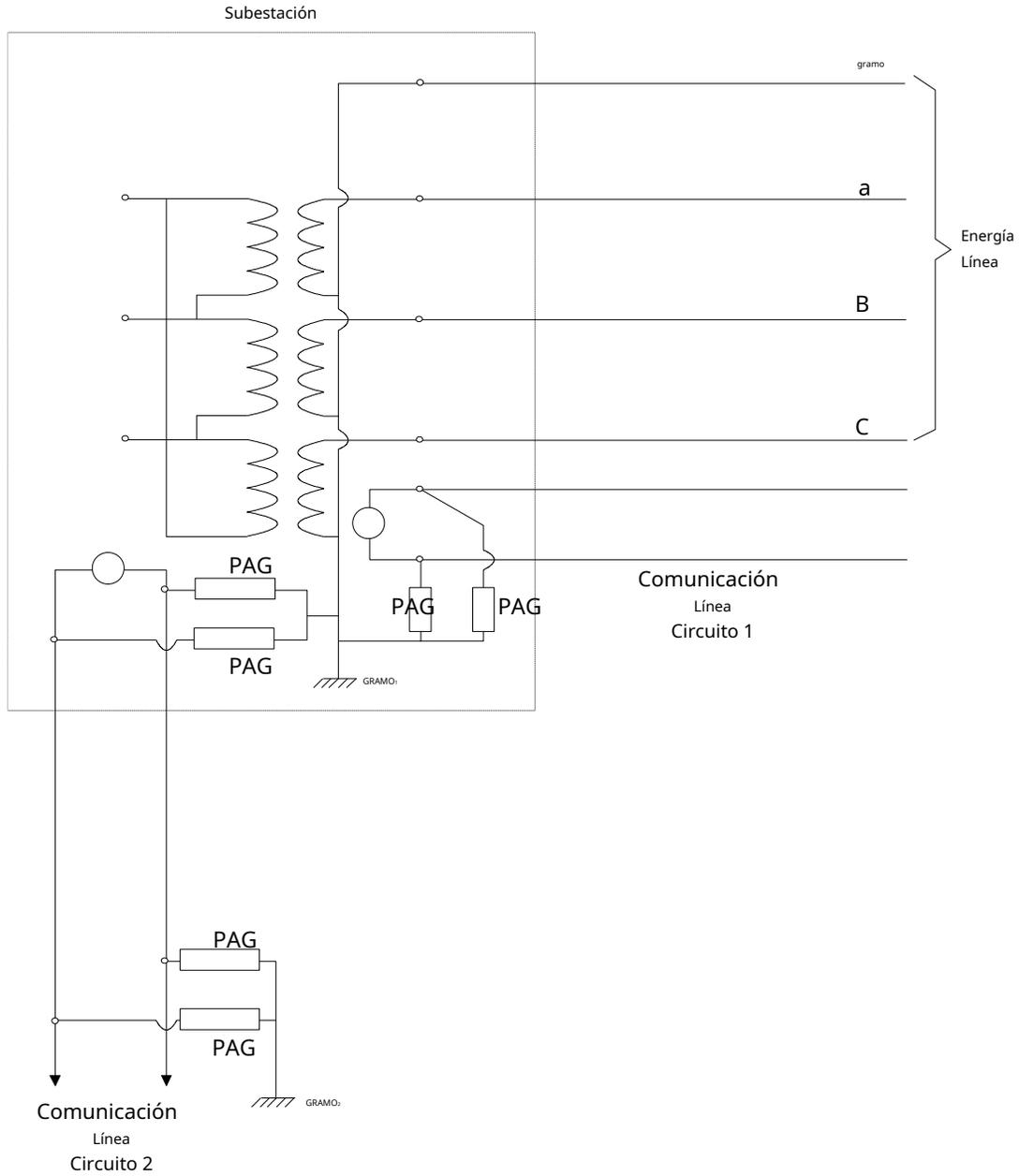
## 4.10 Voltajes transferidos e inducidos durante fallas

Debido a que el suelo no tiene una conducción perfecta, se pueden generar diferencias de potencial entre dos puntos conectados a tierra. De hecho, las corrientes eléctricas circulan por la tierra incluso en condiciones normales de funcionamiento. Durante condiciones de falla (especialmente fallas asimétricas), las corrientes de tierra pueden ser sustanciales, lo que da como resultado una elevación de alto voltaje de los sistemas de conexión a tierra y los voltajes de transferencia a las estructuras metálicas cercanas. Estos voltajes pueden causar;

1. Problemas de seguridad
2. Mal funcionamiento o daño de los circuitos de comunicación

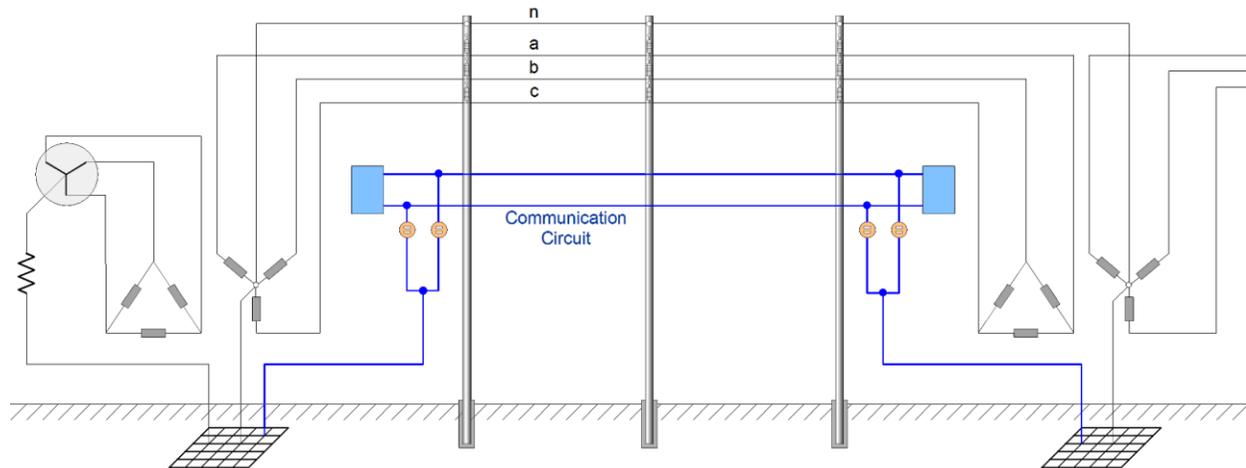
Los problemas de seguridad se generan siempre que los voltajes transferidos a las estructuras puestas a tierra son lo suficientemente altos como para causar descargas eléctricas a seres humanos o animales. Los circuitos de comunicación se ven afectados de dos maneras: (a) los voltajes son inducidos en estos circuitos por las corrientes eléctricas de la línea eléctrica que corrompen las señales útiles con ruido, aumentando la posibilidad de mal funcionamiento, o (b) los voltajes pueden ser transferidos por conducción a circuitos de comunicación, que pueden causar problemas de interferencia o daños en el equipo de comunicación. Los dos mecanismos de interferencia se ilustran en la Figura 4.15. La figura ilustra dos circuitos de comunicación. El circuito 2 puede estar sujeto a un voltaje igual a la diferencia en el aumento del potencial de tierra en las dos tierras G1 y G2. El circuito 1 es paralelo a la línea eléctrica y, por lo tanto, está sujeto a voltaje inducido por las corrientes eléctricas de la línea eléctrica. Los voltajes inducidos se mitigan transponiendo el circuito de comunicación. En general, los circuitos de comunicación deben protegerse contra voltajes inducidos o transferidos. Los esquemas de protección involucran bloques de protección, transformadores de aislamiento, transformadores de neutralización, etc. La aplicación juiciosa de los esquemas de protección requiere que se calcule el voltaje máximo en el circuito de comunicación bajo cualquier condición adversa. neutralización de transformadores, etc. La aplicación juiciosa de los esquemas de protección requiere que se calcule el voltaje máximo en el circuito de comunicación bajo cualquier condición adversa. neutralización de transformadores, etc. La aplicación juiciosa de los esquemas de protección requiere que se calcule el voltaje máximo en el circuito de comunicación bajo cualquier condición adversa.

El problema básico se ilustra con el sistema simplificado de la figura 4.16. Se ilustra una línea de transmisión de energía que termina en dos subestaciones. Cada una de las subestaciones comprende un transformador conectado delta-estrella. A la izquierda de la figura hay una fuente que alimenta la subestación. Otra línea de transmisión de energía comienza desde la subestación a la derecha de la figura. Ambas subestaciones son conectado a tierra con una alfombra de tierra.



Nota para mí: hacer un ejemplo de retransmisión de cable piloto

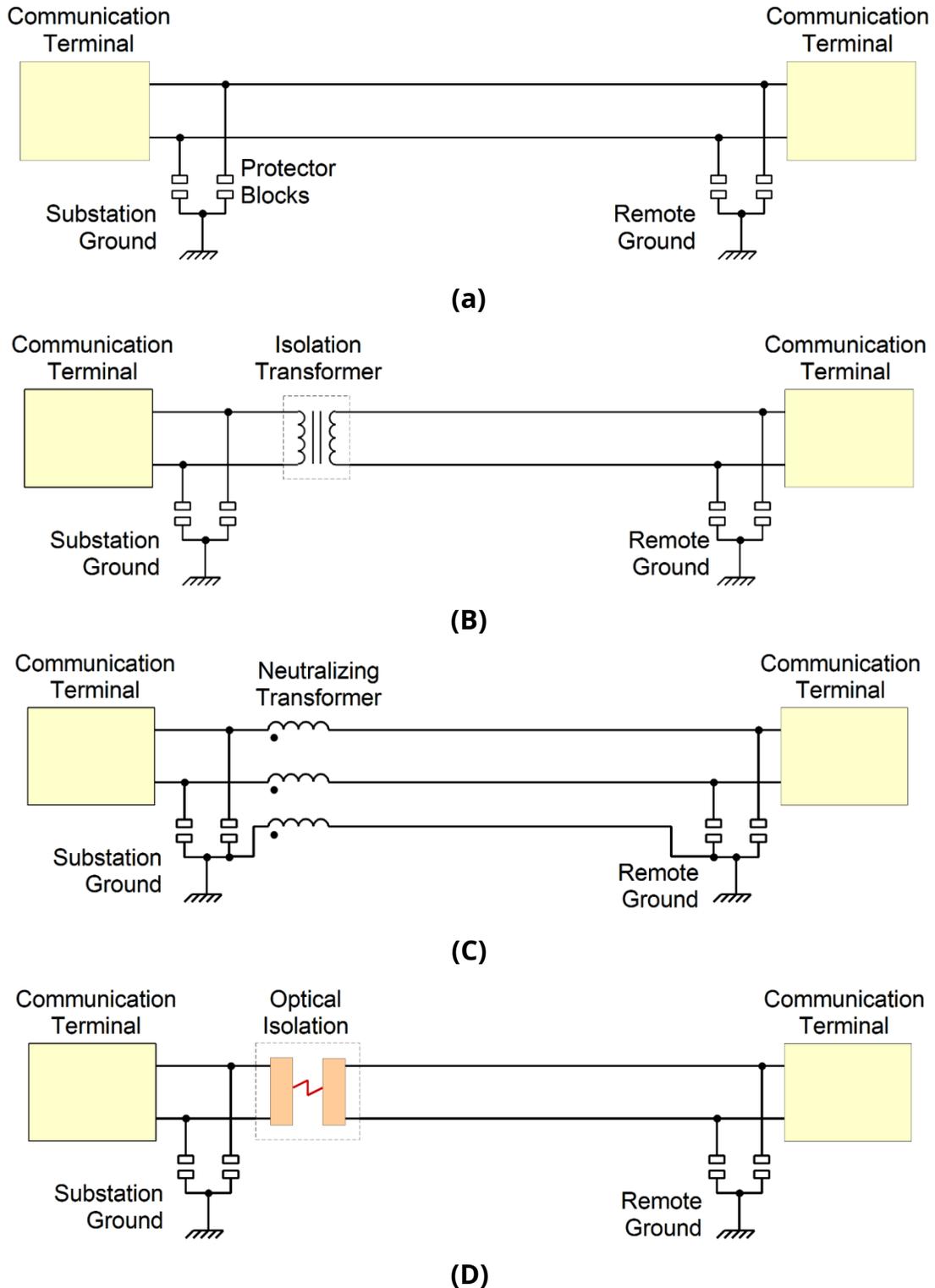
**Figura 4.15: Dos mecanismos por los cuales las líneas eléctricas pueden interferir  
Circuitos de comunicación**  
[(a) La línea 1 está sujeta a interferencia por inducción, (b) la línea 2 está sujeta a interferencia por conducción]



**Figura 4.16 Circuito de comunicación en el entorno del sistema de potencia**

Un circuito de comunicación está suspendido en las mismas torres que la línea eléctrica. Normalmente, el circuito de comunicación está conectado al sistema de puesta a tierra de la subestación a través de bloques protectores. Nuestra discusión se centrará en el voltaje inducido o transferido al circuito de comunicación.

Durante las condiciones de funcionamiento normales, corrientes trifásicas casi equilibradas fluyen a través de la línea eléctrica. Los voltajes inducidos en la línea de comunicación de cada una de las corrientes de fase son aproximadamente igual en magnitud. La diferencia de fase entre dos es 120°. Por tanto, el voltaje inducido total es aproximadamente cero. Por otro lado, el aumento de potencial de tierra en las dos tierras, G1 y G2, es pequeño (menor que el nivel de protección de los bloques protectores) y, por lo tanto, la tensión transferida al circuito de comunicación es prácticamente cero. Sin embargo, durante condiciones de desequilibrio, el voltaje inducido total puede ser sustancial. Al mismo tiempo, el aumento del potencial de tierra de las tierras, G1 y G2, puede ser sustancial. Como resultado, el circuito de comunicación puede estar sujeto a un voltaje sustancial y debe protegerse. La selección de la protección depende del nivel esperado de sobretensiones durante todas las condiciones adversas previsible. Específicamente, el esquema de protección debe poder soportar la tensión máxima que pueda desarrollarse entre los puntos G1 y G2. Los esquemas de protección típicos de los circuitos de comunicación se ilustran en la Figura 4.17. El esquema (a) implica únicamente bloques protectores. Proporciona protección para tensiones de hasta aproximadamente 300 V. El esquema (b) incluye bloques protectores y un transformador de aislamiento. Este esquema es capaz de proporcionar protección contra voltajes mucho más altos, dependiendo del nivel de aislamiento del transformador de aislamiento. El tercer devanado llevará una corriente eléctrica proporcional al voltaje en el circuito de comunicación aproximadamente igual pero de polaridad opuesta (voltaje de neutralización) del voltaje desarrollado a través del circuito de comunicación (ver Figura 4.17c). El esquema de protección (b) es simple, efectivo y relativamente económico. La selección del nivel de aislamiento del transformador de aislamiento se basa en el voltaje máximo que puede desarrollarse a lo largo del circuito de comunicación bajo cualquier condición adversa previsible. Para una condición específica, el voltaje a lo largo del circuito de comunicación se puede calcular utilizando el método de análisis de fase directa. Para ello, los cables del circuito de comunicación se modelan como conductores de la línea eléctrica.



**Figura 4.17: Esquemas de protección de la línea de comunicación**

[(a) Bloques protectores, (b) Bloques protectores y transformador de aislamiento, (c) Bloques protectores y neutralizadores transformador, (d) aislamiento óptico]

### 4.11 Selección de interruptor

El interruptor debe ser capaz de interrumpir la falla cada vez que se dispara. La corriente de falla máxima que un interruptor puede ser llamado a interrumpir depende de la ubicación del interruptor dentro de la red. La clasificación del interruptor debe seleccionarse de manera que sea más alta que la corriente de falla máxima en la ubicación del interruptor durante la vida útil proyectada del interruptor. Dado que los sistemas de energía se están expandiendo continuamente y, por lo tanto, las corrientes de falla aumentan a medida que el sistema se expande, es importante seleccionar la clasificación del interruptor para satisfacer las necesidades del sistema para la larga vida útil esperada de un interruptor.

### 4.12 Dimensionamiento de cables para fallas eléctricas

Un circuito eléctrico puede constar de (a) conductores de fase, (b) conductores neutros (c) alambres blindados y (d) conductores de tierra. Esta clasificación se basa en la función prevista de los conductores. La función prevista de los conductores de fase es proporcionar el camino para el flujo de corriente eléctrica a través del circuito a la tensión de funcionamiento del sistema. La función prevista del conductor neutro es proporcionar la ruta de retorno para el flujo de corriente eléctrica; el neutro está diseñado para funcionar a un voltaje cercano a cero. La función prevista de los cables blindados es proporcionar el punto de terminación del rayo y guiar la corriente del rayo a la tierra de la instalación, minimizando así las sobretensiones o transitorios en otras partes del sistema y especialmente de los conductores de fase. Finalmente,

Este análisis indica que los conductores de fase y los conductores neutros transportan la corriente eléctrica de carga y ocasionalmente (durante fallas) también transportarán la corriente de falla. El tamaño de estos conductores debe seleccionarse de manera que sea adecuado para transportar la corriente de carga normal de forma continua y la corriente de falla durante la corta duración de la falla. En general, el dimensionamiento de los conductores de fase y neutro para transportar la corriente de carga normal será adecuado para asegurar el dimensionamiento adecuado del conductor durante las fallas. Sin embargo, existen excepciones. Por esta razón, es importante determinar el tamaño de estos conductores para el funcionamiento continuo normal, así como el tamaño de los conductores para condiciones de falla y seleccionar el más grande de los dos. Para la primera determinación, existen amplias tablas de ampacidad para todos los conductores de potencia y, por lo tanto, el proceso es tan simple como seleccionar la entrada apropiada de la tabla. La selección del tamaño del conductor para las condiciones de falla es la misma que se analiza a continuación para los conductores de tierra.

El tamaño de los conductores de blindaje se basa en consideraciones de resistencia. Estos conductores normalmente transportarán corrientes de rayo. La cantidad de energía en el flujo de las corrientes del rayo es relativamente baja y un tamaño relativamente pequeño es adecuado. Cuando se selecciona el tamaño de cable adecuado a partir de consideraciones mecánicas, este tamaño suele ser adecuado para las corrientes del rayo.

La selección del tamaño del conductor de tierra se basa en el nivel de corriente de falla. Una falla a tierra siempre da como resultado un flujo de corriente de falla en los conductores de tierra. Para que los conductores de tierra

ser capaz de resistir el flujo de corriente de falla, su tamaño debe seleccionarse apropiadamente. Los criterios para seleccionar conductores de tierra son simples: los conductores de tierra no deben derretirse (o mejor aún, no deben exceder una temperatura permisible que normalmente está por debajo de su punto de fusión) durante la duración del flujo de corriente de falla. Además, el Código Eléctrico Nacional [??] impone un tamaño mínimo requerido de conductores de tierra. El procedimiento de selección debe constar de dos pasos: (a) paso uno: determinar el tamaño mínimo del conductor de tierra requerido por el NEC. (b) paso dos: calcular el tamaño de conductor requerido para que la temperatura del conductor de tierra no exceda la temperatura máxima permitida bajo condiciones adversas, y (c) paso tres: seleccionar el tamaño de conductor de tierra más grande de los pasos uno y dos.

