

Tabla de contenido

De

AP Sakis Meliopoulos y George J. Cokkinides Retransmisión, teoría y aplicaciones del sistema de potencia

Capítulo 09	2
de la línea de transmisión	2
9.1 Introducción	2
9.2 Requisitos de protección de la línea de transmisión	3
9.3 Esquemas básicos de protección de línea	3
9.4 Protección del circuito de transmisión no piloto	5
9.4.1 Protección contra sobrecorriente direccional del circuito de transmisión	5
9.4.2 Protección de la distancia de la línea de transmisión	8
9.4.3 Elementos de relé de distancia para fallas de fase	8
9.4.4 Elementos de relé de distancia para fallas a tierra	12
9.4.5 Práctica típica para la protección de líneas	16
9.4.6 Discusión sobre la protección de distancia de línea no piloto	19
9.5 Relés de la línea de alimentación piloto	20
9.5.1 Medios de comunicación	21
9.5.2 Viaje	25
9.5.3 Lógica	25
9.6 Protección diferencial de línea	30
9.6.1 Protección diferencial del cable piloto	32
9.6.2 Protección diferencial de línea del plano alfa	32
9.7 Protección de líneas contra ondas progresivas	33
9.7 Protección de líneas mutuamente acopladas	36
9.8 Protección de líneas de transmisión compensadas en serie	46
9.9 Protección de líneas de terminales múltiples	47
9.9.1 Problemas en la alimentación	47
9.9.2 Problemas de alimentación de salida	48
9.10 Protección de los circuitos de transmisión UG	48
9.11 Protección sin ajuste de la línea de alimentación	49
9.12 Localización avanzada de fallas en líneas de transmisión	50
9.13 Resumen y conclusiones	56
9.14 Problemas	56

Capítulo 09

Protección de la línea de transmisión

9.1 Introducción

Este capítulo presenta esquemas de protección para líneas de transmisión. La mayoría de las líneas de transmisión son dos dispositivos terminales que están conectados a una red. Sin embargo, hay muchas líneas de terminales múltiples o líneas con tomas (cargas, subestaciones, etc.) a lo largo de la línea. Las líneas de transmisión pueden ser circuitos de cables aéreos o subterráneos (UG). En general, el flujo de energía en los circuitos de transmisión es bidireccional, es decir, a lo largo de un día, la dirección del flujo de energía puede cambiar.

Los parámetros que afectan las opciones, criterios y requisitos de protección (es decir, selección de funciones y configuraciones de protección) son: (a) la longitud del circuito, (b) la fuerza de la red conectada a cada uno de los terminales del circuito de transmisión expresada en términos de la corriente de falla disponible, y (c) si la línea está cerca de una unidad generadora o, en general, la importancia de la línea. El último caso normalmente requiere considerar la estabilidad del sistema, así como la estabilidad de las unidades generadoras cercanas en caso de una falla en la línea. En este caso, la limpieza de una falla en la línea debe coordinarse con la protección del (los) generador (es) y debe ser lo suficientemente rápida para evitar la inestabilidad de la (s) unidad (es) generadora (s). La estabilidad generacional se ha tratado en el Capítulo 8.

Examinaremos los esquemas de protección para circuitos de transmisión aéreos, así como circuitos de transmisión subterráneos (UG) (cables). Dependiendo de la importancia del circuito de transmisión, el esquema de protección puede ser simple o sofisticado y complicado, requiriendo comunicaciones entre los dos extremos de la línea, que normalmente están muy separados. En general clasificamos los esquemas de protección de los circuitos de transmisión como esquemas piloto y no piloto. Los esquemas no piloto emplean relés y los dos extremos del circuito sin comunicación entre ellos. Los esquemas piloto requieren comunicaciones entre los relés en los dos extremos del circuito. Examinaremos tecnologías piloto y no piloto que permiten esquemas de protección precisos, selectivos y rápidos. Las tecnologías recientes y especialmente las tecnologías de la comunicación (fibra) y la sincronización GPS han abierto el camino para métodos de protección más avanzados. Examinaremos estas tecnologías.

Existe un porcentaje sustancial de líneas de transmisión que pueden tener grifos o pueden tener tres o más terminales. También se examinarán los requisitos especiales para estas líneas.