**Selección del tamaño del conductor de tierra:** El NEC establece un requisito de conductor de tierra de tamaño mínimo como se muestra en la Tabla 4.x. La tabla proporciona el conductor de tierra de tamaño mínimo permitido por el NEC.

El cálculo del tamaño requerido del conductor de tierra a partir de consideraciones térmicas se basa en el siguiente procedimiento. Se asume una temperatura permisible para el material específico del conductor. Por ejemplo, para los conductores de cobre, se puede seleccionar una temperatura permitida de 450 grados centígrados. Recuerde que la temperatura de fusión del cobre es de 1.083 grados centígrados. Por tanto, la temperatura permisible es normalmente una temperatura que está por debajo de la temperatura de fusión con un margen de seguridad considerable. Entonces asumimos que durante la falla toda la energía térmica liberada en el conductor permanece en el material conductor y eleva la temperatura del conductor (es decir, dado que la duración de la falla es corta, no hay tiempo suficiente para ninguno de los energía térmica liberada para disiparse en el ambiente). También asumimos que la temperatura inicial del conductor de tierra es de 40 grados centígrados; esto representa las peores condiciones, como las condiciones de verano, cuando las temperaturas pueden ser altas. El análisis de este problema nos proporciona una relación entre el aumento de temperatura, la duración de la falla y la sección transversal del conductor. La solución de esta ecuación para el área de la sección transversal del conductor en función de la corriente de falla y la duración de la falla proporciona el tamaño de conductor de tierra necesario. Este procedimiento ha generado el nomograma de la Figura 4.y que proporciona el tamaño mínimo de conductor requerido en función de duración de la falla y sección transversal del conductor. La solución de esta ecuación para el área de la sección transversal del conductor en función de la corriente de falla y la duración de la falla proporciona el tamaño de conductor de tierra necesario. Este procedimiento ha generado el nomograma de la Figura 4.y que proporciona el tamaño mínimo de conductor requerido en función de duración de la falla y sección transversal del conductor. La solución de esta ecuación para el área de la sección transversal del conductor en función de la corriente de falla y la duración de la falla proporciona el tamaño de conductor de tierra necesario. Este procedimiento ha generado el nomograma de la Figura 4.y que proporciona el tamaño mínimo de conductor requerido en función de corriente de falla y duración.

**Cuadro 4.x. Conductores de puesta a tierra de equipos de tamaño mínimo para puesta a tierra  
Pista de rodadura y equipo, según NEC, Tabla 250.222**

Clasificación o ajuste de sobrecorriente automática Dispositivo en circuito delante del equipo, conducto, etc. Que no exceda (Amperios)	Cobre Alambre No.	Aluminio O revestido de cobre Aluminio Alambre No. *
15	14	12
20	12	10
30	10	8
40	10	8
60	10	8
100	8	6
200	6	4
300	4	2
400	3	1
500	2	1/0
600	1	2/0
800	1/0	3/0
1000	2/0	4/0
1200	3/0	250 kcmil
1600	4/0	350 kcmil
2000	250 kcmil	400 kcmil
2500	350 kcmil	600 kcmil
3000	400 kcmil	600 kcmil
4000	500 kcmil	800 kcmil
5000	700 kcmil	1200 kcmil
6000	800 kcmil	1200 kcmil

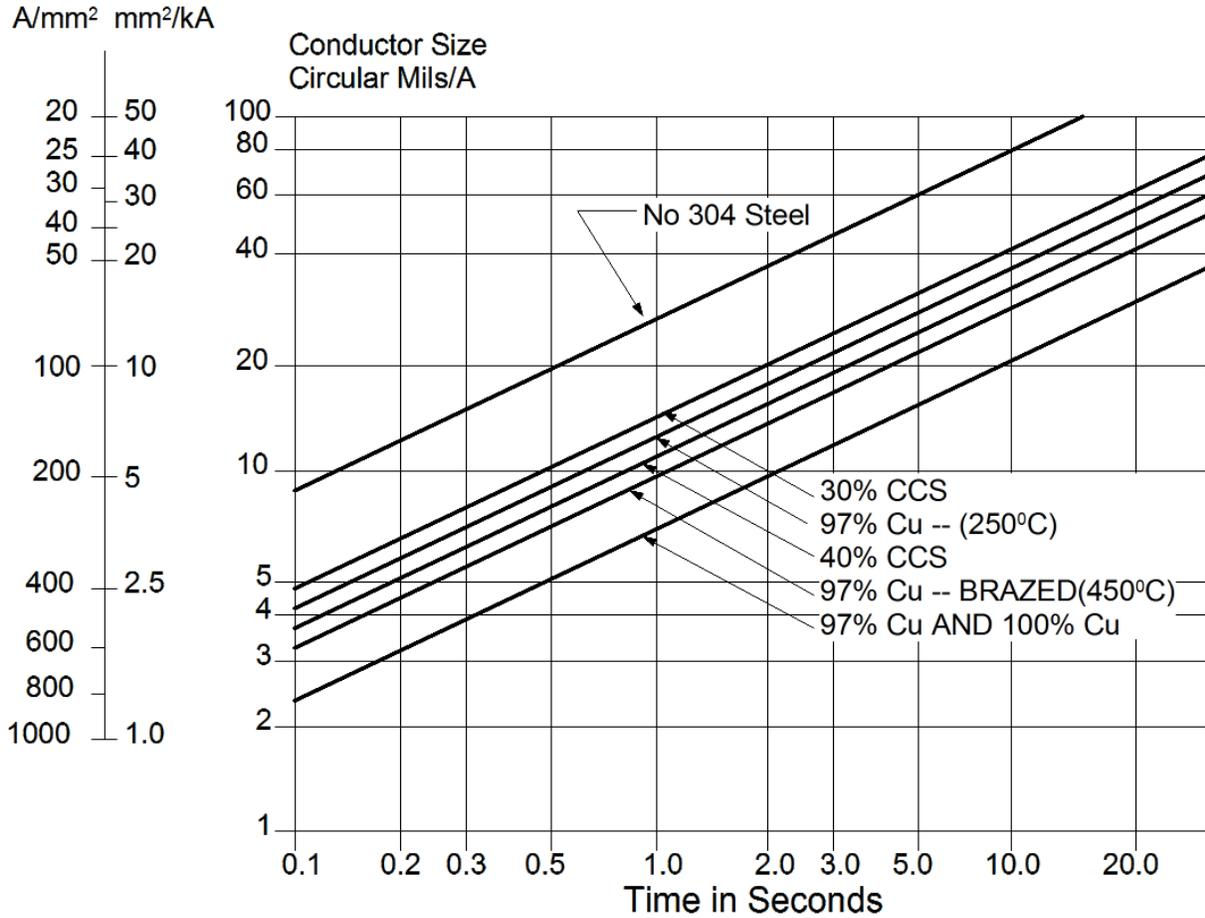


Figura 4.y. Nomograma para dimensionamiento de conductores (IEEE Std 80, edición de 1980)

**Ejemplo E4.14:** Considere el sistema de energía simplificado de la Figura E4.x. Es deseable determinar el tamaño de los conductores de fase y el tamaño de los conductores de tierra. Se da que las fallas se pueden interrumpir en 15 ciclos. Determine el tamaño mínimo de la conexión a tierra conductores.

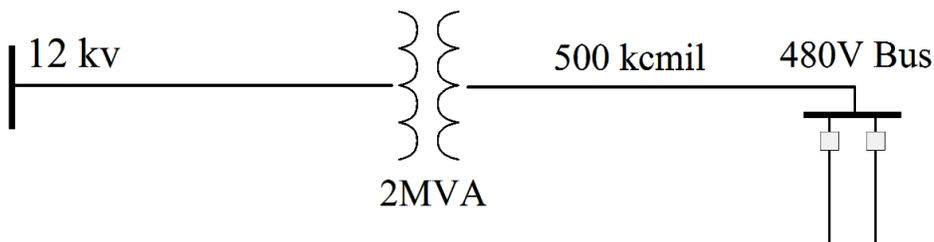


Figura E4.x Ejemplo de sistema de energía simplificado

(La distancia del transformador al bus de 480 V es de 30 pies)

**Solución:** El tamaño del conductor de fase se determina a partir de (a) tablas de ampacidad y (b) temperatura máxima permitida durante fallas.

continuará.

## 4.13 Resumen y discusión

En este capítulo hemos discutido las metodologías de análisis de fallas. Se ha revisado el método de análisis de fallas convencional basado en componentes simétricos. Se ha presentado una extensión del método que permite el cálculo de la distribución de la corriente de falla y el aumento del potencial de tierra de los sistemas de puesta a tierra. El método de componentes simétricos ignora las asimetrías existentes en los elementos del sistema eléctrico, como las líneas de transmisión. Se ha presentado el método de análisis de fase directa, que tiene en cuenta las asimetrías. El análisis de fase directa se basa en la representación de la matriz de admitancia de los elementos del sistema eléctrico (o equivalente de Norton) y el análisis nodal. El método es computacionalmente intensivo y, por tanto, por necesidad, está basado en computadora.

## 4.14 Problemas

**Problema P4.1:** En una determinada ubicación de un sistema trifásico, un ingeniero mide lo siguiente corrientes de fase y tensiones de fase a neutro:

$$\begin{array}{ll} \tilde{I}_a 200Ae^{j10} & \tilde{V}_a 15mi^{j4} \text{ kV} \\ \tilde{I}_B 150Ae^{j110} & \tilde{V}_B 14,5mi^{j120} \text{ kV} \\ \tilde{I}_C 160Ae^{j240} & \tilde{V}_C 14,8mi^{j235} \text{ kV} \end{array}$$

Calcule los componentes simétricos:  $\tilde{I}_1, \tilde{I}_2, \tilde{I}_0$ , y  $\tilde{V}_1, \tilde{V}_2, \tilde{V}_0$ .

**Solución:** Mediante la aplicación de la transformación simétrica inversa:

$$\begin{array}{cccccc} \tilde{I}_1 & 1 & a & a^2 & 200mi^{j10} & \text{XX} \\ \tilde{I}_2 & \frac{1}{3} & 1 & a_2 & a & 150mi^{j110} \text{ XX} \\ \tilde{I}_0 & 1 & 1 & 1 & 160mi^{j240} & \text{XX} \end{array}$$

$$\begin{array}{cccccc} \tilde{V}_1 & 1 & a & a_2 & 15,0mi^{j4} & \text{XX} \\ \tilde{V}_2 & \frac{1}{3} & 1 & a_2 & a & 14,5mi^{j120} \text{ XX} \\ \tilde{V}_0 & 1 & 1 & 1 & 14,8mi^{j235} & \text{XX} \end{array}$$

**Problema P4.2:** Las impedancias equivalentes de Thevenin de secuencia positiva, negativa y cero en el punto de un sistema trifásico de 115 kV son (en una base de 115 kV, 100 MVA):

$$z_1 j0,085 \text{ pu} \quad z_2 j0,089 \text{ pu} \quad y_{z0} j0,12 \text{ pu}$$

Calcule la corriente de falla trifásica en pu y en amperios reales para una falla trifásica en esta ubicación del sistema.

Calcule la corriente de falla de línea a línea en pu y en amperios reales para una falla de línea a línea en esta ubicación del sistema.

Calcule la corriente de falla monofásica del sistema para una falla monofásica a tierra en esta ubicación del sistema.

**Solución:** La corriente de falla para la falla trifásica es:

$$3\phi \text{ Fault} \quad \tilde{I}_1 = \frac{1}{0.085} = 11.7647 \text{ pu} \Rightarrow \tilde{I}_1 = 5.9064 \text{ kA}$$

$$1\phi \text{ Fault} \quad \tilde{I}_1 = \tilde{I}_2 = \tilde{I}_0 = \frac{1}{0.294} = 3.401 \text{ pu} \Rightarrow I_A = 10.204 \text{ pu}$$

$$\Rightarrow I_A = 5.1229 \text{ kA}$$

**Problema P4.3:** Un generador síncrono de 60 Hz, 18 kV, 360 MVA está conectado a un bus infinito (fuente de voltaje ideal - impedancia interna cero) a través de un transformador elevador y una línea de transmisión compensada por capacitores en serie como en la Figura P4.3. El voltaje interno (generado) del generador es 1.0 pu y el voltaje de la fuente infinita es 1.0 pu. La reactancia transitoria del generador (secuencia positiva) es de 0,20 por unidad en las clasificaciones del generador. El transformador es de 360 MVA, 18 kV / 230 kV, conectado en triángulo / estrella (estrella en el lado de 230 kV) con una impedancia de fuga de  $j0.08$  pu en los valores nominales del transformador. La impedancia de secuencia positiva de la línea de transmisión es de  $j0,10$  por unidad sobre una base de 100 MVA (3 fases), 230 kV (línea a línea). El valor absoluto de la impedancia del condensador es el 60% del valor absoluto de la impedancia de la línea de transmisión.

- Calcule la impedancia de la línea de transmisión en por unidad en la misma base que para el lado de 230 kV del transformador.
- Calcule la impedancia del capacitor en serie en por unidad en la misma base que para el lado de 230 kV del transformador.
- Calcule la corriente de falla trifásica para una falla trifásica en el bus del lado alto del transformador en por unidad y en amperios.
- Calcule la corriente de falla trifásica para una falla trifásica en el medio de la línea de transmisión en por unidad y en amperios.

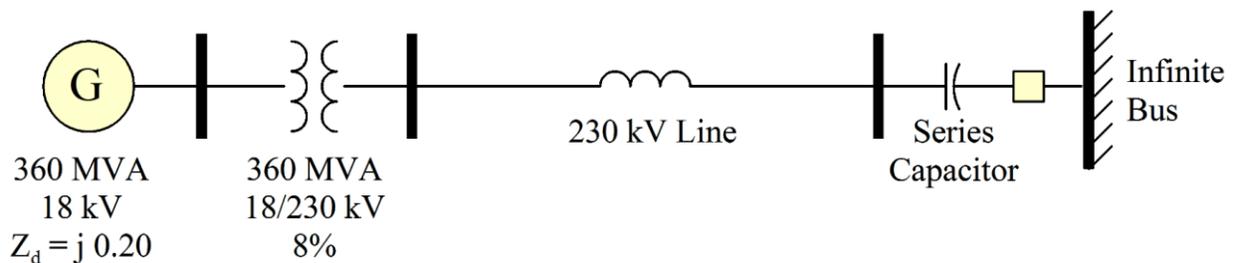
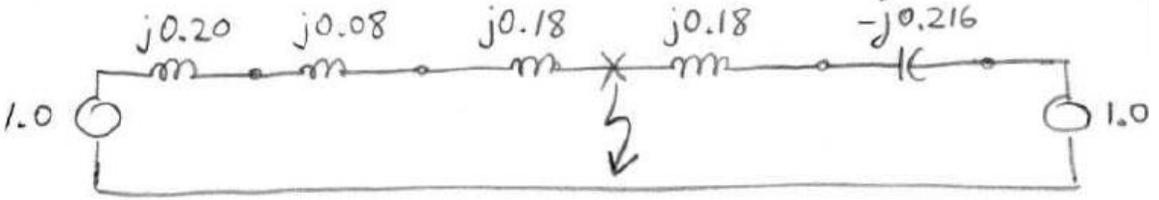


Figura P4.3

**Solución:**

a)  $Z_{\text{line}} = j0.10 \frac{360}{100} = j0.36 \text{ pu}$

b)  $Z_{\text{cap}} = -(0.60) Z_{\text{line}} = -j0.216 \text{ pu}$

c) 

$$I_f = \frac{1.0}{j0.46} + \frac{1.0}{-j0.036} = j25.6038 \text{ pu}$$

$$\Rightarrow I_f = (j25.6038) \left( \frac{360/\sqrt{3}}{230/\sqrt{3}} \right) = 23.137 \text{ kA}$$

**Problema P4.4:** Considere el sistema de energía eléctrica simplificado de la figura P4.4 que consta de un generador balanceado, una línea de transmisión simétrica y una carga eléctrica simétrica. Cada fase de la línea simétrica tiene una impedancia propia de  $9.0 \text{ ohmios}$ . La impedancia mutua entre dos fases es  $j4 \text{ ohmios}$  con la polaridad indicada. Otros parámetros del sistema se indican en la figura. Suponga una falla monofásica a tierra en la fase A de la carga eléctrica. Calcule la corriente de falla en la fase A del generador.

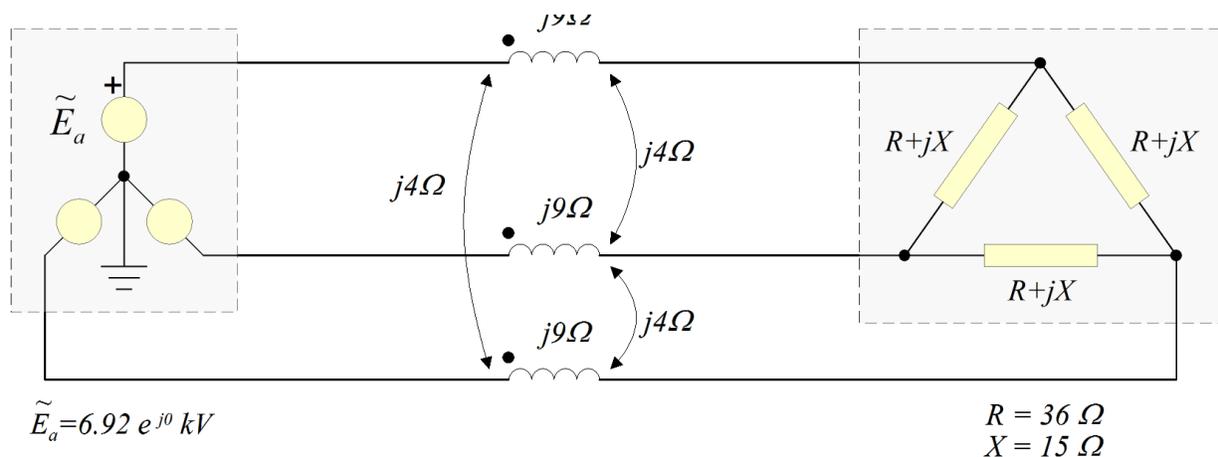
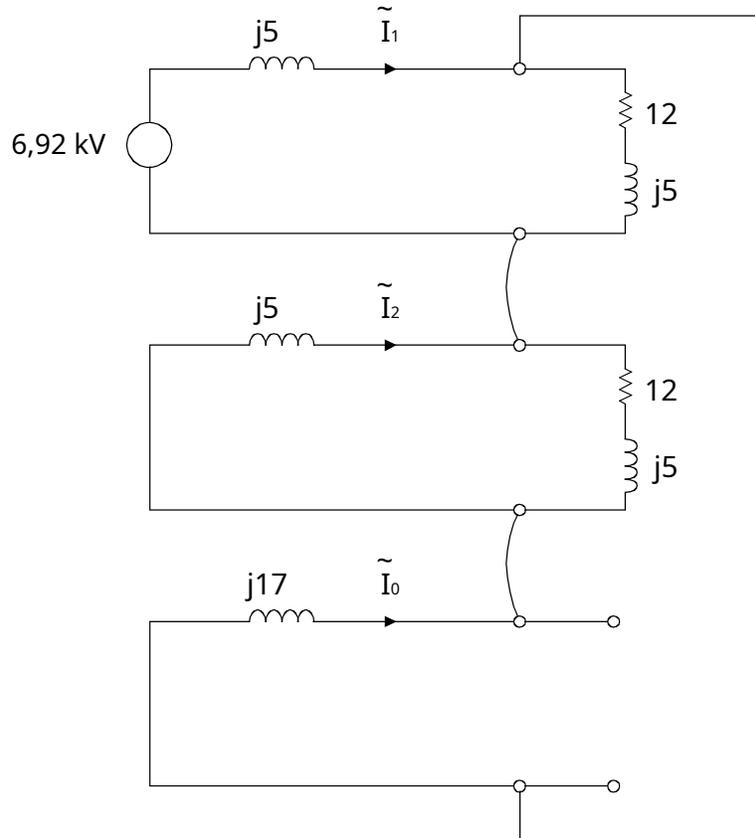


Figura P4.4

**Solución:** Las redes de secuencia y sus conexiones para una sola línea a la falla a tierra son que se muestra en la figura siguiente.



La solución de esta red produce (se omite el análisis del circuito):

$$\tilde{I}_1 = 646,7 \text{ mi}_{\mu 42,480} \text{ A}$$

$$\tilde{I}_2 = 363,6 \text{ mi}_{\mu 83,620} \text{ A}$$

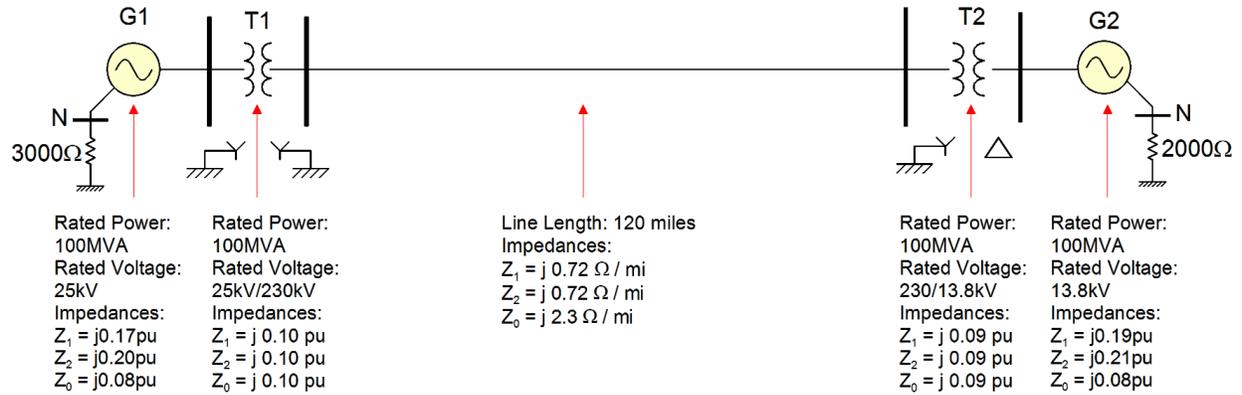
$$\tilde{I}_0 = 436,9 \text{ mi}_{\mu 66,430} \text{ A}$$

Usando la transformación simétrica, es decir  $\tilde{I}_{aBC} = T\tilde{I}_{120}$ , la corriente de fase A del generador es:

$$\tilde{I}_a = I_{\tilde{1}} \tilde{I}_2 \tilde{I}_0 = 1.383,99 \text{ mi}_{\mu 59,990} \text{ A}$$

**Problema P4.5:** Considere el sistema simplificado de la figura P4.5. Los parámetros del sistema se dan en la figura. El sistema funciona descargado. Los voltajes generados de los dos generadores son:

Unidad G1:  $\tilde{m}$

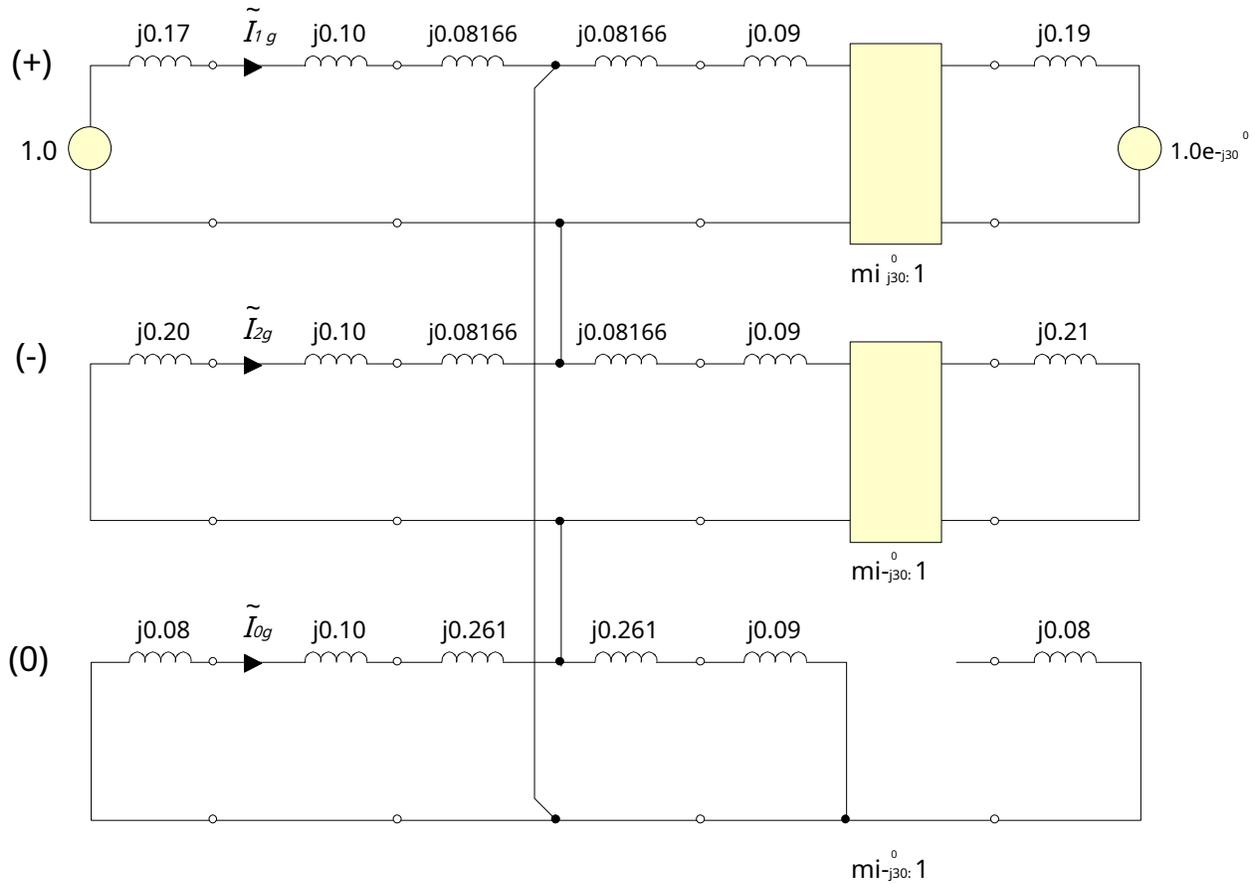

**Figura P4.5**

En estas condiciones, se produce una falla monofásica a tierra en el medio de la línea.

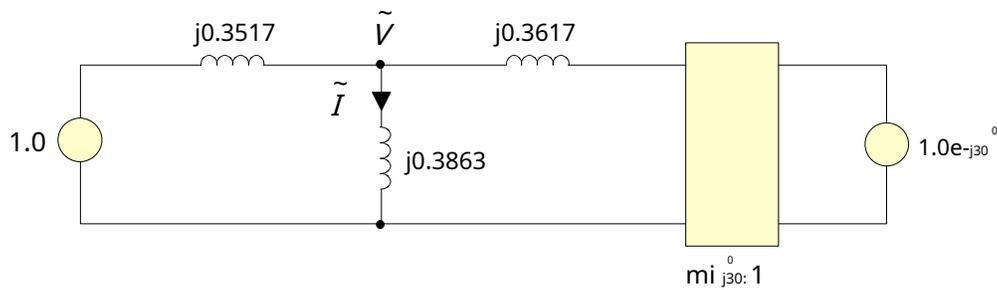
- (a) Calcule la corriente de falla asumiendo una impedancia de falla cero.
- (b) Calcule las corrientes eléctricas en las terminales del generador G1.
- (c) Calcule los voltajes en las terminales del generador G1.
- (d) Calcule las corrientes eléctricas en las terminales del generador G2.
- (e) Calcule los voltajes en las terminales del generador G2.

**Solución:** (a) Las redes de secuencia convertidas en un sistema de pu base común son:

MODIFICAR LA SOLUCIÓN PARA REFLEJAR LAS IMPEDANCIAS DE TIERRA



Rendimientos de reducción de red:



Solución del circuito:

$$\frac{\tilde{V} \cdot 1.0}{j0.3517} - \frac{\tilde{V}}{j0.3863} - \frac{\tilde{V} \cdot 1.0}{j0.3617} = 0 \quad V \quad 0,6842$$

$$\tilde{I}_0 = \frac{\tilde{V}}{j0.3863} = j1,7711$$

Por lo tanto:

$$\tilde{I}_1 \quad \tilde{I}_2 \quad \tilde{I}_0 \quad j1.7711 \text{ pu} \quad I_F \quad j5.3133 \text{ pu} \quad I_F \quad j1.3338 \text{ kA}$$

(b) La unidad G1 ve la siguiente secuencia de corrientes:

$$\text{Secuencia positiva: } \tilde{I}_{1\text{grano}} = \frac{1.0 \tilde{V}}{j0.3517} = j0.8979$$

$$\text{Secuencia negativa: } \tilde{I}_{2\text{grano}} = \frac{1}{2}(j1.7711) = j0.8856$$

$$\text{Secuencia cero: } \tilde{I}_{0\text{grano}} = \frac{j0.351}{j0.351 + j0.441}(j1.7711) = j0.7849$$

Aplicando la transformación simétrica:

$$\tilde{I}_{ag} = j2.5684 \text{ pu} \quad \tilde{I}_{ag} = j5.9315 \text{ kA}$$

$$\tilde{I}_{bg} = 0.10738 \text{ mi}^{95.70} \quad \tilde{I}_{bg} = 0.248 \text{ mi}^{95.70} \text{ kA}$$

$$\tilde{I}_{cg} = 0.10738 \text{ mi}^{84.30} \quad \tilde{I}_{cg} = 0.248 \text{ mi}^{84.30} \text{ kA}$$

El relé verá las corrientes superiores.

**Problema P4.6:** Una línea de transmisión trifásica conecta dos sistemas de energía eléctrica como en la Figura P4.6a. La configuración de la línea se muestra en la Figura P4.6b. Cada conductor de fase tiene los siguientes parámetros:  $r = 0.12$  ohmios / milla y  $\text{GMR} = 0.035$  pies. El voltaje de operación de la línea es de 115 kV línea a línea. La longitud de la línea es de 80 millas y la resistividad del suelo es de 500 ohmios-metros. Cada uno de los sistemas de potencia se representa como una fuente equivalente que está sólidamente conectada a tierra y con las siguientes impedancias de secuencia:

$$Z_1 = Z_2 = j0.1 \text{ pu}, Z_0 = j0.06 \text{ pu}$$

Las fuentes de voltaje detrás de las impedancias equivalentes están en fase.

- Calcule las corrientes de falla para una falla trifásica en el medio de la línea usando componentes simétricos.
- Calcule las corrientes de falla para una falla trifásica en el medio de la línea usando fase directa análisis.
- Compare los resultados de (a) y (b). Exprese sus propias conclusiones.
- Repita (a), (b) y (c) asumiendo una impedancia de falla de 0.5 ohmios (resistiva).

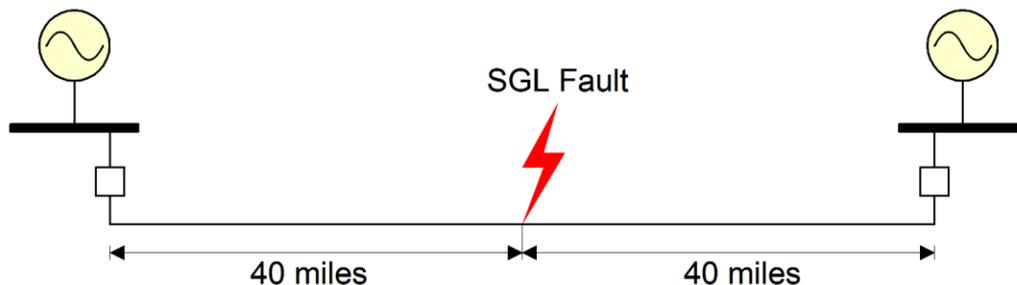


Figura P4.6a

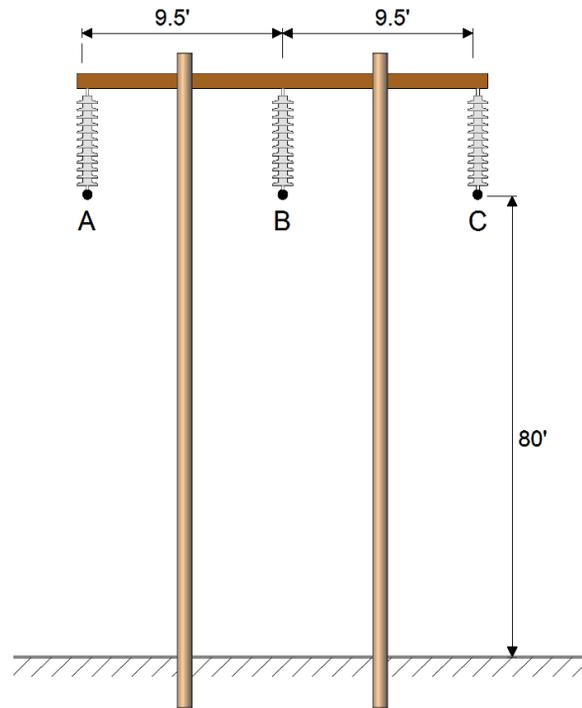


Figura P4.6b

**Solución:** Primero se calculan los parámetros de la línea.

Dar más información para que sea posible utilizar el programa WinIGS.

(a) Line parameters

$$Z_s = r_{a,c} + r_e + j \frac{\omega \mu}{2\pi} \ln \frac{D_e}{d} = 0.0001338 + j 0.000911 \text{ ohms/m}$$

$$Z_{bc} = Z_{ab} = r_e + j \frac{\omega \mu}{2\pi} \ln \frac{D_e}{d_{ab}} = 0.00005929 + j 0.000489 \text{ ohms/m}$$

$$Z_{ac} = r_e + j \frac{\omega \mu}{2\pi} \ln \frac{D_e}{d_{ac}} = 0.00005929 + j 0.000436 \text{ ohms/m}$$

Computing  $TZT^{-1}$ , eliminating off diagonals, yields

$$Z_i = Z_1 = 0.0000745 + j 0.000439 \text{ ohms/m}$$

$$Z_o = 0.000252 + j 0.001853 \text{ ohms/m}$$

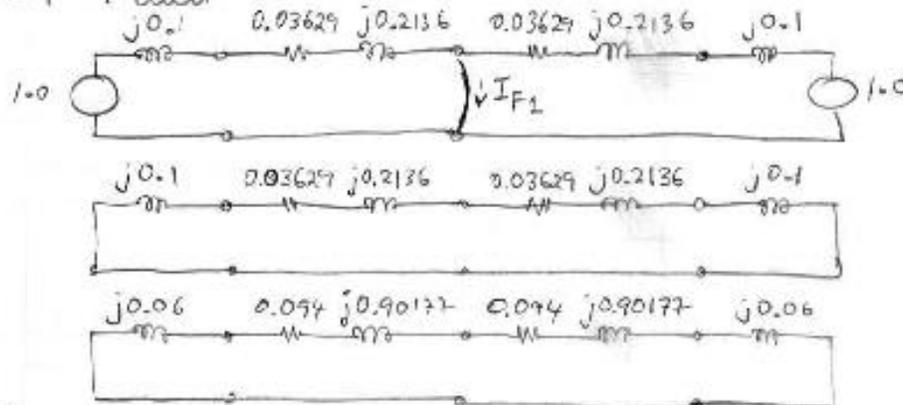
40 mile sector of line  $\Rightarrow Z_1 = Z_2 = 4.8 + j 28.254 \text{ ohms}$   
 $Z_o = 12.432 + j 119.259 \text{ ohms}$ 

Convert to pu

$$\text{Impedance Base} = Z_B = 115^2 / 100 = 132.25 \text{ ohms}$$

$$\Rightarrow Z_{1u} = Z_{2u} = 0.03629 + j 0.2136$$

$$Z_{ou} = 0.094 + j 0.90177$$

3  $\phi$  Fault

$$I_{F1} = 2 \frac{1}{0.03629 + j 0.3136} = 6.3352 e^{-j 83.399^\circ} \quad (\text{Note } I_2 = I_0 = 0)$$

$$I_{\text{Base}} = (100/3) / (115/\sqrt{3}) = 0.502 \text{ kA}$$

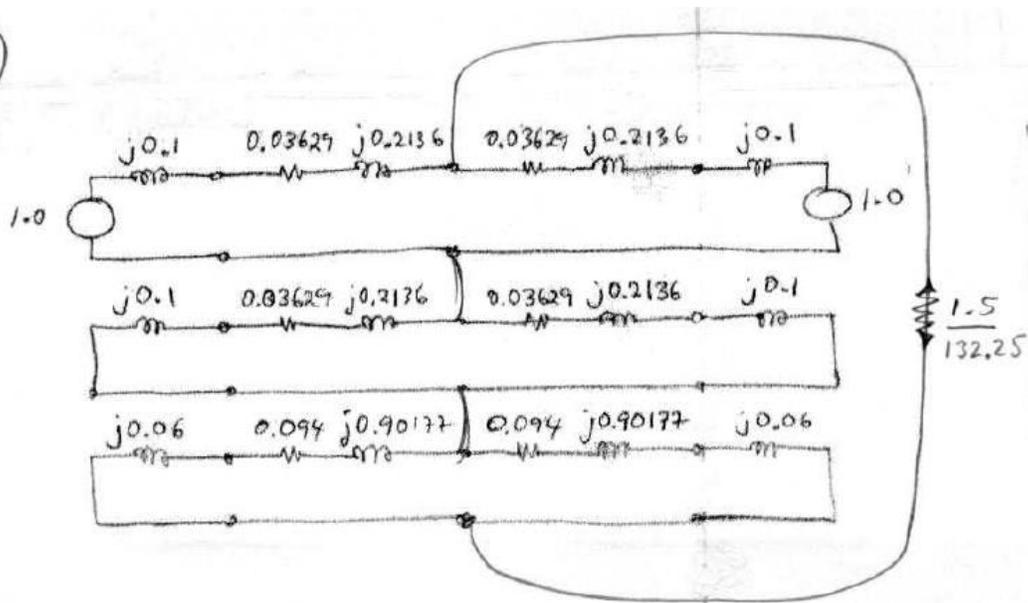
Fault Currents

$$\tilde{I}_{af} = 3.1805 \text{ kV } e^{-j 83.399^\circ}$$

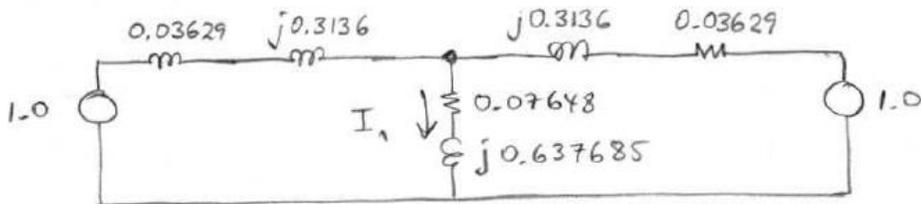
$$\tilde{I}_{bf} = 3.1805 \text{ kV } e^{-j 203.399^\circ}$$

$$\tilde{I}_{cf} = 3.1805 \text{ kV } e^{-j 323.399^\circ}$$

(a)



Reduced to



$$\tilde{I}_1 = \tilde{I}_2 = I_0 = \frac{1.0}{0.094625 + j0.794485} = 1.24984 e^{-j83.208^\circ}$$

$$\tilde{I}_a = 3.74952 e^{-j83.208^\circ} \quad \text{or} \quad 1.8824 e^{-j83.208^\circ} \text{ kA}$$

(b) Computer generated result  
 1.883 kA  $e^{-j82.377^\circ}$

(c) Magnitude Error  
 0.03 %  
 Phase Error  
 0.831°

**Problema P4.7:** Considere el sistema de energía eléctrica de la figura P4.7a. La geometría de los dos  
Las líneas de transmisión mutuamente acopladas se ilustra en la Figura. P4.7b. Los parámetros del

las fuentes equivalentes ES1, ES2, ES3 y ES4 son:

Fuentes ES1 y ES2:

Voltaje nominal: 230 kV,  $Z_1 = Z_2 = j0,1 pu$   $Z_0 = j0,12 pu$

Fuentes ES3 y ES4:

Voltaje nominal: 345 kV,  $Z_1 = Z_2 = j0,1 pu$ ,  $Z_0 = j0,12 pu$

Suponga que los autotransformadores son 200 MVA, 345 kV: 115 kV, 4.5% de impedancia de fuga. Considere una falla de línea a tierra en la ubicación A de la línea de 230 kV. La ubicación A se indica en la Figura. Calcule la corriente de secuencia cero de la línea de 115 kV durante la falla definida anteriormente.