La protección de los circuitos de transmisión suele ser diferente a la de los circuitos de distribución. En general, los circuitos de distribución (que operan típicamente a niveles de voltaje de hasta 35 kV) son radiales, es decir, la energía fluye en una sola dirección y tienen muchos componentes (cargas, condensadores, etc.) conectados a lo largo del circuito de distribución. Estas características dan como resultado una protección más sencilla

esquemas. El enfoque básico en el diseño de la protección del circuito de distribución asume que el circuito opera radialmente. Es importante señalar que hoy en día los recursos energéticos distribuidos (DER) son habituales en los circuitos de distribución (recursos propios del cliente, sistemas fotovoltaicos, sistemas de turbinas eólicas, generación de reserva, almacenamiento, microrredes, etc.) y están cambiando el paradigma de los circuitos de distribución radial. Los esquemas tradicionales de protección de circuitos de distribución pueden verse comprometidos a medida que aumenta la penetración de DER. Específicamente, ya no se puede garantizar el flujo de energía en una sola dirección. Está claro que son necesarios nuevos enfoques. Estos temas se discutirán en el Capítulo 10.

9.2 Requisitos de protección de la línea de transmisión

así como consideraciones de estabilidad) es posible que tengamos requisitos adicionales como que la falla debe ser despejada en menos de un cierto tiempo para evitar inestabilidades de generación o del sistema, fuerzas excesivas en las bobinas de transformadores o generadores cercanos, voltajes inseguros en equipos conectados a tierra y otros. En este capítulo, asumiremos que se dan estos requisitos adicionales.

Para un sistema de protección seguro, la línea no debe dispararse por fallas o condiciones anormales generadas por eventos fuera de la línea de transmisión, a menos que estas condiciones persistan debido a la falla del sistema de protección para los otros componentes. Por esta razón, la mayoría de los sistemas de protección para líneas de transmisión también están diseñados para proporcionar funciones de protección de respaldo para fallas que puedan ocurrir en componentes de energía vecinos en caso de que falle el sistema de protección para estos componentes.

9.3 Esquemas básicos de protección de línea

Los esquemas de protección para circuitos de transmisión pueden ser simples o bastante complicados dependiendo de la importancia del circuito. En general, el enfoque de protección para circuitos de transmisión puede basarse en relés que no se comunican con los otros relés en el otro terminal del circuito. Nos referimos a estos esquemas como esquemas de retransmisión no piloto. Los esquemas de protección no piloto incluyen sobrecorriente direccional (tiempo instantáneo o inverso), protección de distancia escalonada y varias opciones de estas funciones. Se pueden agregar comunicaciones entre los relés en los dos extremos (o múltiples extremos en el caso de múltiples líneas de terminales) para aumentar la confiabilidad (confiabilidad y seguridad) de los esquemas de protección, así como la capacidad de disparar la línea desde ambos extremos simultáneamente. Nos referimos a estos esquemas como retransmisión piloto. La retransmisión piloto puede incluir diferencial de línea y varios esquemas de retransmisión heredados que incluyen comparación de fases, disparos de transferencia directa, esquemas de bloqueo y otros. La retransmisión piloto utiliza varias tecnologías para comunicarse entre los terminales del circuito de transmisión. La figura 9.1 ilustra la protección típica

esquemas para un circuito de transmisión aérea de dos terminales que incluye funciones piloto y no piloto. Un sistema de protección similar se aplica a los circuitos de transmisión por cable UG. En general, un esquema de protección típico puede incluir una combinación de esquemas de protección de piloto y no piloto.

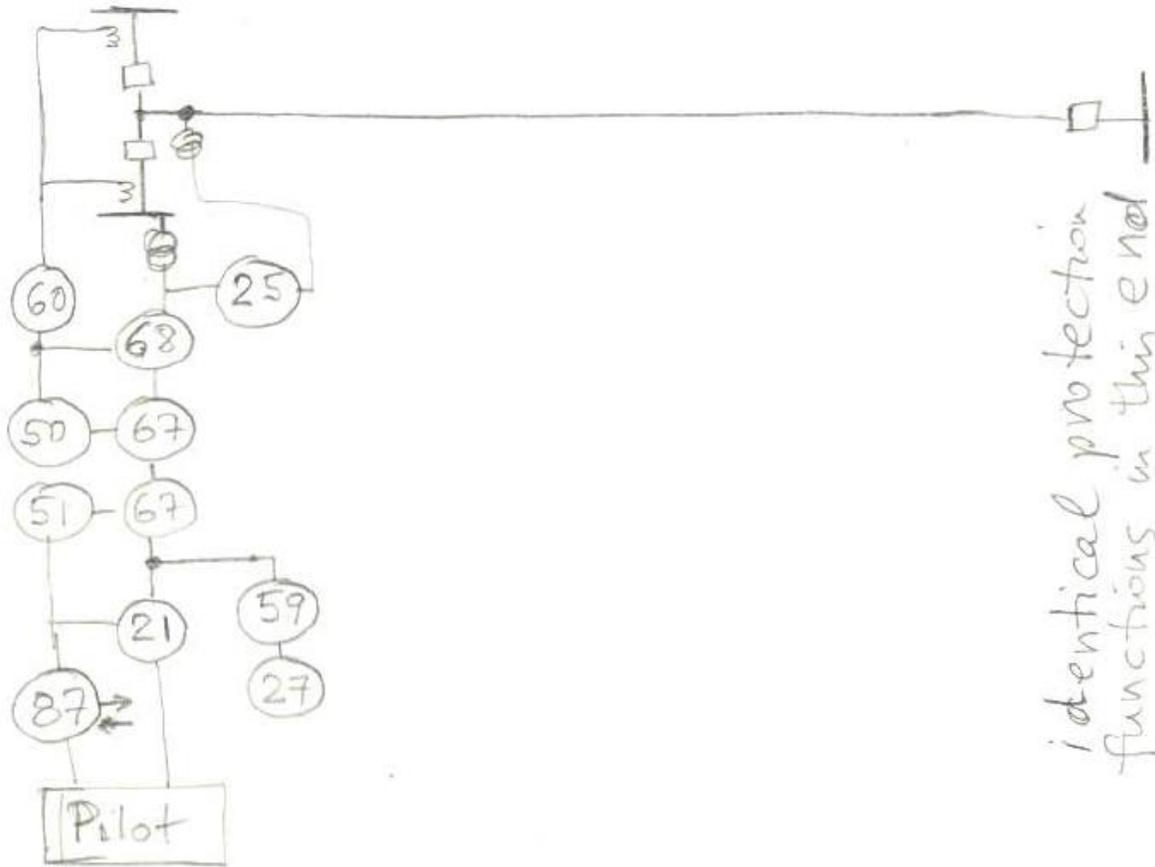


Figura 9.1: Esquema de protección típico para circuitos de transmisión aérea

Tenga en cuenta en las figuras anteriores que el circuito de transmisión está protegido para las siguientes condiciones:

1. Sobrecorriente instantánea direccional (50), (67)
2. Sobreintensidad de retardo de tiempo inverso direccional (51), (67)
3. Distancia (21)
4. Diferencial (87)
5. Relé de sincronización (25)
6. Relé de mínima tensión (27)
7. Relé de sobretensión (59)
8. Piloto

Proporcione un resumen de estas funciones.

9.4 Protección del circuito de transmisión no piloto

Los esquemas de protección no piloto se basan en relés que utilizan solo información local, es decir, la información que está disponible en los terminales del circuito donde están instalados. Los esquemas no piloto para circuitos de transmisión pueden incluir:

1. Sobrecorriente instantánea direccional
2. Sobrecorriente de retardo de tiempo inverso direccional
3. Distancia
4. Sincronización

A continuación se examinará la aplicación de estas funciones para la protección de circuitos de transmisión.

9.4.1 Protección de sobrecorriente direccional del circuito de transmisión

La protección contra sobrecorriente incluye retardo de tiempo instantáneo e inverso con elementos direccionales. Como siempre, el objetivo de estas funciones es eliminar una falla en la línea y no disparar por ninguna falla fuera de la línea. Sin embargo, dependiendo de los parámetros de la línea eléctrica, este esquema puede no ser tan selectivo como se desea. Por ejemplo, si la línea eléctrica es corta y el nivel de corriente de falla en los dos terminales de la línea eléctrica es aproximadamente igual, es posible que el relé de sobrecorriente direccional no pueda diferenciar entre una falla en la línea y una falla más allá de la línea. Además, a medida que cambian las configuraciones del sistema y las condiciones de funcionamiento (número de unidades generadoras en línea, etc.), los niveles de corriente de falla pueden cambiar, lo que dificulta la selección de los ajustes óptimos. En todo caso, Consideraremos el enfoque típico para seleccionar la configuración de estas funciones y luego discutiremos las ventajas y limitaciones. La configuración de estas funciones depende de muchos parámetros. En general, se aplicarán las siguientes reglas básicas.

Sobreintensidad de retardo de tiempo inverso direccional: La corriente de arranque de la sobrecorriente de tiempo inverso direccional debe ser mayor o aproximadamente el doble de la corriente de carga máxima del circuito. Esto proporcionará un margen de seguridad contra disparos en pequeñas sobrecorrientes y otros eventos que conduzcan a sobrecorrientes temporales. El retardo de tiempo debe seleccionarse de modo que proporcione tiempos razonables de eliminación de fallas a lo largo de todo el circuito.