Sugerencia: utilice programWinIGS.

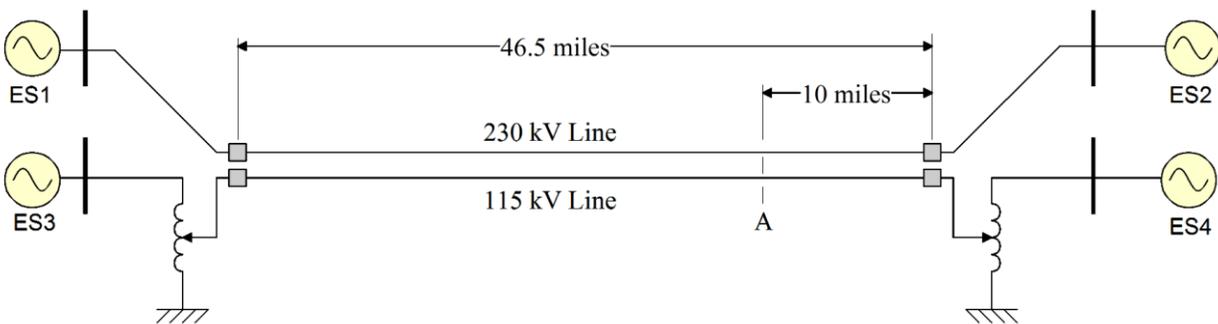


Figura P4.7a

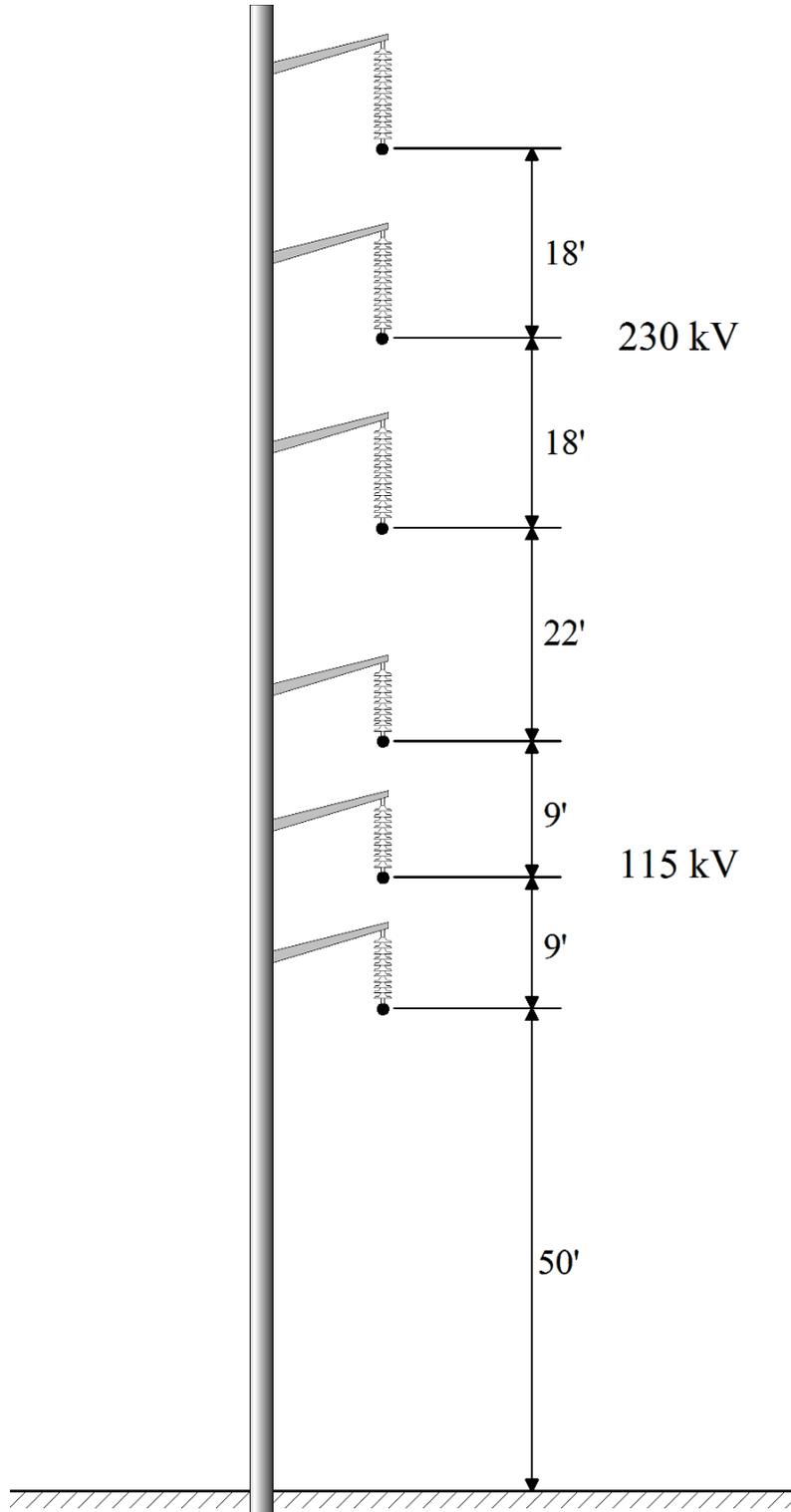
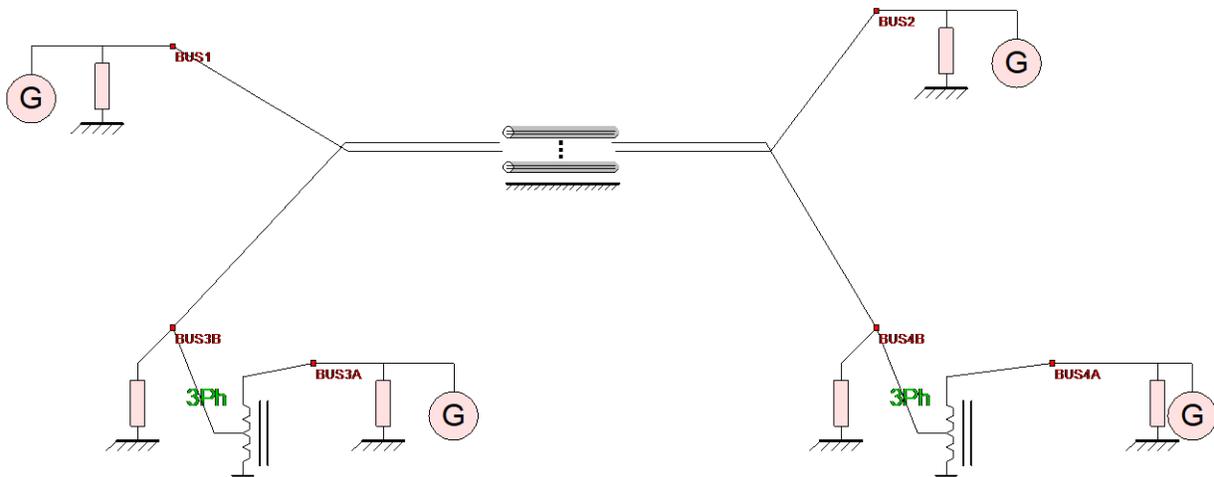
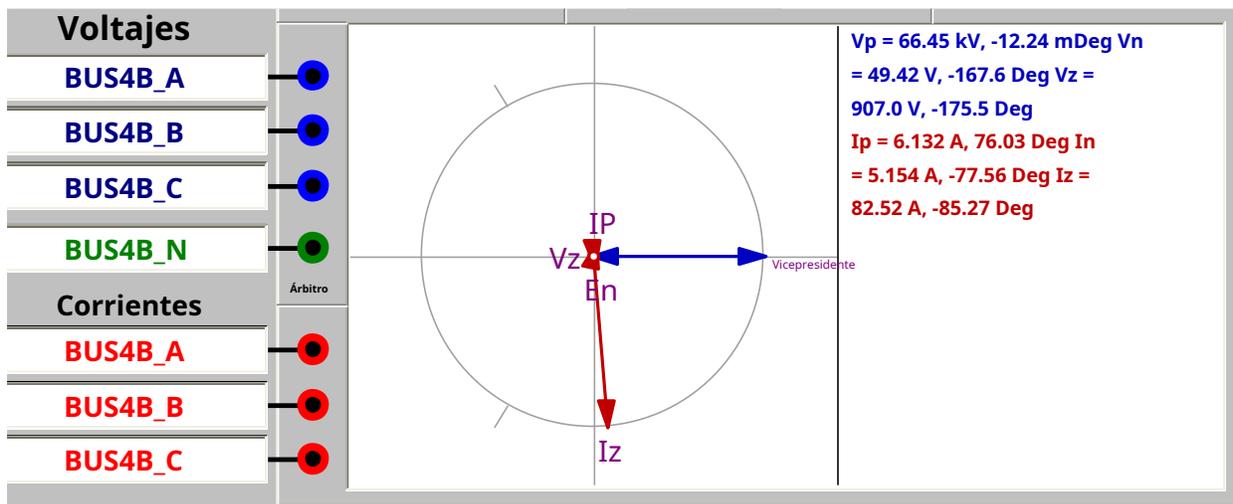


Figura P4.7b

**Solución:** El sistema está modelado en WinIGS. El modelo WinIGS se ilustra en la figura siguiente. **EL MODELO SE DEBE ACTUALIZAR.**



Se ha simulado la falla de línea única a tierra en la línea de 230 kV en las ubicaciones indicadas. Los voltajes y corrientes en la línea de 115 kV durante esta falla se muestran en la siguiente figura. Nota que la corriente de secuencia cero es de 82,52 amperios.



**Problema P4.8:** Considere el sistema de energía eléctrica de la figura P4.8. El sistema consta de un generador, un transformador conectado delta-estrella y una línea trifásica. El punto A de la línea está ubicado a 25.6 millas del transformador.

- Calcule la corriente de falla en el punto A para una falla trifásica,
- Calcule la corriente de falla en el punto A para una falla monofásica,
- Calcule la magnitud del voltaje de las fases B y C en el punto A para la condición de falla en (b) anterior, y
- Para la condición de falla en (b) anterior, calcule las corrientes eléctricas suministradas por el generador y los voltajes en las tres fases del generador.

Utilice la teoría de componentes simétricos en los cálculos. Los datos del sistema son los siguientes:

Generador (350 MVA, 15kV):  $z_1 j0,175 \text{ pu}$      $z_2 j0,21 \text{ pu}$      $z_0 j0,08 \text{ pu}$

Transformador (270 MVA, 15/230 kV):  $z = j0,08 pu$        $z_1 = j0,08 pu$        $z_0 = j0,08 pu, 0$       norte

potencia del transformador)

Línea de transmisión:  $z_1 = z_2 = 0,3 + j0,72 \text{ ohmios} / \text{mi}$ ,       $z_0 = 0,45 + j1,75 \text{ ohmios} / \text{mi}$

Impedancia de derivación del transformador y transmisión

La impedancia de derivación capacitiva de línea debe ser descuidadas.

### AÑADIR INTERRUPTORES A LA FIGURA

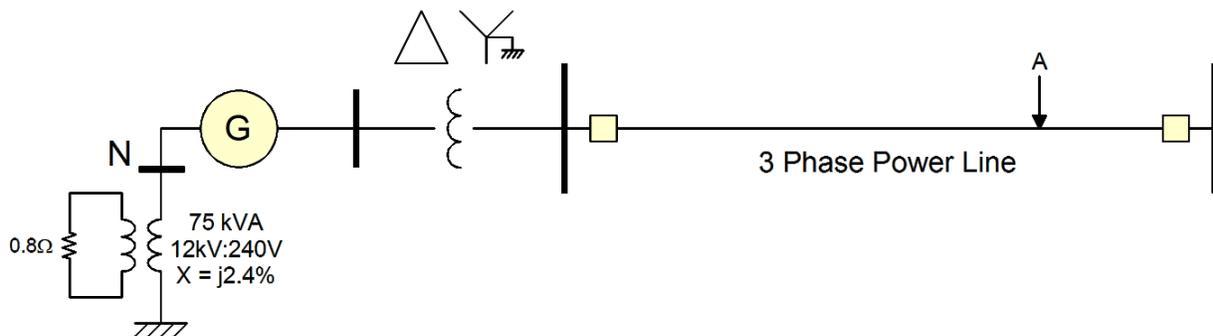


Figura P4.8: Un sistema de energía simplificado

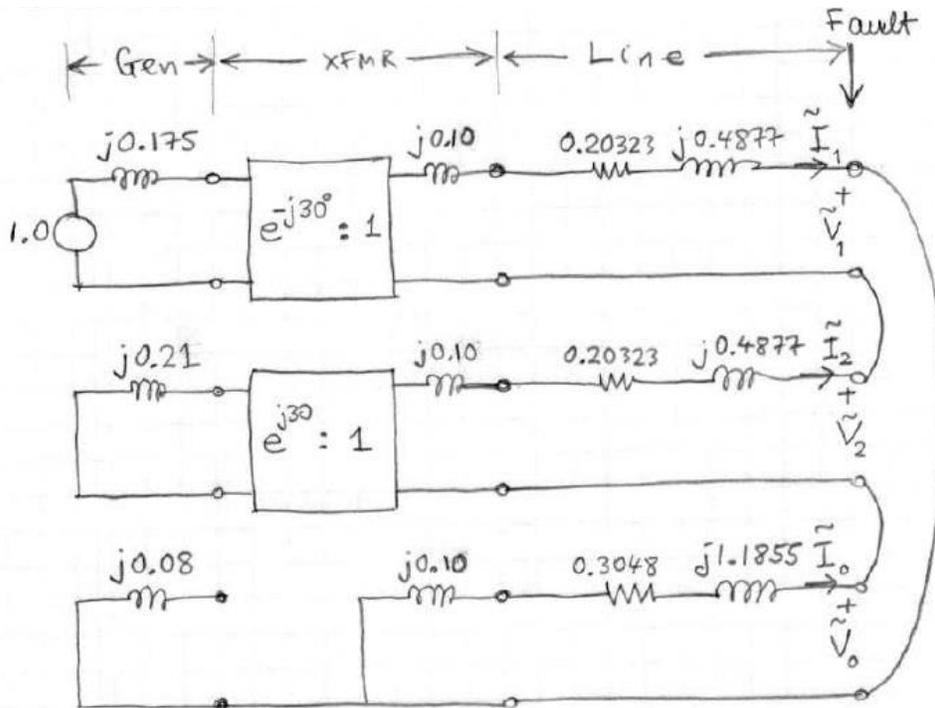
**Solución:** a) Los parámetros de la línea de transmisión en el sistema por unidad son:

$$Z_B = \frac{115^2}{350} = 37,79 \text{ ohmios}$$

$$z_1 = z_2 = (0,3 + j0,72) \frac{1}{37,79} = 0,20323 + j0,4877 pu$$

$$z_0 = (0,45 + j1,75) \frac{1}{37,79} = 0,3048 + j1,1855 pu$$

El modelo es:



$$\tilde{I}_1 \tilde{I}_2 \tilde{I}_0 \frac{m_{j\beta 0}}{0,71126 \quad j2.8459} \quad 0.3409 m_{j45,97} \quad 0.2369 \quad j0.2451$$

$$\begin{array}{l} \tilde{I}_a \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad \tilde{I} \quad 1.0227 m_{j45,97} \\ \tilde{I}_B \quad a_2 \quad a_1 \quad I_2 \quad 0.0 \quad pu \\ \tilde{I}_C \quad a \quad a_2 \quad 1 \quad \sim I_0 \quad 0.0 \\ \tilde{I}_a \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad I_1 \quad \tilde{I} \quad 1.855 m_{j45,97} \\ \tilde{I}_B \quad a_2 \quad a_1 \quad I_2 \quad 0.0 \quad \text{kAmperes} \\ \tilde{I}_C \quad a \quad a^2 \quad 1 \quad \sim I_0 \quad 0.0 \end{array}$$

b) Los voltajes de las fases B y C en el lugar de la falla son:

**a completar**

c) Las corrientes eléctricas de las fases A, B y C del generador son:

**a completar**

d) Los voltajes de las fases A, B y C en el generador son:

**a completar**

Problem 1

Transmission line  $L_s = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{D_e}{d}$   $L_m = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{D_e}{D}$

$$D_e = 2160 \sqrt{\frac{f}{f}} = 6235.4 \text{ feet}$$

$$D = \sqrt[3]{(9.5)(9.5)(19)} = 11.969 \text{ feet}$$

$$L_s = 2.418 \times 10^6 \text{ H/m}$$

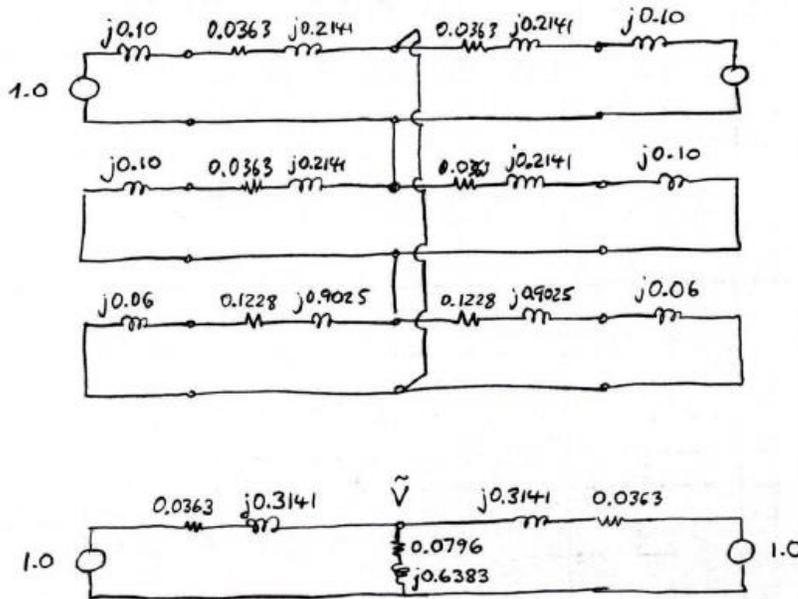
$$L_m = 1.251 \times 10^6 \text{ H/m}$$

$$r_e = 0.00159 \text{ f } \Omega/\text{mile} = 0.0954 \text{ } \Omega/\text{mile}$$

$$r = 0.12 \text{ } \Omega/\text{mile}$$

$$Z_1 = 0.12 + j\omega(L_s - L_m)(1609) \text{ } \Omega/\text{mile} = 0.12 + j0.708 \text{ } \Omega/\text{mile}$$

$$Z_0 = r + 3r_e + j\omega(L_s + 2L_m)(1609) = 0.406 + j2.984 \text{ } \Omega/\text{mile}$$



$$\left( \frac{2}{0.0363 + j0.3141} + \frac{2}{0.0796 + j0.6383} \right) \tilde{V} = \frac{2}{0.0363 + j0.3141}$$

$$\Rightarrow \tilde{V} = 0.8027 e^{-j2.5^\circ}$$

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{\tilde{V}}{0.0796 + j0.6383} = 1.248 e^{-j83.3^\circ}$$

$$I_a = 3.7439 \text{ pu}$$

**Problema P4.9:** Considere el sistema de energía eléctrica de la figura P4.9. Los parámetros de los distintos componentes del sistema se muestran en la figura. Considere una falla de línea a tierra en la ubicación A. La ubicación A se indica en la Figura. La ubicación A está muy cerca del bus de 230 kV del transformador y prácticamente la impedancia entre el bus y la ubicación A es cero. Se da que antes de la falla la unidad opera bajo voltaje nominal en sus terminales y potencia cero.

- Construya las redes de secuencia positiva, negativa y cero de este sistema en por unidad - use como base de potencia 800 MVA (trifásico total) y base de voltaje los voltajes nominales correspondientes.
- Calcule la corriente de secuencia negativa en el generador durante la falla (línea única a tierra en la ubicación A).
- Calcule la corriente de secuencia cero en la línea de transmisión sin falla.

Las impedancias de secuencia positiva, negativa y cero de cada línea son:  $Z_1 = Z_2 = j37,5 \text{ ohmios}$  y  $Z_0 = j3,7 \text{ ohmios}$ . Las líneas de transmisión no están acopladas entre sí. El "bus infinito" es una fuente de tensión trifásica equilibrada ideal. Suponga que el flujo de energía es cero antes de la falla.

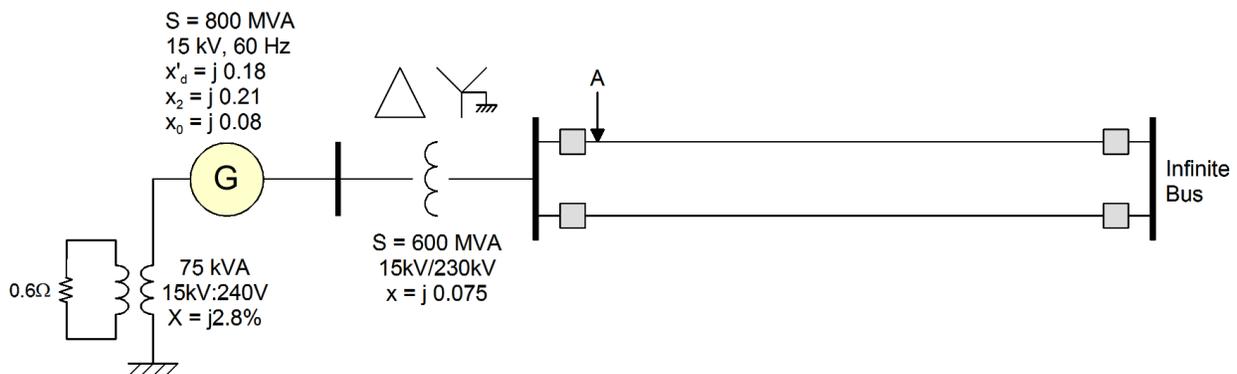


Figura P4.9

**Problema P4.10:** Considere el sistema de energía de dos unidades, dos transformadores y una línea de la figura P4.10. Todos los parámetros pertinentes se dan en la Figura.

- Calcule la corriente de falla para una falla monofásica a tierra en la Fase A del lado de alto voltaje del transformador conectado estrella-estrella. Antes de la falla, los generadores operan a voltaje nominal y la corriente eléctrica en cualquier parte del sistema es cero. Calcule el voltaje en las tres fases del generador G1 para la condición definida anteriormente. Calcule los voltajes en las tres fases del generador G2 para la condición definida anteriormente.
- Calcule la corriente de falla para una falla monofásica a tierra en los terminales del generador G1. Antes de la falla, los generadores operan a voltaje nominal y la corriente eléctrica en cualquier parte del sistema es cero. Calcule el voltaje en las tres fases del generador G1 para la condición definida anteriormente. Calcule los voltajes en las tres fases del generador G2 para lo anterior.

**Insinuación:** Convierta todos los parámetros en una base común de 100 MVA.

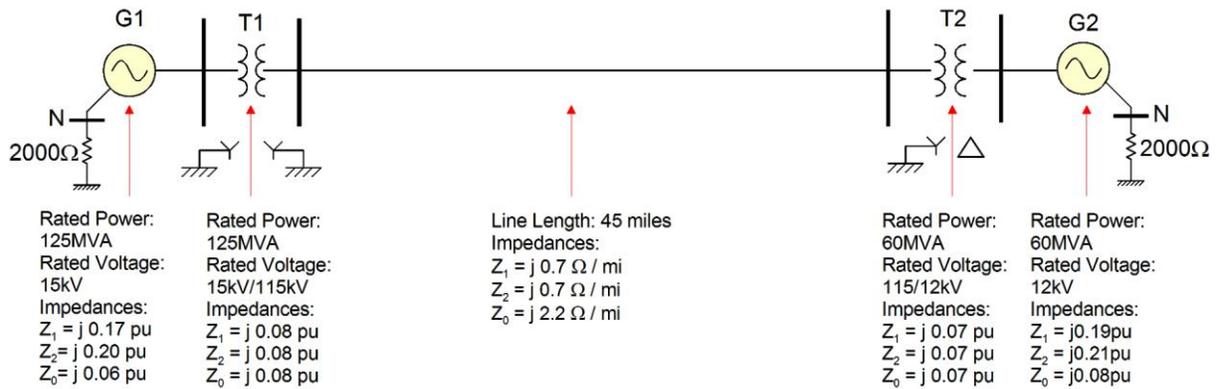


Figura P4.10

**Solución:** Convierta todos los parámetros en una base de 100 MVA:

$$S_B = 100 \text{ MVA}$$

**G1:**

$$z_1 = j0.17 \frac{100}{125} = j0.136 \text{ (pu)}$$

$$z_2 = j0.20 \frac{100}{125} = j0.16 \text{ (pu)}$$

$$z_0 = j0.06 \frac{100}{125} = j0.048 \text{ (pu)}$$

**T1:**

$$z_1 \quad z_2 \quad z_0 = j0.08 \frac{100}{125} = j0.064 \text{ (pu)}$$

**TL:**

$$z_B = \frac{115^2}{100} = 132.25 \text{ ()}$$

$$z_1 \quad z_2 = \frac{(j0.7)(45)}{132.25} = j0.2382 \text{ ( pu)}$$

$$z_0 = \frac{(j2.2)(45)}{132.25} = j0.7486 \text{ ( pu)}$$

**T2:**

$$z_1 \quad z_2 \quad z_0 = j0.07 \frac{100}{60} = j0.1167 \text{ (pu)}$$

**G2:**

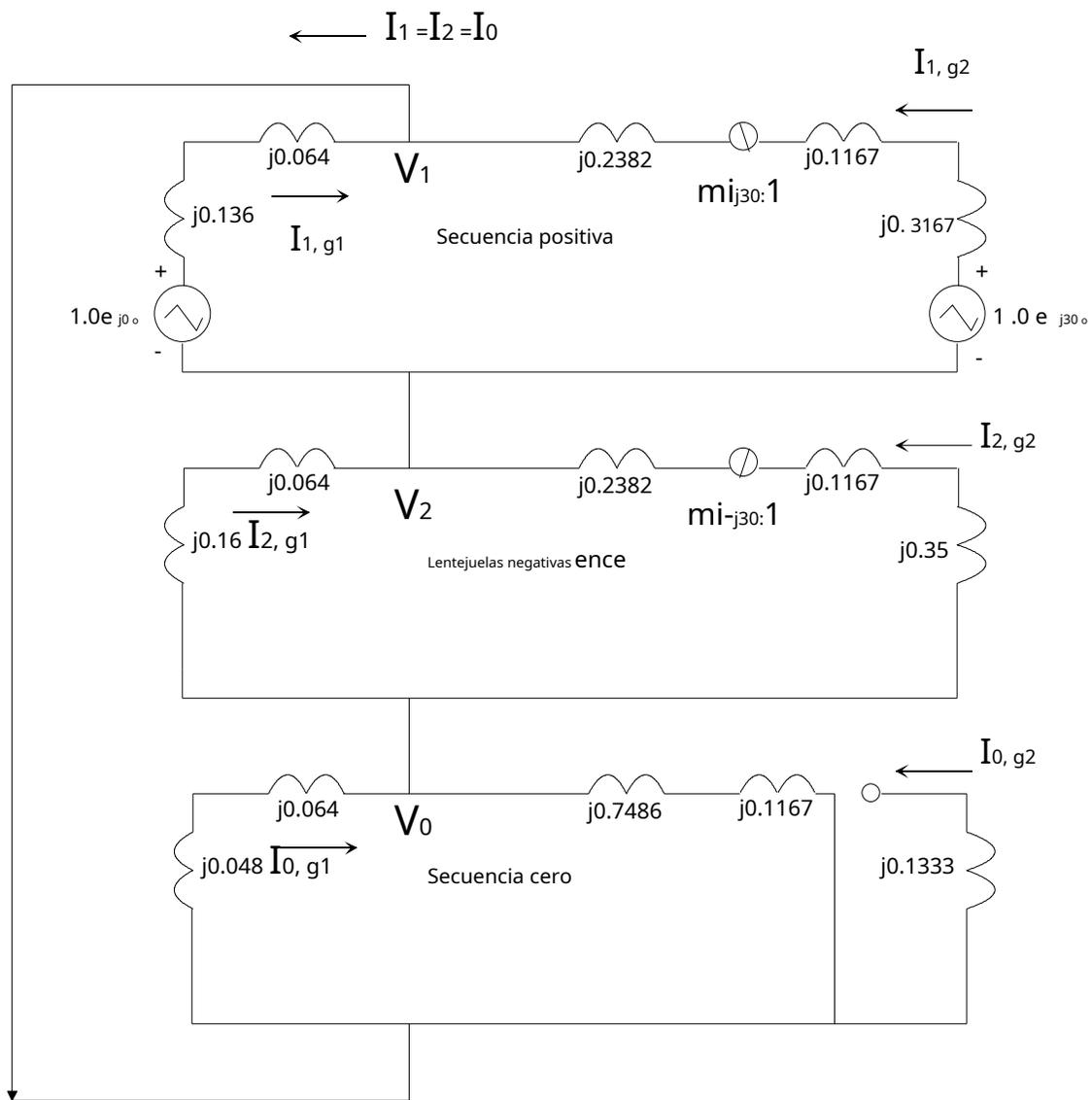
$$z_1 = j0.19 \frac{100}{60} = j0.31676 \text{ (pu)}$$

$$z_2 = j0.21 \frac{100}{60} = j0.35 \text{ (pu)}$$

$$z_0 = j0.08 \frac{100}{60} = j0.1333 \text{ (pu)}$$

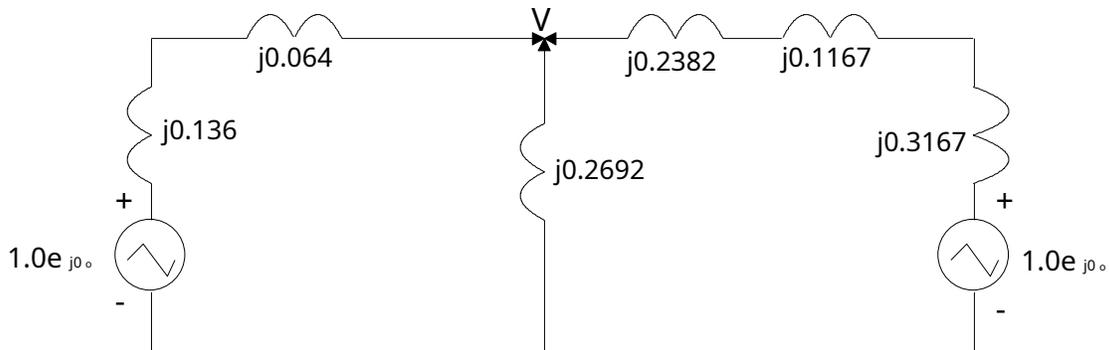
Para que las corrientes previas a la falla sean cero, los ángulos de fase de los voltajes generados deben seleccionarse se ilustra en la Figura P4.11a.

**Las redes de secuencia del sistema son:**



**Figura P4.11a. Redes de secuencia del sistema**

De la Figura P4.11a, al reducir las redes equivalentes de secuencia cero y negativa, el se puede obtener el siguiente circuito equivalente:



**Figura P4.11b. Circuito equivalente de redes de secuencia**

Resolviendo para V en la figura P4.11b, como sigue:

$$\frac{1.0e^{j0} \text{ V}}{j0.2} - \frac{V}{j0.2692} - \frac{1.0e^{j0} \text{ V}}{j0.6716} = 0.0$$

La ecuación anterior produce la siguiente solución:

$$\tilde{V} = 0,6359, \quad \tilde{I}_1 = \tilde{I}_2 = \tilde{I}_0 = 2.3623 \text{ mi } j^{90^\circ}$$

En la Figura 1, los componentes de secuencia del voltaje en la ubicación de la falla son:

$V_1 = 0,6359$  (pu), secuencia positiva

$V_2 = 0.4016$  (pu), secuencia negativa

$V_0 = 0.2343$  (pu), secuencia cero

A partir de la Figura 1, se pueden calcular las siguientes corrientes de secuencia:

**Lado del generador # 1 (sin cambio de fase), corrientes en la dirección "fuera" del generador:**

$$\tilde{I}_{1, \text{generador}} = \frac{1.0 \cdot 0,635}{j0,2} = 1.8255 \text{ mi } j^{90^\circ} \text{ (pu)}$$

$$\tilde{I}_{2, \text{generador}} = \frac{0.401}{j0,224} = 1.7897 \text{ mi } j^{90^\circ} \text{ (pu)}$$

$$\tilde{I}_{0, \text{generador}} = \frac{0,234}{j0,112} = 2.0884 \text{ mi } j^{90^\circ} \text{ (pu)}$$

Los componentes de secuencia del generador n.º 1 de voltajes terminales son:

$$V_1 = 1.0 \text{ pu} \quad (1.8255 \text{ pu} \angle 0^\circ, 0.7517 \text{ pu} \angle 136^\circ) \quad (\text{pu})$$

$$V_2 = 1.7897 \text{ pu} \angle 16^\circ \quad 0.284 \text{ pu} \quad (\text{pu})$$

$$V_0 = 2.0884 \text{ pu} \angle 0.48^\circ \quad 0.1002 \text{ pu} \quad (\text{pu})$$

Los voltajes de los terminales del generador n.º 1 son:

$$V_{abc} = [0.3651 \text{ pu} \quad 0.9587 \text{ pu} \angle 110.32^\circ \quad 0.9587 \text{ pu} \angle 110.32^\circ]^T$$

Lado del generador # 2 (cambio de fase), corrientes en la dirección "fuera" del generador:

$$\tilde{I}_{\text{grano2}} = \frac{1.0 \text{ pu} \angle 0.635^\circ}{j0.6716} = 1.0 \text{ pu} \angle 90.635^\circ = 0.5436 \text{ pu} \angle 120.635^\circ$$

$$\tilde{I}_{\text{grano2}} = \frac{0.401}{j0.7049} = 1.0 \text{ pu} \angle 90^\circ = 0.5687 \text{ pu} \angle 60^\circ$$

$$\tilde{I}_{\text{grano2}} = 0 \text{ pu}$$

Los componentes de secuencia del generador n.º 2 de voltajes terminales son:

$$V_1 = 1.0 \text{ pu} \angle 0^\circ, 0.5436 \text{ pu} \angle 120^\circ, 0.3167 \text{ pu} \angle 0^\circ \quad (\text{pu})$$

$$V_2 = 0.5687 \text{ pu} \angle 60^\circ, 0.199 \text{ pu} \angle 0^\circ \quad (\text{pu})$$

$$V_0 = 0 \text{ pu}$$

Los voltajes de los terminales del generador n.º 2 son:

$$V_{abc} = [0.7484 \text{ pu} \angle 43.32^\circ \quad 0.7484 \text{ pu} \angle 136.68^\circ \quad 1.0268 \text{ pu} \angle 90^\circ]^T$$

**Problema P4.12:** A ciertas ubicaciones de un sistema de energía eléctrica de 115 kV, el punto de conducción impedancias se encuentran:

(a) secuencia positiva / negativa:  $R_1 = jL_1 = 0.001 - j0.055 \text{ pu}$  @ 115 kV (L Tierra 100 MVA)

(b) secuencia cero:  $R_0 = jL_0 = 0.008 - j0.195 \text{ pu}$  @ 115 kV (L Tierra 100 MVA)

Suponga una falla monofásica a tierra en este punto y en la fase A. Calcule el voltaje de las fases sin falla.