Sobrecorriente instantánea direccional: La configuración de la sobrecorriente instantánea direccional debe establecerse de tal manera que funcione solo para fallas en la línea. Para determinar la configuración es necesario realizar un estudio integral de análisis de fallas, bajo diversas condiciones de la red eléctrica. El estudio debe determinar la máxima corriente de falla que el relé "verá" para fallas en la línea bajo protección y la máxima corriente de falla que el relé "verá" para fallas que están fuera de la zona de protección de la línea. La configuración del relé debe estar por encima de la última corriente máxima de falla y por debajo de la corriente máxima de falla para fallas en la línea. El estudio debe considerar todas las configuraciones y condiciones de operación posibles.

Cantidad de polarización por sobrecorriente direccional: La función direccional requiere una cantidad de polarización que normalmente es un voltaje que proporciona una referencia de fase confiable durante las condiciones de falla. El elemento direccional calcula el ángulo de fase de la corriente de falla

en relación con la cantidad de polarización para determinar la dirección del flujo de corriente. Debería ser evidente que si la cantidad de polarización (voltaje) colapsa o se vuelve muy pequeña durante la falla, el cálculo de la fase relativa tendrá grandes errores y puede conducir a un mal funcionamiento. Por esta razón, es importante seleccionar una cantidad de polarización que no colapse ni se vuelva muy pequeña durante las fallas. No es aconsejable utilizar el voltaje de la fase con falla como una cantidad de polarización. En general, la cantidad de polarización se selecciona para que sea una cantidad (voltaje o corriente) que no es la misma que la fase con falla. Para una falla de fase, una selección popular es el voltaje de línea a línea de las otras dos fases, por ejemplo, para comparar la corriente de falla de la fase A, el voltaje BC se usa como la cantidad de polarización. Figura 9.3 ilustra el cableado para la selección anterior. Para fallas a tierra, una selección popular de cantidad de polarización es el voltaje de secuencia negativa o el voltaje de secuencia cero; el voltaje de secuencia cero siempre se desplaza aproximadamente 90 grados desde la fase con falla a la corriente de tierra. La Figura 9.4 ilustra el cableado para esta selección.

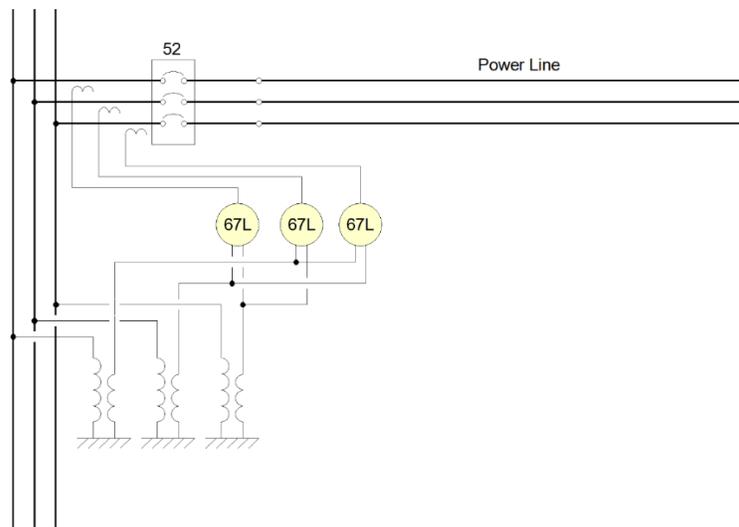


Figura 9.3: Voltaje de polarización habitual para fallas de línea direccional

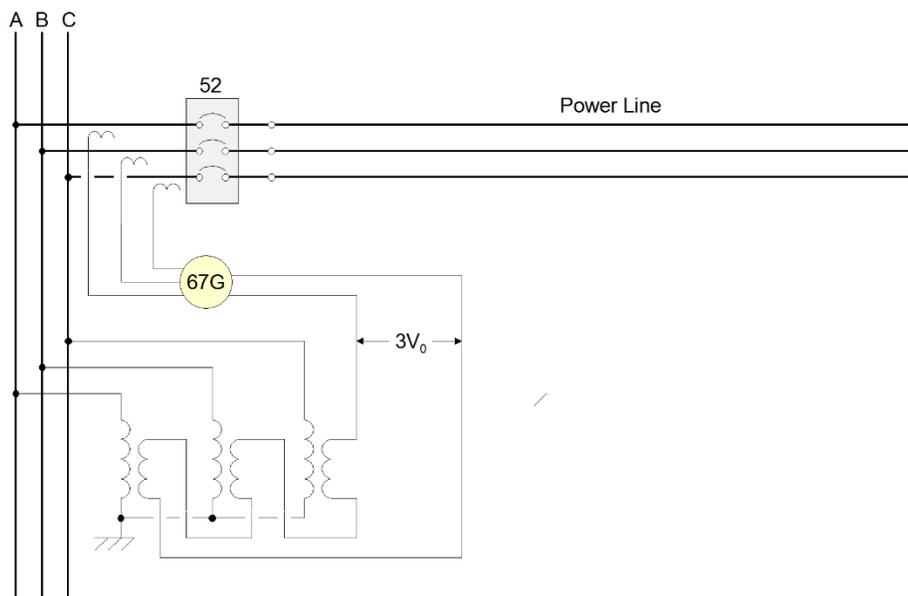


Figura 9.4: Un voltaje de polarización popular para fallas a tierra direccionales