**Solución:** Las corrientes de falla de secuencia son:

$$\tilde{I}_1 = \tilde{I}_2 = \tilde{I}_0 = \frac{1}{0.01 - j0.305} = 3.2769 \text{ pu} \angle 88.12^\circ$$

Los voltajes de secuencia son:

$$\tilde{V}_1 = 1.0 \angle (0,001 - j0,055) \tilde{I}_1 = 0,81976 \text{ mi} \angle j0,1840$$

$$\tilde{V}_2 = (0,001 - j0,055) \tilde{I}_2 = 0,18025 \text{ mi} \angle j179,160$$

$$\tilde{V}_0 = (0,008 - j0,195) \tilde{I}_0 = 0,63395 \text{ mi} \angle j179,530$$

Los voltajes de las fases no falladas son:

$$\tilde{V}_B = \frac{2}{\sqrt{3}} \tilde{V}_1 \angle -120^\circ = 1,291 \text{ mi} \angle j17,80$$

$$\tilde{V}_C = \frac{2}{\sqrt{3}} \tilde{V}_1 \angle 120^\circ = 1,291 \text{ mi} \angle j18,0^\circ$$

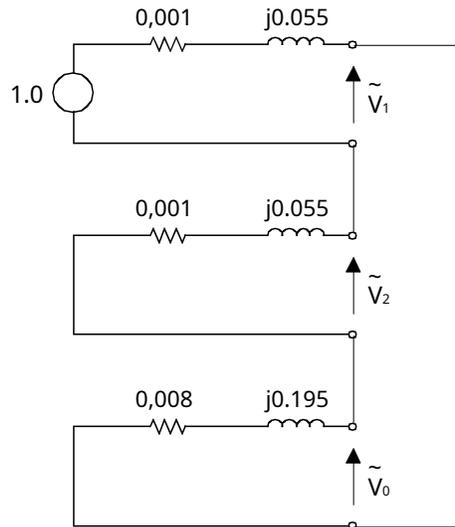


Figura P4.12

**Problema P4.13:** Considere un circuito de 600 A, 25 kV (voltaje de línea a línea), dos millas de largo, como se ilustra en la figura P4.13. La impedancia de fuente equivalente (sobre una base de 33,33 MVA, 14,45 kV) es:

$$z_1 = z_2 = j0,15 \text{ pu} \quad z_0 = j0,11 \text{ pu}$$

La impedancia del circuito es

$$z_1 = z_2 = j0,70 \text{ ohmios / milla}, \quad z_0 = j2,10 \text{ ohm s / milla}$$

Considere una falla monofásica a tierra al final del circuito en la fase A.

(a) Calcule la corriente de falla.

(b) Calcule el voltaje de las fases sin falla, B y C.

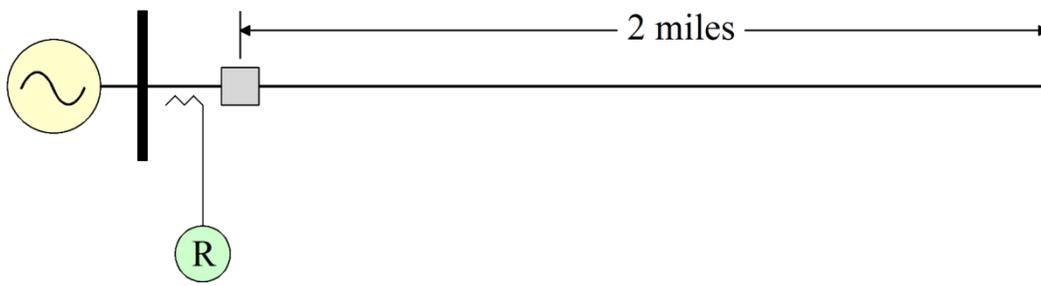
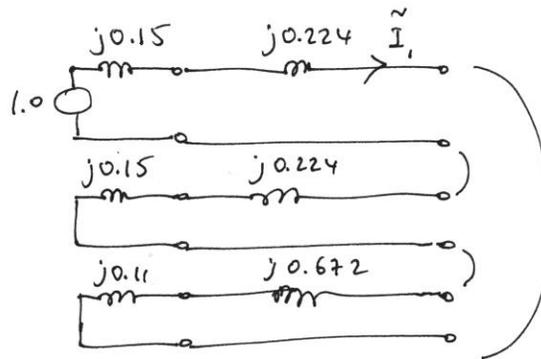


Figura P4.13

Solución: (a)

a)



$$\tilde{I}_1 = \tilde{I}_2 = \tilde{I}_0 = \frac{1}{j1.53} = -j0.6$$

$$I_F = 1.9607 \text{ pu} \\ = 4.528 \text{ kA}$$

$$b) \quad \tilde{V}_1 = 1.0 - (j0.374)(-j0.6535) = 1.0 - 0.2444 = 0.7556$$

$$\tilde{V}_2 = -(j0.374)(-j0.6535) = -0.2444$$

$$\tilde{V}_0 = -(j0.782)(-j0.6535) = -0.511$$

$$\tilde{V}_b = 0.7556 a^2 - 0.2444 a - 0.511 = 1.1565 e^{-j131.51^\circ}$$

$$\tilde{V}_c = 0.7556 a - 0.2444 a^2 - 0.511 = 1.1565 e^{j131.51^\circ}$$

**Problema P4.14:** Considere el sistema de energía eléctrica de la Figura P4.14. El sistema consta de un generador, un transformador conectado delta-estrella y una línea trifásica. Suponga que ocurre una falla monofásica a tierra en el punto A de la línea, ubicado a 25.6 millas del transformador. El análisis de fallas para esta condición se proporciona a continuación utilizando componentes simétricos.

- Calcule la magnitud del voltaje de las fases B y C en el punto A durante la condición de falla, y
- Calcule la corriente eléctrica suministrada por el generador (las tres fases).
- Calcule los voltajes en las tres fases del generador.

Utilice la teoría de componentes simétricos en los cálculos. Los datos del sistema son los siguientes:

Generador (350 MVA, 15kV):

$$x_1 = 0.175, \quad x_2 = 0.21, \quad x_0 = 0.08 \quad (@ 350 \text{ MVA})$$

Transformador (280 MVA, 15kV / 115kV):

$$x_1 = x_2 = x_0 = 0.08 \quad (@ 280 \text{ MVA})$$

Línea de transmisión:

$$x_1 = x_2 = 0.3 + j0.72 \text{ h / } \Omega, \quad x_0 = 0.45 + j1.75 \text{ h / } \Omega$$

Ignore la impedancia de derivación del transformador y la impedancia de derivación capacitiva de la línea de transmisión.

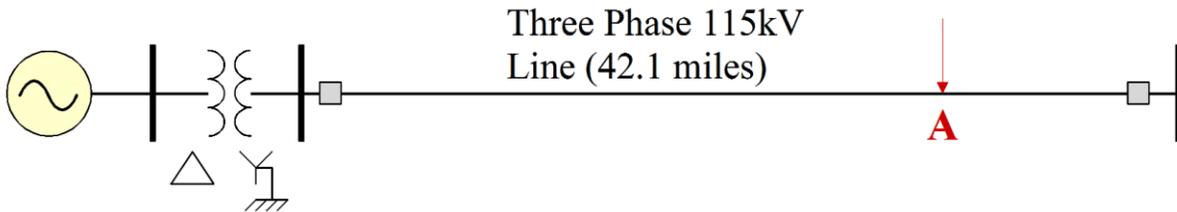


Figura P4.14. Sistema de energía simplificado

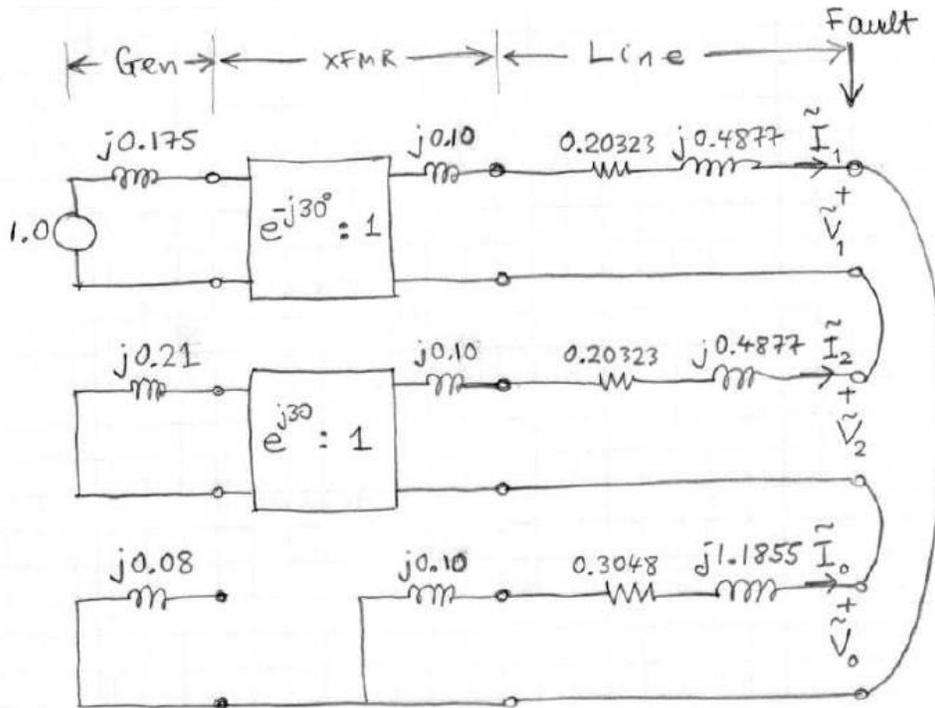
**Solución:** Los parámetros de la línea de transmisión en el sistema por unidad son:

$$Z_B = \frac{115^2}{350} = 37.79 \text{ ohmios}$$

$$z_1 = z_2 = (0.3 + j0.72) \frac{1}{37.79} = 0.20323 + j0.4877 \text{ pu}$$

$$z_0 = (0.45 + j1.75) \frac{1}{37.79} = 0.3048 + j1.1855 \text{ pu}$$

La



$$\begin{matrix} \tilde{I}_1 & \tilde{I}_2 & \tilde{I}_0 \\ \hline & & \frac{mi_{\beta 0}}{0,71126 \ j2.8459} \end{matrix} \quad 0.3409mi_{j45,97} \quad 0.2369 \ j0.2451$$

$$\begin{matrix} \tilde{I}_a & 1 & 1 & 1 & I & \tilde{I}_1 & 1.0227mi_{j45,97} \\ \tilde{I}_B & a_2 & a & 1 & I & \tilde{I}_2 & 0.0 & pu \\ \tilde{I}_C & a & a & 1 & \sim & I_0 & 0.0 & , 0 \\ \tilde{I}_a & 1 & 1 & 1 & I & \tilde{I}_1 & 1.855mi_{j45,97} \\ \tilde{I}_B & a_2 & a & 1 & I_2 & \tilde{I}_2 & 0.0 & kAmperes \\ \tilde{I}_C & a & a^2 & 1 & \sim & I_0 & 0.0 \end{matrix}$$

ECE 4321

HW # 3

Solution

Problem 1

$$(a) \quad \begin{aligned} \tilde{V}_1 &= 1.0 e^{j30^\circ} - (0.20323 + j0.7627) \tilde{I}_1 = 0.73096 e^{j30.327^\circ} \\ \tilde{V}_2 &= -(0.20323 + j0.7627) \tilde{I}_2 = 0.26907 e^{j209.109^\circ} \\ \tilde{V}_0 &= -(0.3048 + j1.2855) \tilde{I}_0 = 0.45037 e^{j210.691^\circ} \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{V}_a \\ \tilde{V}_b \\ \tilde{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{V}_1 \\ \tilde{V}_2 \\ \tilde{V}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ \\ \end{bmatrix}$$

(b)

$$\tilde{I}_{g1} = 0.3409 e^{-j15.97^\circ}$$

$$\tilde{I}_{g2} = 0.3409 e^{-j75.97^\circ}$$

$$\tilde{I}_{g0} = 0$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{I}_a \\ \tilde{I}_b \\ \tilde{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{I}_{g1} \\ \tilde{I}_{g2} \\ \tilde{I}_{g0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.59045 e^{-j45.97^\circ} \\ 0 \\ 0.59045 e^{j134.03^\circ} \end{bmatrix}$$

(c)

$$\tilde{V}_{g1} = 1.0 - (j0.175)(0.3409 e^{-j15.97^\circ}) = 0.98358 - j0.05735$$

$$\tilde{V}_{g2} = -(j0.21)(0.3409 e^{-j75.97^\circ}) = 0.071589 e^{j194.03^\circ}$$

$$\tilde{V}_{g0} = 0$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{V}_{ga} \\ \tilde{V}_{gb} \\ \tilde{V}_{gc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{V}_{g1} \\ \tilde{V}_{g2} \\ \tilde{V}_{g0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ \\ \end{bmatrix}$$

Parte (a):

$$\begin{aligned}\tilde{V}_a & 0.0 \\ \tilde{V}_B & 1.1112mi^{j97.2760} \text{ pu} \\ \tilde{V}_C & 1.1013mi^{j157.99710}\end{aligned}$$

**Problema P4.15:** En la ubicación de un interruptor, la resistencia equivalente de Thevenin es 0.2 pu y la inductancia equivalente es 0.006 pu sobre una base de 13.8 kV (voltaje L a L), 100 MVA (trifásico total). Una falla en esta ubicación se interrumpe en 4.5 ciclos. Calcule el valor rms máximo posible de la corriente de falla en el momento de la interrupción.

**Solución:** La impedancia en pu es:

$$z = 0,2 + j 0,006 = 0,2 + j2.2619$$

La impedancia, la resistencia y la inductancia de base son:

$$Z_B = \frac{13,8^2}{100} = 1.9044 \text{ ohmios}$$

$$R = 0,2 \cdot 1.9044 = 0.3809 \text{ ohmios}$$

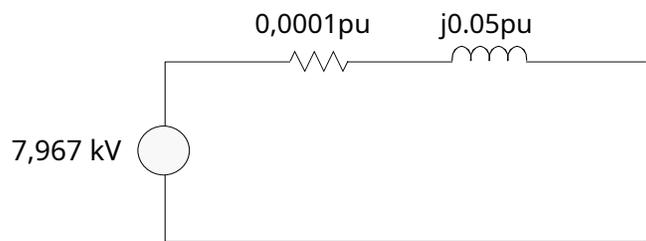
$$L = 0,006 \cdot Z_B = 0,114 \text{ Henries}$$

La corriente de falla en el momento de la interrupción ( $t = 4.5 / 60$  segundos) es:

$$I_{F, \text{máx}} = \left| \frac{13,8 \sqrt{3}}{0.3809 + j4.3076} \right| \sqrt{1 - \frac{2R}{L}} = 1.9872 \text{ kA} \text{ nota para mí: comprobar resultado / ecuación}$$

**Problema P4.16:** En la ubicación de un interruptor, la impedancia equivalente de Thevenin consiste en una serie R y L y la fuente equivalente de Thevenin es 7,967 kV. La reactancia inductiva (j L) es 0.05 pu y la resistencia (R) es 0.0001 pu sobre una base de 7.967 kV, 3.333 MVA. El interruptor está configurado para eliminar una falla en seis ciclos de 60 Hz. Calcule el **máximo posible** Valor rms de la corriente de falla (en amperios) en el momento de la operación del interruptor, es decir, seis ciclos después del inicio de la falla.

**Solución:** El circuito equivalente se muestra a continuación.



La corriente de falla simétrica es:

$$I_{ac,s} \left| \frac{1}{0,0001 \cdot j0,5} \right| \frac{10}{13,8\sqrt{3}} \text{ kA } 8.3674 \text{ kA}$$

El valor rms máximo es

$$I_{rms,max} = I_{ac,s} \sqrt{1 + \frac{2Rt}{L}}$$

dónde:

$$R = 0,0001 \frac{13,8_2}{10} = 0,0019 \text{ ohmios}$$

$$L = \frac{0,05}{377} \frac{13,8_2}{10} = 0,0025 \text{ Henries}$$

$$\sqrt{1 + \frac{2Rt}{L}} = 1.6493 \text{ en } t = 0,1 \text{ segundos}$$

$$I_{rms,max} = 13,799 \text{ Amperios}$$

**Problema P4.17:** En la ubicación de un interruptor, la impedancia equivalente de Thevenin consiste en una serie R y L y la fuente equivalente de Thevenin es 14.45 kV. La reactancia inductiva (j L) es 0.08 pu y la resistencia (R) es 0.002 pu sobre una base de 14.45 kV, 3.333 MVA. El interruptor está configurado para eliminar una falla en seis ciclos de 60 Hz. Calcule el **máximo posible** Valor rms de la corriente de falla (en amperios) en el momento de la operación del interruptor, es decir, seis ciclos después del inicio de la falla.

**Solución:** La corriente de falla simétrica es:

$$I_{ac,s} \left| \frac{1}{0,002 \cdot j0,08} \right| \frac{3,333}{14,45} \text{ kA } 2.882 \text{ kA}$$

El valor rms máximo es

$$I_{rms,max} = I_{ac,s} \sqrt{1 + \frac{2Rt}{L}}$$

dónde:

$$R = 0,002 \frac{14,45_2}{3,333} = 0,1253 \text{ ohmios}$$

$$L = \frac{0,08}{377} \frac{14,45_2}{3,333} = 0,01329 \text{ Henries}$$

$$\sqrt{1 + \frac{2Rt}{L}} = 1,1417 \quad t = 0,1 \text{ segundos}$$

$$I_{rms,max} = 3290 \text{ Amperios}$$

**Problema P4.18:** En la ubicación de un interruptor, las impedancias de secuencia equivalentes son:

(a) secuencia pos / neg:  $R_1 + jL_1 = 0,001 + j0,075 \text{ pu, @13,8kV (L Tierra 36MVA)}$

(b) secuencia cero:  $R_0 + jL_0 = 0,003 + j0,055 \text{ pu, @13,8kV (L Tierra 36 MVA)}$

El interruptor está configurado para despejar una falla en cinco ciclos y medio de 60 Hz. Determina el **valor rms máximo posible** que se solicitará al interruptor que interrumpa durante una falla trifásica o una falla monofásica a tierra.

**Insinuación:** Calcule el valor rms máximo de la corriente (en amperios) para (a) falla trifásica y (b) falla monofásica a tierra en el momento de la operación del interruptor, es decir, cinco ciclos y medio después del inicio de la falla. Mediante la inspección de los resultados, seleccione el peor de los casos.

**Solución:** La corriente base es

$$I_B = 1,5061 \text{ kA}$$

La corriente de falla trifásica es:  $I_{sym, rms} = 13.3321, \quad X/R = 75$

La corriente de falla monofásica es:  $I_{sym, rms} = 14.6298, \quad X/R = 41$

Suponiendo un desplazamiento de CC máximo, el valor rms de la corriente eléctrica en el momento de la interrupción es:

$$\text{Fallo trifásico: } I_{F, rms} = 13.3321 \sqrt{1 + \frac{2Rt}{L}} = 17.866 \text{ pu, o } 26.908 \text{ kA}$$

$$\text{Falla monofásica a tierra: } I_{F, rms} = 14.6298 \sqrt{1 + \frac{2Rt}{L}} = 17.1275 \text{ pu, o } 25.7995 \text{ kA}$$

**Problema P4.19:** Considere el sistema de energía eléctrica de la figura P4.19. Los parámetros de los distintos componentes del sistema se muestran en la figura. Considere una falla de línea a tierra en la fase A, lado de alto voltaje del transformador. Por lo tanto, la falla está prácticamente en el bus de 230 kV. Se supone que esta falla se borra abriendo el disyuntor del generador aproximadamente 6 ciclos (tiempo total) después del inicio de la falla. Para simplificar, suponga que los interruptores de línea están abiertos y, por lo tanto, no habrá contribución a la corriente de falla de las líneas de transmisión. Calcule el **máximo posible valor rms** de la corriente de falla en el interruptor del generador en el momento de la interrupción.