Es importante reconocer que para la protección de la línea eléctrica, es una práctica típica utilizar un elemento direccional para supervisar la protección de sobrecorriente (instantánea y de tiempo) de modo que solo se disparen las fallas en la dirección de la línea eléctrica. También es importante reconocer que la protección contra sobrecorriente para líneas eléctricas no es tan segura como otros enfoques de protección para circuitos eléctricos que se discutirán más adelante. Por esta razón, en general, nos acercamos a la protección contra sobrecorriente para circuitos de potencia como una protección de respaldo en caso de que fallen los otros esquemas.

El procedimiento general de selección de la configuración de protección contra sobrecorriente para líneas eléctricas se ilustrará con un ejemplo.

Ejemplo E9.1: Considere el circuito de potencia de la figura E9.1. La figura ilustra dos líneas de transmisión, un terminal está conectado a una disposición de interruptor doble y el otro terminal está conectado a una disposición de interruptor recto. Las líneas tienen 25,6 (línea en el lado izquierdo) y 13,4 millas de largo respectivamente. El sistema restante se representa con su equivalente expresado en términos de las dos fuentes S1 y S2 y la línea equivalente se muestra con la línea discontinua.

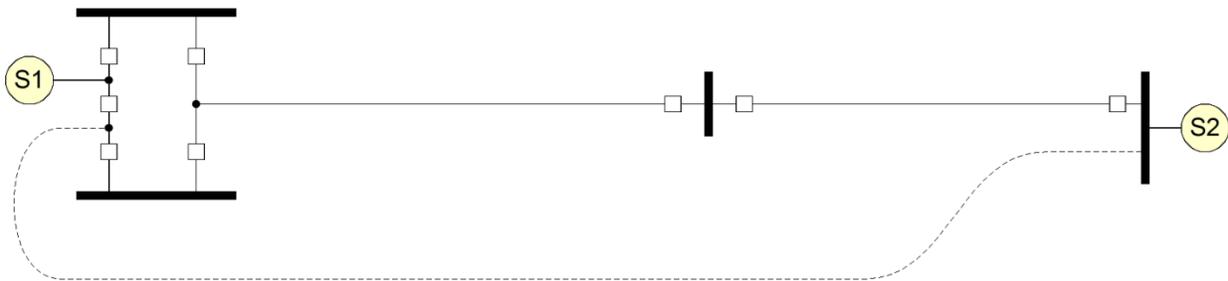


Figura E9.1: Ejemplo de sistema de transmisión de dos líneas eléctricas
Agregar otra fuente

Los parámetros de las fuentes y línea equivalente son:

Fuente S1: 115kV, $z_1 = j9.15 \text{ ohmios}$, $z_2 = j8.75 \text{ ohmios}$, $z_0 = j6.15 \text{ ohmios}$

Fuente S2: 115kV, $z_1 = j9.15 \text{ ohmios}$, $z_2 = j8.75 \text{ ohmios}$, $z_0 = j6.15 \text{ ohmios}$

Fuente S3: 115kV, $z_1 = j9.15 \text{ ohmios}$, $z_2 = j8.75 \text{ ohmios}$, $z_0 = j6.15 \text{ ohmios}$

Línea bajo protección: 115kV, 23.25 millas, $z_1 = j16.35 \text{ ohmios}$, $z_0 = j46.15 \text{ ohmios}$

Línea equivalente 1:

Línea equivalente 2

Para esta línea, seleccione las configuraciones de sobrecorriente instantánea (direccional) y sobrecorriente de retardo de tiempo inverso (direccional) y grafique los tiempos de disparo para (a) fallas línea a línea a lo largo de la longitud de las dos líneas, y (b) fallas de línea a tierra a lo largo de las dos líneas.

Solución: Primero se realiza un análisis completo de fallas.

continuará...

9.4.2 Protección de la distancia de la línea de transmisión

La retransmisión de distancia para líneas de transmisión proporciona un esquema de protección más seguro en comparación con los esquemas de protección basados en sobrecorriente direccional discutidos en la sección anterior. Los relés de distancia (relés mho modificados) se discutieron en el Capítulo 5. Simplemente se disparan cuando la impedancia que "ven" cae dentro de la característica del relé. Cuando se aplica a líneas de transmisión, dependiendo del tipo de falla, la impedancia equivalente por unidad de longitud puede variar. Por ejemplo, para una falla trifásica, la impedancia por unidad de longitud de la línea es igual a la impedancia de secuencia positiva de la línea. Para una sola línea a falla a tierra, el equivalente por unidad de impedancia es aproximadamente igual al promedio de la impedancia de secuencia positiva, negativa y cero de la línea.

Con el fin de estandarizar el diseño del relé de distancia para circuitos trifásicos, los relés deben estar diseñados para "ver" una impedancia equivalente que sea aproximadamente igual a la impedancia de secuencia positiva del circuito por unidad de longitud multiplicada por la distancia a la falla. Esto se logra fácilmente con relés numéricos proporcionando algoritmos apropiados. Para los relés electromecánicos, se pueden tener múltiples relés que determinarán la distancia a la falla para varios tipos de fallas y luego tendrán lógica para seleccionar la respuesta correcta. Discutiremos el diseño de un relé de distancia que utiliza dos tipos de relés de distancia para cubrir la mayoría de los tipos de fallas en un circuito.

9.4.3 Elementos de relé de distancia para fallas de fase

Los relés de distancia para fallas de fase están diseñados para que "vean" una impedancia aparente igual a la distancia a la falla multiplicada por la impedancia de secuencia positiva por unidad de longitud del circuito, es decir $Z = z_1$. para cualquier falla de fase en la línea, es decir, fallas trifásicas y fallas de línea a línea. Este objetivo se logra con el diseño de relés de la Figura 9.5. Tenga en cuenta que hay tres elementos, es decir tres relés y cada relé tiene tres bobinas, dos bobinas de corriente y una bobina de tensión. Las bobinas del primer relé se alimentan con las siguientes entradas: tensión $\tilde{V} \tilde{k}_1 V_a V_B$, Actual $I_{c, bobina,1} \tilde{k}_2 I_a$, y actual $Y_o \tilde{k}_2 y_o$ respectivamente. Las bobinas del segundo relé se suministran con el siguientes entradas: Voltaje $\tilde{V} \tilde{k}_1 V_B \tilde{V}_c$, Actual $I_{c, bobina,1} \tilde{k}_2 I_B$, y actual $\tilde{I}_{bobina, c,2} \tilde{k}_2 y_o$ respectivamente. Y las bobinas del tercer relé se alimentan con las siguientes entradas: voltaje $\tilde{V} \tilde{k}_1 \tilde{V}_c V_a$, Actual $I_{c, bobina,1} \tilde{k}_2 y_o$, y actual $Y_o \tilde{k}_2 y_o$ respectivamente.