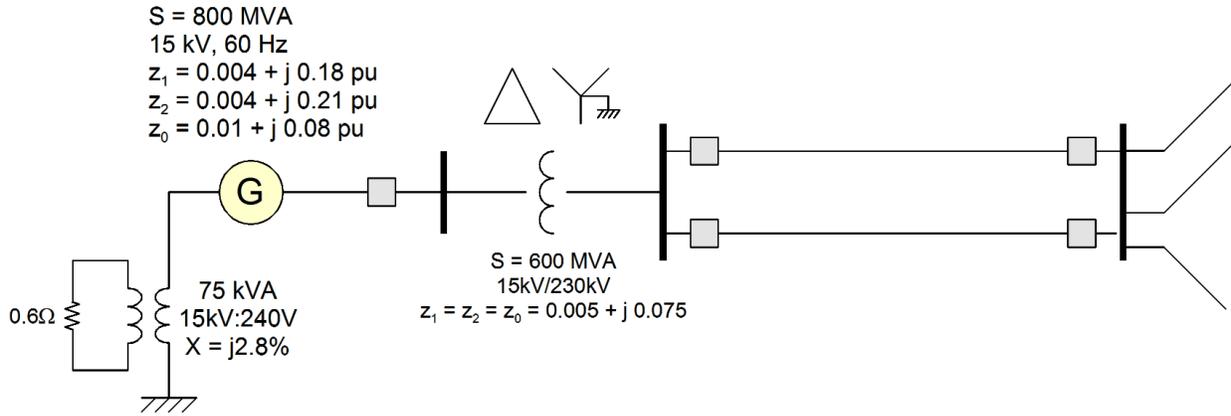
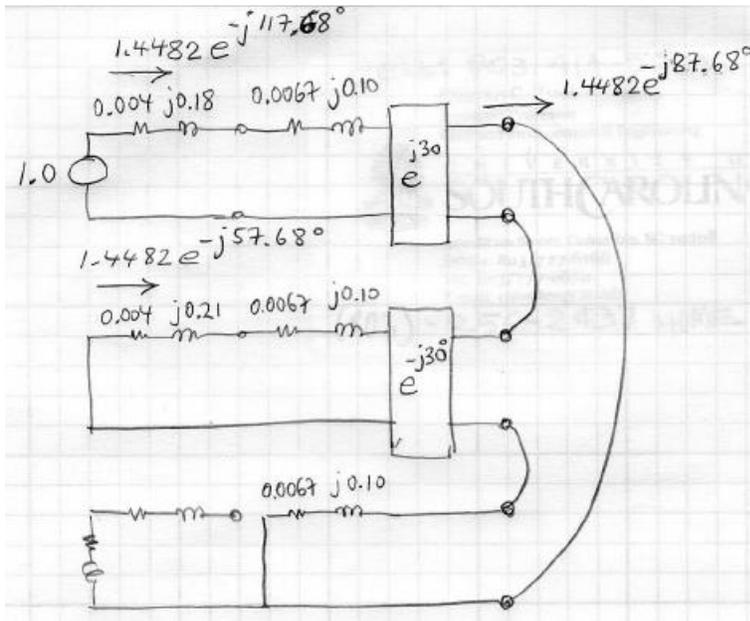


Figura P4.19

**Solución:** Dado que tenemos una falla de línea a tierra, necesitamos las redes equivalentes de secuencia positiva, negativa y cero. La siguiente figura ilustra los circuitos equivalentes y las conexiones para una falla de línea a tierra. Tenga en cuenta que el circuito se expresa en unidades por unidad en las clasificaciones del generador. La solución se superpone a la figura.



Por lo tanto, en el interruptor del generador fluyen las siguientes corrientes (corriente de falla simétrica):

$$\tilde{I}_{\text{falla}} = 1.4482 \text{ pu} \angle -117.68^\circ, \quad \tilde{I}_0 = 1.4482 \text{ pu} \angle -87.68^\circ, \quad \tilde{I}_c = 0.0$$

Convertir estos valores en unidades reales y en cantidades de fase mediante el transformador simétrico, obtenemos:

$$\tilde{I}_a = 77,235 \text{ A} \angle -87.68^\circ, \quad \tilde{I}_B = 77,235 \text{ A} \angle 92.33^\circ, \quad \tilde{I}_c = 0.0$$

Ahora la relación X a R se obtiene de la Figura, es decir,  $R = 0.028$  y  $X = 0.69$ . Por lo tanto:

$$\frac{X}{R} = 24.6429$$

Suponiendo la máxima compensación de CC, en el momento de la interrupción (6 ciclos) el valor rms será:

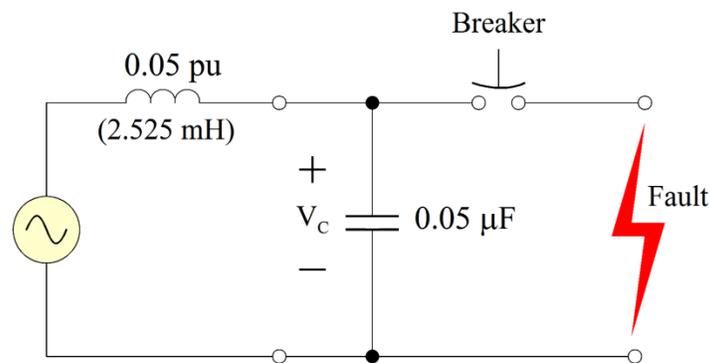
$$I_{F, rms} = 77.235 \sqrt{1 + \frac{2R_t}{\omega L}} = 80,776 \text{ A}$$

**Problema 4.20:** En la ubicación de un interruptor, la inductancia equivalente de Thevenin es 0.05 pu sobre una base de 7.96 kV, 3.3333 MVA. La capacitancia parásita total en este punto es de 0.05 microFaradios. Calcule el voltaje de recuperación transitorio de este interruptor, es decir, el valor máximo en voltios y el tiempo de subida al valor máximo en microsegundos.

**Solución:** Los valores numéricos de la capacitancia y la inductancia son:

$$C = 0,05 \text{ F}$$

$$L = \frac{0,05 \cdot 13,8^2}{10} = 2.5 \text{ mH}$$



$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 88,985 \text{ rad/segundo}$$

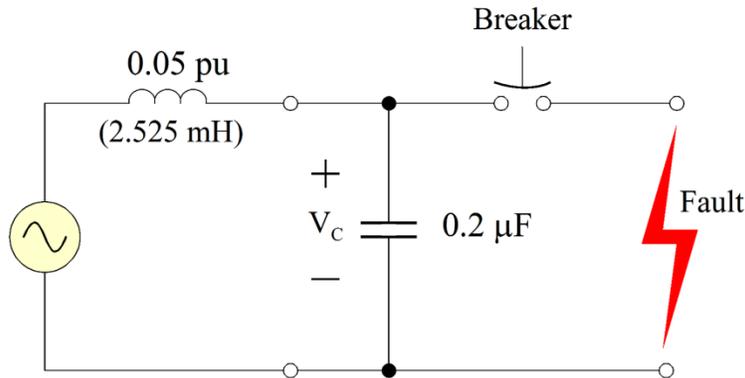
$$T = \frac{2}{\omega} = 35,3 \text{ segundo}$$

$$TRV = 2 \cdot 2 \sqrt{\frac{13,8}{\sqrt{3}}} \text{ kV} = 22,536 \text{ V} \quad \text{o} \quad 2.0 \text{ pu}$$

**Problema P4.21:** En la ubicación de un interruptor, la inductancia equivalente de Thevenin es 0.05 pu sobre una base de 7.96 kV, 3.3333 MVA. La capacitancia parásita total en este punto es de 0.05 microFaradios. Un ingeniero decide que la capacitancia parásita no es suficiente y agrega un capacitor de valor 0.15 microFaradios en paralelo con la capacitancia parásita. Calcule el voltaje de recuperación transitorio de este interruptor, es decir, el valor máximo en voltios y el tiempo de subida al valor máximo en microsegundos. La El voltaje de la fuente es de 7,96 kV. Desprecie la resistencia del circuito.

**Solución:**  $C = 0,2 \text{ F}$

$$L = \frac{0,05 \cdot 13,8^2}{10} = 2,5 \text{ mH}$$



$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 44,492 \text{ rad / segundo}$$

$$\frac{T}{2} = \frac{2}{2 \cdot \omega} = 70,6 \text{ segundo}$$

$$TRV = 2 \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{13,8}{\sqrt{3}}} \text{ kV} = 22,536 \text{ V} \quad \text{o} \quad 2,0 \text{ pu}$$

**Problema P4.22:** Un problema de TRV con la limpieza de un generador fuera de paso.

**Problema P4.23:** En la ubicación de un interruptor y para una falla específica cerca del interruptor de un sistema de 60 Hz, el voltaje equivalente de Thevenin es 1.0 pu y la impedancia equivalente de Thevenin es

$Z = 0,002 + j0,08 \text{ pu}$  sobre una base de 7,96 kV, 33,33 MVA.

Una falla en esta ubicación es interrumpida por el interruptor en 5.0 ciclos. Calcule el máximo posible valor rms de la corriente de falla en el momento de la interrupción.

**Solución:**

$$I_{F_{rms}} = I \sqrt{1 + 2e^{-\frac{2R}{L}t_1}}$$

$$I = I_{pu} I_b = \frac{1}{\sqrt{0.002^2 + 0.08^2}} \cdot \frac{33.33}{7.96} \text{ kA}$$

$$= 52.323 \text{ kA}$$

$$\frac{2R}{L} t_1 = \frac{2R\omega}{\omega L} t_1 = (18.85)(0.08333)$$

$$= 1.57$$

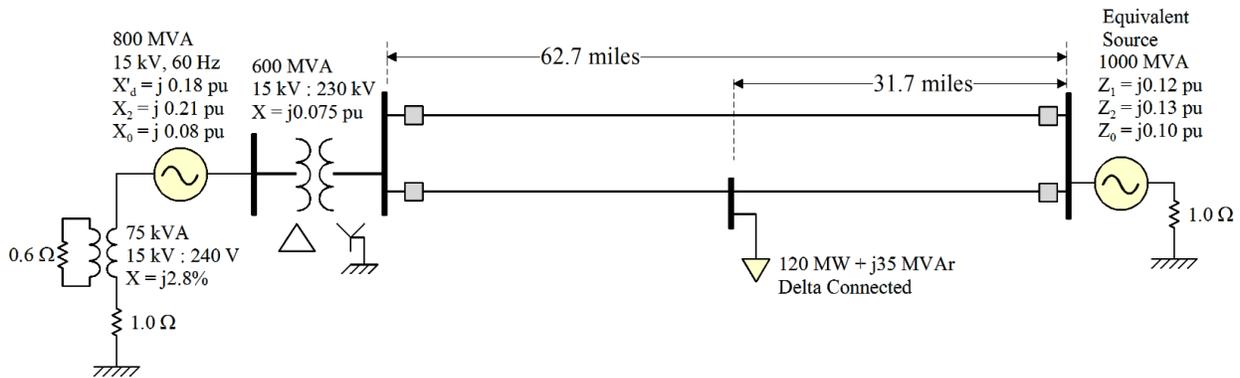
$$\sqrt{1 + 2e^{-\frac{2R}{L}t_1}} = 1.18985$$

$$I_{F_{rms}} = 62.256 \text{ kA}$$

**Problema P4.24:** Considere el sistema de energía eléctrica de la figura P4.24. Los parámetros de los distintos componentes del sistema se muestran en la figura. Considere una sola línea a tierra en la ubicación de la carga (cerca de la mitad de una de las líneas).

Las dos líneas de transmisión están paralelas entre sí a lo largo de 62,7 millas. Cada línea está suspendida en un solo polo (nombre: AGC-P-230), utiliza conductores de fase ACSR, BITTERN, alambres de blindaje ALUMOWE, 3 # 7AW, resistividad del suelo 175 ohm. Metros, los polos están espaciados 0.1 millas, la impedancia de tierra en cada polo es de 25 ohmios y la distancia entre las dos líneas es de 40 pies (polo a polo).

- Calcule los modelos de secuencia positiva / negativa y cero de cada una de las líneas y el modelo de impedancia mutua entre las dos líneas. Para este cálculo, ignore la carga eléctrica cerca de la mitad de una de las líneas.
- Calcule la falla de una sola línea a tierra en la ubicación de la carga modelando las dos líneas de transmisión como dos líneas mutuamente acopladas. Durante esta falla, calcule la corriente de secuencia negativa en el generador.
- Calcule la falla de línea única a tierra en la ubicación de la carga modelando las dos líneas de transmisión como dos líneas independientes (no acopladas entre sí). Durante esta falla Calcule la corriente de secuencia negativa en el generador.
- Compare los resultados en los casos (b) y (c) anteriores.



Problem 2 Data File available on course web site.

(a)  $Z_1 = Z_2 = 4.597 + j43.770$  ohms

$Z_0 = 39.435 + j150.962$  ohms

Mutual Impedances

$Z_{1m} = Z_{2m} = 0$

$Z_{0m} = 34.5190 + j84.7059$  ohms.

(b)  $\tilde{I}_{1P-G-Fault} = 5.1956 e^{-j77.1639}$  kA

$\tilde{I}_{g2} = 9.728 e^{j128.7}$  kA

(c)  $\tilde{I}_{1P-G-Fault} = 5.0703 e^{-j78.4445}$  kA

$\tilde{I}_{g2} = 9.460 e^{j127.5}$  kA

(d) Fault Current Error

Magnitude: 2.4% Phase: 1.2806°

Generator Negative Sequence Error

Magnitude: 2.75% Phase: 1.2°

**Problema P4.25:** En una determinada ubicación de un sistema de energía eléctrica de 115 kV, las impedancias del punto de conducción son:

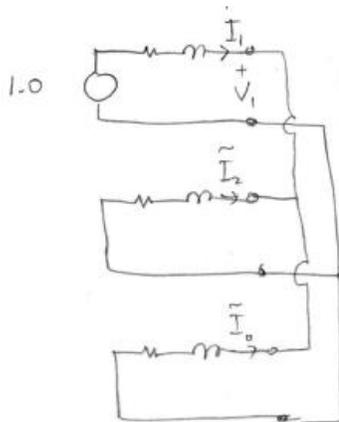
(a) secuencia pos / neg:  $R_1 \pm jL_1$  0,001  $\pm j0.055$  pu, @115kV (L Tierra 100MVA)

(b) secuencia cero:  $R_0 \pm jL_0$  0,008  $\pm j0.195$  pu, @115kV (L Tierra 100MVA)

Suponga una falla de línea a línea a tierra en este punto y en las fases B y C.

1. Calcule las corrientes de falla de las fases B y C.
2. Calcule el voltaje de la fase A durante la falla.

**Solución:**



$$Z_2 \parallel Z_0 = \frac{(0.001 + j0.055)(0.008 + j0.195)}{0.009 + j0.25}$$

$$= 0.042915384 e^{j88.67085}$$

$$= 0.00099546 + j0.0429038$$

$$\tilde{I}_1 = \frac{1}{Z_1 + Z_2 \parallel Z_0} = \frac{1.0}{0.00199546 + j0.0979038}$$

$$= 10.21198 e^{-j88.8323^\circ}$$

$$\tilde{V}_1 = \tilde{I}_1 (Z_2 \parallel Z_0) = 0.43825 e^{-j0.16145^\circ}$$

$$\tilde{I}_2 = -\frac{\tilde{V}_2}{Z_2} = 0.1219 - j7.9656$$

$$\tilde{I}_0 = -\frac{\tilde{V}_0}{Z_0} = 0.0856 - j2.2478$$

$$\tilde{I}_a = 0$$

$$\tilde{I}_b = 15.8696 + j3.0838$$

$$\tilde{I}_c = 15.6116 + j3.6524$$

$$\tilde{V}_a = 1.31475 e^{-j0.1645^\circ}$$

### Problem 1

$$\text{Transmission line} \quad L_s = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{D_e}{d} \quad L_m = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{D_e}{D}$$

$$D_e = 2160 \sqrt{\frac{P}{f}} = 6235.4 \text{ feet}$$

$$D = \sqrt[3]{(9.5)(9.5)(19)} = 11.969 \text{ feet}$$

$$L_s = 2.418 \times 10^{-6} \text{ H/m}$$

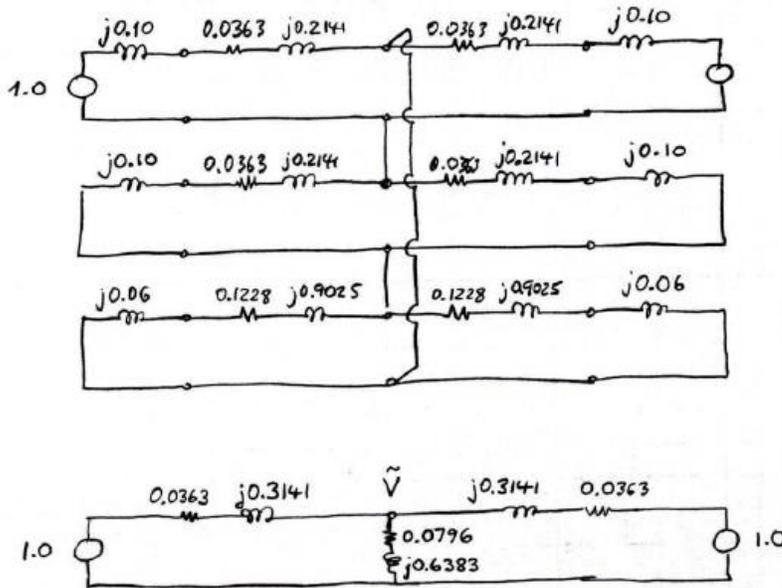
$$L_m = 1.251 \times 10^{-6} \text{ H/m}$$

$$r_e = 0.00159 \text{ f } \Omega/\text{mile} = 0.0954 \text{ } \Omega/\text{mile}$$

$$r = 0.12 \text{ } \Omega/\text{mile}$$

$$Z_1 = 0.12 + j\omega(L_s - L_m)(1609) \text{ } \Omega/\text{mile} = 0.12 + j0.708 \text{ } \Omega/\text{mile}$$

$$Z_0 = r + 3r_e + j\omega(L_s + 2L_m)(1609) = 0.406 + j2.984 \text{ } \Omega/\text{mile}$$



$$\left( \frac{2}{0.0363 + j0.3141} + \frac{2}{0.0796 + j0.6383} \right) \tilde{V} = \frac{2}{0.0363 + j0.3141}$$

$$\Rightarrow \tilde{V} = 0.8027 e^{-j0.5^\circ}$$

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{\tilde{V}}{0.0796 + j0.6383} = 1.248 e^{-j83.3^\circ}$$

$$I_a = 3.7439 \text{ pu}$$

**Problema P4.26:** Considere el sistema de energía eléctrica de la figura P4.26. Los parámetros de los distintos componentes del sistema se muestran en la figura. Considere una falla de línea a tierra en la ubicación A. La ubicación A se indica en la figura. La ubicación A está muy cerca del bus de 230 kV del transformador y prácticamente la impedancia entre el bus y la ubicación A es cero. Se da que antes de la falla la unidad opera bajo voltaje nominal en sus terminales y potencia cero.

- Construya las redes de secuencia positiva, negativa y cero de este sistema en por unidad - use como base de potencia 800 MVA (trifásico total) y base de voltaje los voltajes nominales correspondientes.
- Calcule la corriente de secuencia negativa en el generador durante la falla (línea única a tierra en la ubicación A).
- Calcule la corriente de secuencia cero en la línea de transmisión sin falla.

Las impedancias de secuencia positiva, negativa y cero de cada línea son:  $Z_1 = Z_2 = j37,5 \text{ ohmios}$  y  $Z_0 = j93,7 \text{ ohmios}$ . Las líneas de transmisión no están acopladas entre sí. El "bus infinito" es un ideal-Fuente de voltaje trifásico balanceado. Suponga que el flujo de energía es cero antes de la falla.