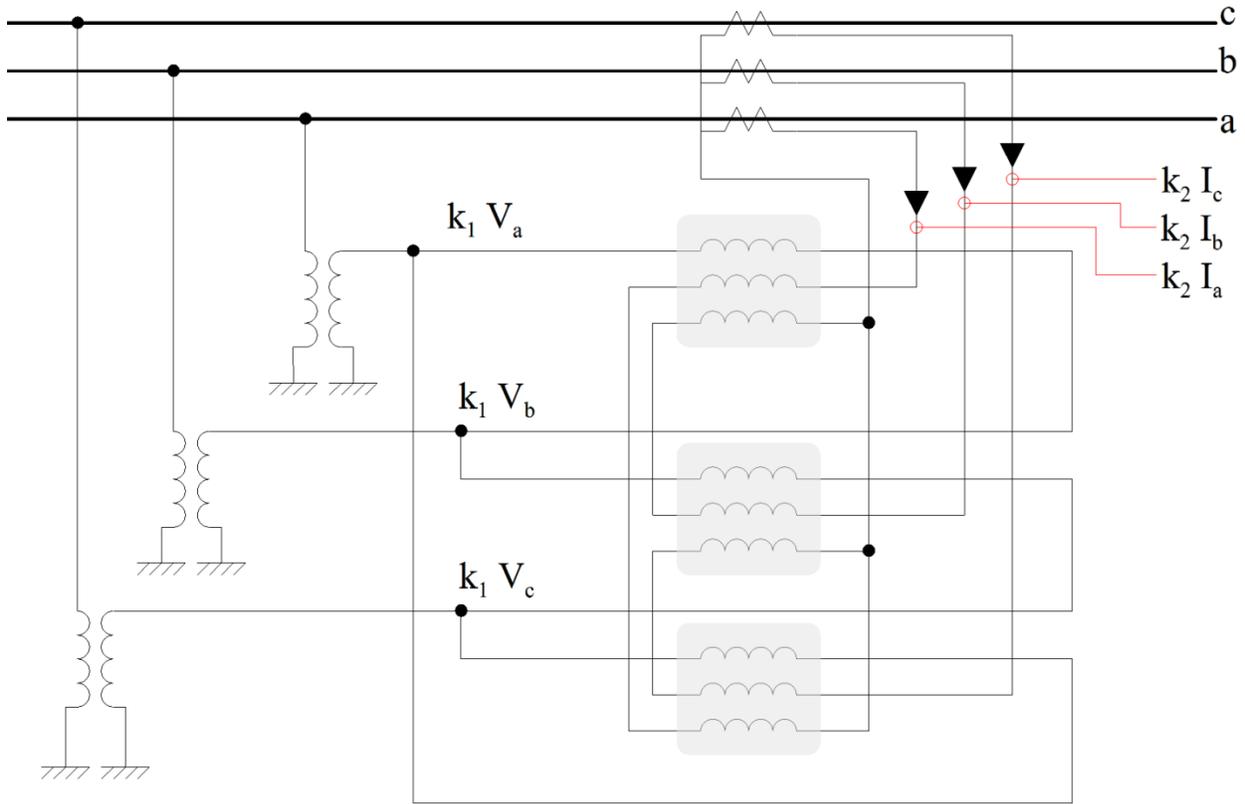


Figura 9.5: Relé de distancia trifásico para fallas de fase a fase
 (Indique la ubicación del disyuntor a la derecha de los TC)

Esta m eans tha tt él thr Los relés verán una impedancia que es proporcional a $\frac{k_1 (\tilde{V}_a \tilde{V}_b)}{k_2 (\tilde{I}_a \tilde{I}_b)}$

$\frac{k_1 (\tilde{V}_B \tilde{V}_C)}{k_2 (\tilde{I}_B \tilde{I}_C)}$ $\frac{k_1 (\tilde{V}_C \tilde{V}_a)}{k_2 (\tilde{I}_C \tilde{I}_a)}$ respectivamente. El examen del valor de estas impedancias durante

Las fallas trifásicas y las fallas de línea a línea se proporcionan a continuación. Como ejemplo, considere el relé 2. La figura 9.6 ilustra la implementación de impedancia modificada de este relé y las entradas en el relé.