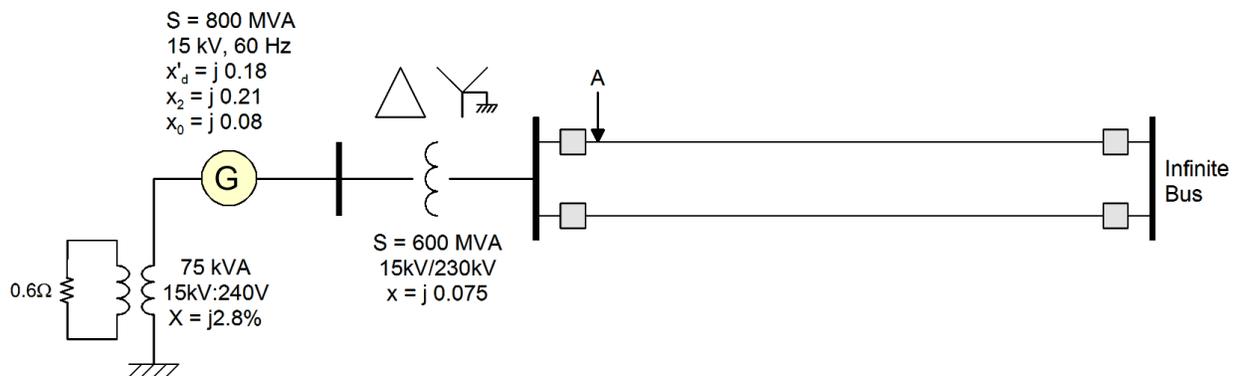
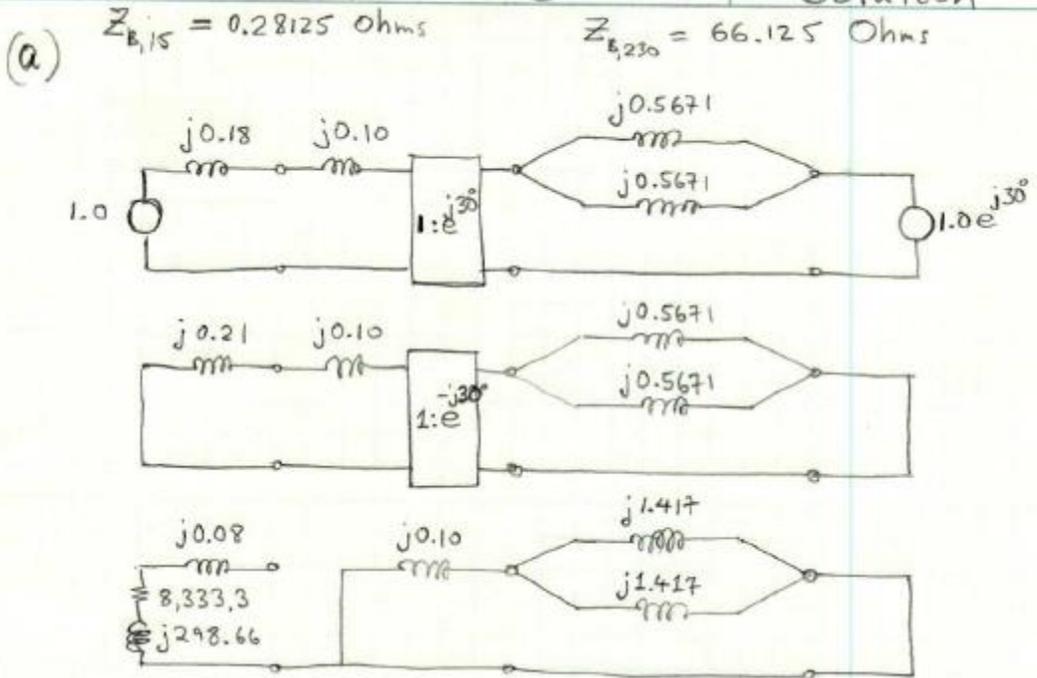


Figura P4.26

**Solución:**



(b)

$$\tilde{I}_{g,neg} = 1.268 e^{-j90^\circ}$$

(c)

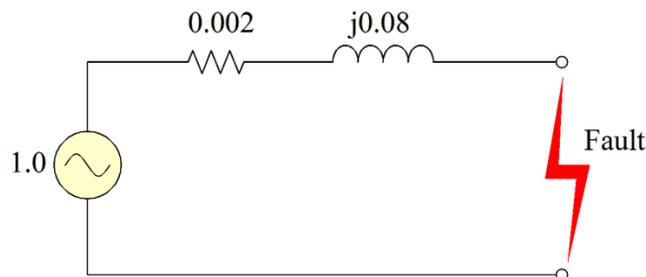
$$\tilde{I}_{d,ne2,zero} = 0.1642 e^{j120.0^\circ}$$

**Problema P4.27:** En la ubicación de un interruptor y para una falla específica cerca del interruptor de un sistema de 60 Hz, el voltaje equivalente de Thevenin es 1.0 pu y la impedancia equivalente de Thevenin es

$Z = 0.002 + j0.08 \text{ pu}$  sobre una base de 7,96 kV, 33,33 MVA.

Una falla en esta ubicación es interrumpida por el interruptor en 5.0 ciclos. Calcule el máximo posible valor rms de la corriente de falla en el momento de la interrupción.

**Solución:** El modelo de circuito equivalente es:



El valor rms de la corriente de falla es:

$$I_{F_{rms}} = I \sqrt{1 + 2e^{-\frac{2R}{L}t_1}}$$

$$I = I_{pu} I_b = \frac{1}{\sqrt{0.002^2 + 0.08^2}} \cdot \frac{33.33}{7.96} \text{ kA}$$

$$= 52.323 \text{ kA}$$

$$\frac{2R}{L}t_1 = \frac{2R\omega}{\omega L}t_1 = (18.85)(0.08333)$$

$$= 1.57$$

$$\sqrt{1 + 2e^{-\frac{2R}{L}t_1}} = 1.18985$$

$$I_{F_{rms}} = 62.256 \text{ kA}$$

**Problema P4.28:** Un generador síncrono de 60 Hz, 18 kV, 360 MVA está conectado a un bus infinito (fuente de voltaje ideal - impedancia interna cero) a través de un transformador elevador y una línea de transmisión compensada por condensador en serie como en la Figura P4.28. El voltaje en los terminales del generador es 1.0 pu, la potencia real generada es 0.95 pu y el factor de potencia es 0.95 con retraso de corriente. La reactancia transitoria del generador es 0.20 pu por unidad en las clasificaciones del generador. El transformador es de 360 MVA, 18 kV / 230 kV, con una impedancia de fuga de  $j0.08$  pu en los valores nominales del transformador. La impedancia de la línea de transmisión es de  $j0.10$  por unidad sobre una base de 100 MVA (3 fases), 230 kV (línea a línea). El valor absoluto de la impedancia del condensador es el 60% del valor absoluto de la impedancia de la línea de transmisión.

- Calcule la impedancia de la línea de transmisión en por unidad en la misma base que para el lado de 230 kV del transformador.
- Calcule la impedancia del capacitor en serie en por unidad en la misma base que para el lado de 230 kV del transformador.
- Calcule el fasor de voltaje de bus infinito y el fasor de voltaje generado del generador.
- Suponga una falla monofásica a tierra en el medio de la línea de transmisión de 230 kV. Suponga además que el voltaje generado y el voltaje del bus infinito permanecen constantes. Calcule la corriente de falla en por unidad y en amperios reales.

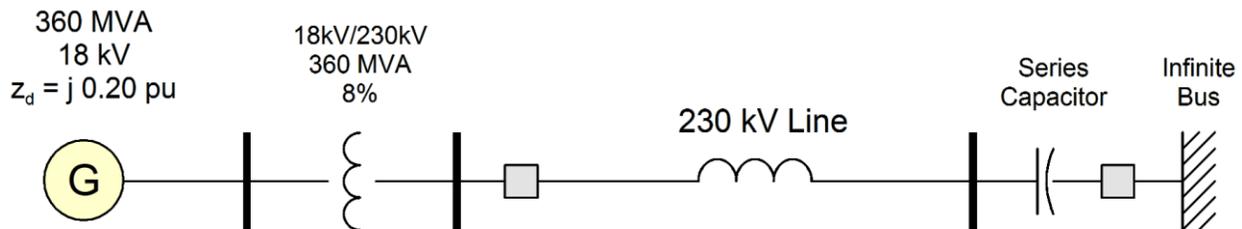


Figura P4.28

El transformador está conectado delta-estrella (delta en el lado del generador).

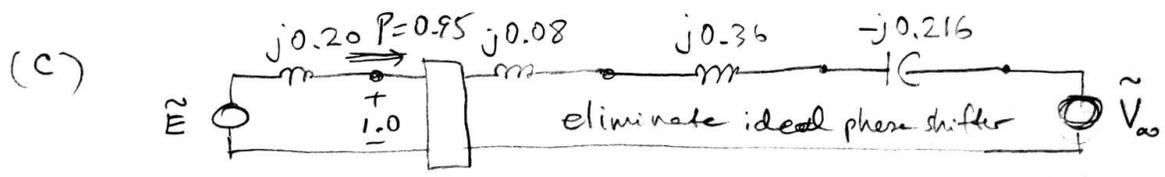
Suponga que las impedancias de secuencia positiva, negativa y cero son las mismas para cada dispositivo.

Solución:

ECE6323 FINAL | Problem 1 | Solution

$$(a) \quad Z_{Line} = j0.1 \frac{230^2/100}{230^2/360} = j0.36 \text{ pu}$$

$$(b) \quad Z_{cap} = -j0.36 \times 0.60 = -j0.216 \text{ pu}$$



$$\tilde{I} = 1.0 e^{-j18.195^\circ}$$

$$\tilde{E} = 1.0 + j(0.2)(1.0 e^{-j18.195^\circ}) = 1.08 e^{j10.139^\circ}$$

$$\tilde{V}_\infty = 1.0 - j(0.224)(1.0 e^{-j18.195^\circ}) = 0.954 e^{-j12.887^\circ}$$

$$(d) \quad \tilde{I}_{fault} = 7.9341 e^{j44.954^\circ} \text{ pu}$$

$$I_{fault} = 7.17 e^{j44.954^\circ} \text{ kA}$$

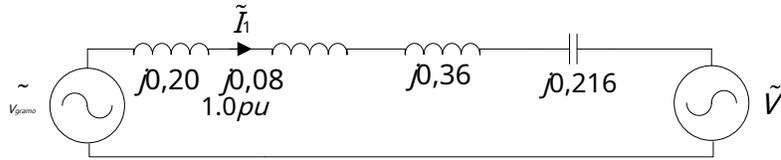
a)

B)

C)  $Z_{line} \ j0.1 \frac{360 \text{ MVA}}{100 \text{ MVA}} \ j0.36 \text{ pu}$

D)  $Z_{gorra} \ j0.6 \ Z_{line} \ j0.216 \text{ pu}$

e) El circuito equivalente de fase positiva es el siguiente,



$$\tilde{I}_1 = \left| \frac{PAG}{0.95 \tilde{V}_1} \right| m i_{j \arccos 0.95} \quad \frac{0.95}{0.95} m i_{j \arccos 0.95} \quad 1.0 m i_{j 18.1949^\circ} pu$$

$$\tilde{V}_{grano} = \tilde{V}_1 j 0.2 + I \tilde{I}_1 j 0.2 + 1.0 m i_{j 18.1949^\circ} + 1.0 j 0.2 + 1.0 m i_{j 0.3176}$$

$$1.0624 j 0.19 + 1.0793 m i_{j 0.177} pu + 1.0793 m i_{j 10.1391} pu$$

$$\tilde{V} = \tilde{V}_1 j (0.08 + 0.36 + 0.216) + I \tilde{I}_1 j 0.224 + 1.0 m i_{j 18.1949^\circ} + 1.0 j 0.224 + 1.0 m i_{j 0.3176}$$

$$0.9301 j 0.2128 + 0.9541 m i_{j 0.2249} pu + 0.9541 m i_{j 12.8876} pu$$

**Problema P4.29:** En la ubicación de un interruptor y para una falla específica cerca del interruptor de un sistema de 60 Hz, el voltaje equivalente de Thevenin es 1.0 pu y la impedancia equivalente de Thevenin es

$Z = 0.004 + j0.12 pu$  sobre una base de 14.43 kV, 33.33 MVA.

Una falla en esta ubicación es interrumpida por el interruptor en 4.0 ciclos. Calcule el máximo posible valor rms de la corriente de falla en el momento de la interrupción.

**Solución:**

$$\tilde{I}_{sym} = \frac{1.0}{0.004 + j0.12} = 8.3287 e^{-j88.09^\circ} \text{ pu} = I e^{j\alpha}$$

$$I_{dc, max} = \sqrt{2} I e^{-\frac{R}{L} t} = 11.7786 e^{-12.5667 t}$$

$$I_{rms}(t) = \sqrt{I^2 + 2 I^2 e^{-\frac{2R}{L} t}} = \sqrt{69.3672 + 138.7354 e^{-25.1334 t}}$$

$$I_{rms}(t = \frac{4}{60} \text{ sec}) = 9.7642 \text{ pu}$$

$$I_{Base} = \frac{S_b}{V_b} = 2.3098 \text{ kA}$$

$$I_{rms}(t = \frac{4}{60} \text{ sec}) = 22.5531 \text{ kA}$$

**Problema P4.30:** Considere el sistema de energía eléctrica de la figura P4.30. Los parámetros de los distintos componentes del sistema se muestran en la figura. Considere una falla de línea a tierra en la fase A, lado de alto voltaje del transformador (ubicación F). Por lo tanto, la falla está prácticamente en el bus de 230 kV. Se supone que esta falla se borra abriendo el disyuntor del generador aproximadamente 6 ciclos (tiempo total) después del inicio de la falla. Para simplificar, suponga que los interruptores de línea están abiertos y, por lo tanto, no habrá contribución a la corriente de falla de las líneas de transmisión.

- Calcule el **valor rms máximo posible** de la corriente de falla en la ubicación F en el momento de la interrupción. Suponga que el transformador está sólidamente conectado a tierra, es decir,  $R = 0$ . Todos los valores de pu están en las respectivas calificaciones de los componentes.
- ¿Cuál es el **valor rms máximo posible** de la corriente de falla en el interruptor del generador en el momento de la interrupción (cualquier fase)?

**Insinuación:** Construya la red de secuencia pos, neg y cero en un sistema de pu común o en cantidades.

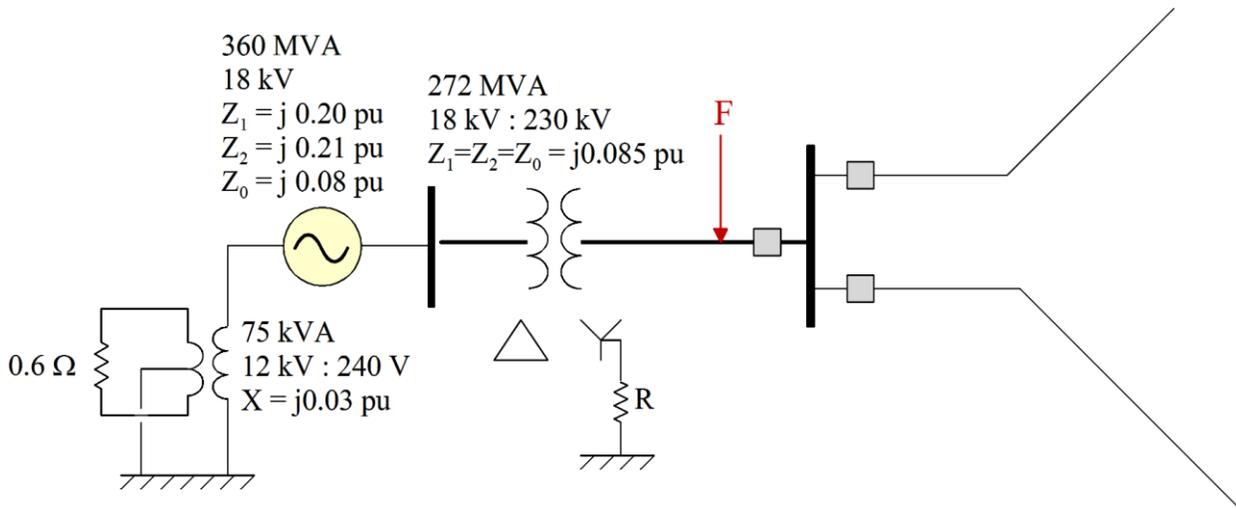
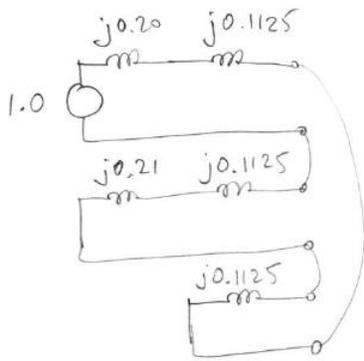


Figura P4.30

Solución:



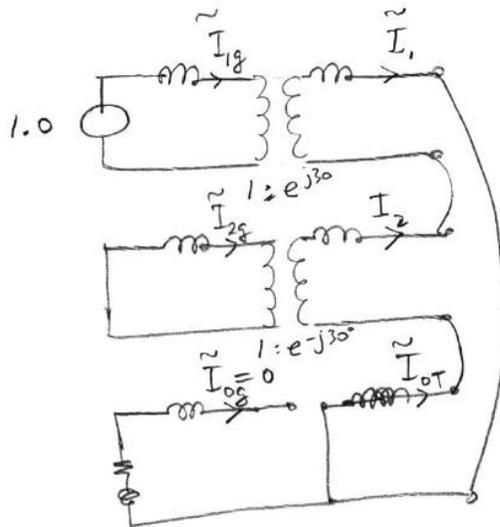
$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{1.0}{j0.7475} = -j1.3378 \text{ pu} \rightarrow -j1.2089 \text{ kA}$$

$$I_F = -j3.6268 \text{ kA}$$

$$I_{F_{max}} = 6.2818 \text{ kA}$$

Part (b) (Problem 1)

The following diagram is helpful in determining the fault current at the generator



The generator will experience pos and neg seq currents only. The phase currents are

$$\tilde{I}_a = \tilde{I}_{1g} + \tilde{I}_{2g}$$

$$\tilde{I}_b = a^2 \tilde{I}_{1g} + a \tilde{I}_{2g}$$

$$\tilde{I}_c = a \tilde{I}_{1g} + a^2 \tilde{I}_{2g}$$

Note that  $\tilde{I}_1 = \tilde{I}_2 = -j1.3378 \text{ pu} \Rightarrow \tilde{I}_{1g} = \tilde{I}_1 e^{j30}$ ,  $\tilde{I}_{2g} = \tilde{I}_2 e^{j30}$

$$\Rightarrow \tilde{I}_a = -j1.3378 \sqrt{3} \text{ pu}$$

$$\tilde{I}_b = 0$$

$$\tilde{I}_c = j1.3378 \sqrt{3} \text{ pu}$$

Offset will be same

$$I_{Fmax} = 4.0134 \text{ pu} \Rightarrow I_{Fmax} = 46.3428 \text{ kA}$$