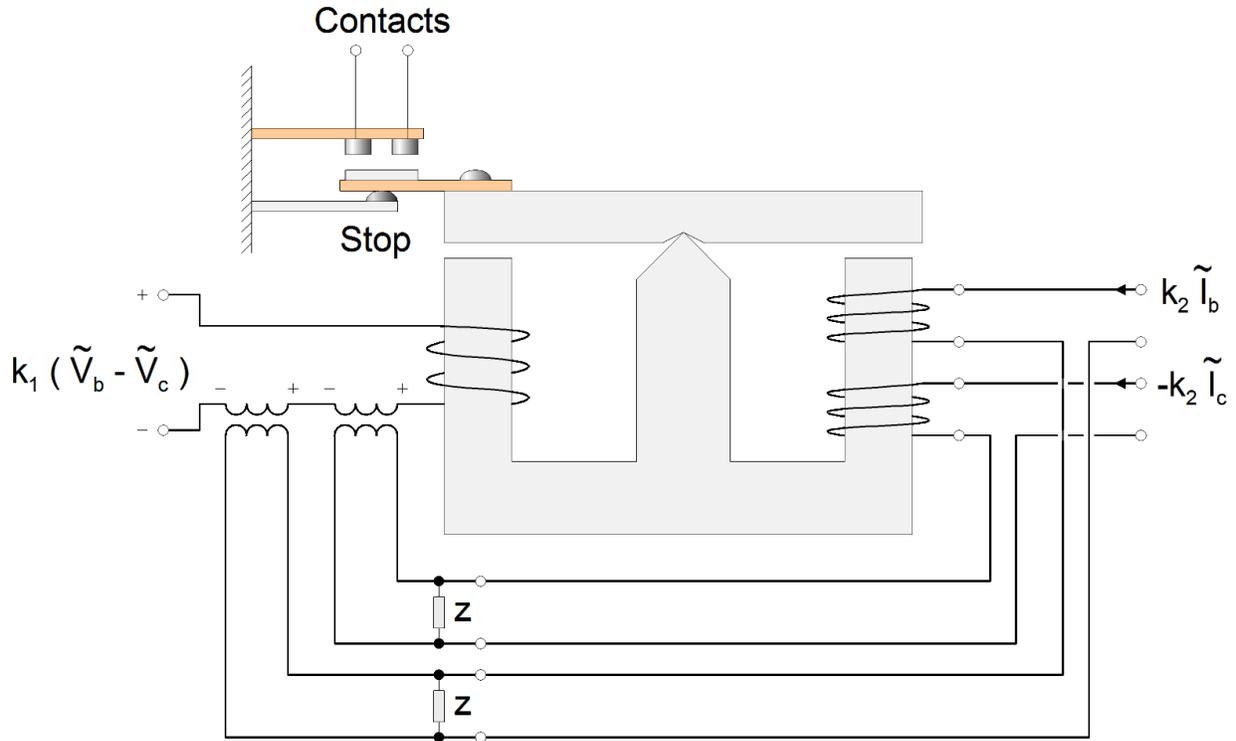


Figura 9.6: Implementación de la viga de equilibrio del relé 2 de la figura 9.5

Fallos trifásicos: Para una falla trifásica, y asumiendo de manera simplificada que la línea es simétrica, los tres relés verán las siguientes impedancias:

$$\text{Relé 1: } Z_{relé1} = \frac{k_1(\tilde{V}_a \tilde{V})_B}{k_2(Y_a I_B)} = \frac{k_1}{k_2} z$$

$$\text{Relé 2: } Z_{relé2} = \frac{k_1(\tilde{V}_B \tilde{V})}{k_2(Y_B \tilde{I}_C)} = \frac{k_1}{k_2} z$$

$$\text{Relé 3: } Z_{relé3} = \frac{k_1(\tilde{V}_C \tilde{V})}{k_2(\tilde{I}_C \tilde{I})_a} = \frac{k_1}{k_2} z$$

Fallos de línea a línea: Debemos considerar tres casos específicos: falla de fase A a fase B, falla de fase B a fase C y falla de fase C a fase A. Para evitar descripciones extensas, discutiremos el caso de una falla de Fase B a Fase C.

Falla de fase B a fase C: Para esta falla, los tres relés "verán" las siguientes impedancias:

$$\text{Relé 1: } z_{l_{\text{relé1}}} = \frac{k_1(\tilde{V}_a \tilde{V}_B)}{k_2(\tilde{I}_a \tilde{I}_B)}$$

$$\text{Relé 2: } Z_{relé2} = \frac{k_1(\tilde{V}_B \tilde{V}_C)}{k_2(I_B \tilde{I}_C)}$$

$$\text{Relé 3: } Z_{relé3} = \frac{k_1(\tilde{V}_C \tilde{V}_A)}{k_2(I_C \tilde{I}_A)}$$

Tras la sustitución de los voltajes y corrientes de fase con los voltajes y corrientes de secuencia (tenga en cuenta que en este caso, suponiendo que la línea es simétrica, el voltaje y corriente de secuencia cero será cero), y simplificando las expresiones:

$$\text{Relé 1: } Z_{relé1} = \frac{k_1(\tilde{V}_a \tilde{V}_b)}{k_2(\tilde{I}_a \tilde{I}_b)} = \frac{k_1}{k_2} \frac{1}{1} \frac{a^2 \tilde{V}_1}{a^2 \tilde{I}_1} \frac{1}{1} \frac{a \tilde{V}_2}{1 \tilde{I}_2} = \frac{k_1 \tilde{V}_1}{k_2 \tilde{I}_1} \frac{A \tilde{V}_2}{a \tilde{I}_2}$$

$$\text{Relé 2: } Z_{relé2} = \frac{k_1(\tilde{V}_B \tilde{V}_C)}{k_2(\tilde{I}_B \tilde{I}_C)} = \frac{k_1}{k_2} \frac{a^2}{a^2} \frac{u_{na} \tilde{V}_1}{u_{na} \tilde{I}_1} \frac{a}{a} \frac{u_{na} \tilde{V}_2}{a_2 \tilde{I}_2} = \frac{k_1 \tilde{V}_1}{k_2 \tilde{I}_1} \frac{\tilde{V}_2}{\tilde{I}_2}$$

$$\text{Relé 3: } Z_{relé3} = \frac{k_1(\tilde{V}_C \tilde{V}_A)}{k_2(\tilde{I}_C \tilde{I}_A)} = \frac{k_1}{k_2} \frac{1}{a} \frac{V \tilde{a}_2}{1 \tilde{I}_1} \frac{1}{a^2} \frac{\tilde{V}_2}{1 \tilde{I}_2} = \frac{k_1 \tilde{V}_1}{k_2 \tilde{I}_1} \frac{u_{na} \tilde{V}_2}{u_{na} \tilde{I}_2}$$

Considerando la secuencia de conexiones de red de la Figura 9.7, obtenemos:

Considere la secuencia de conexiones de red para una falla de Fase B a Fase C de la Figura 9.7.

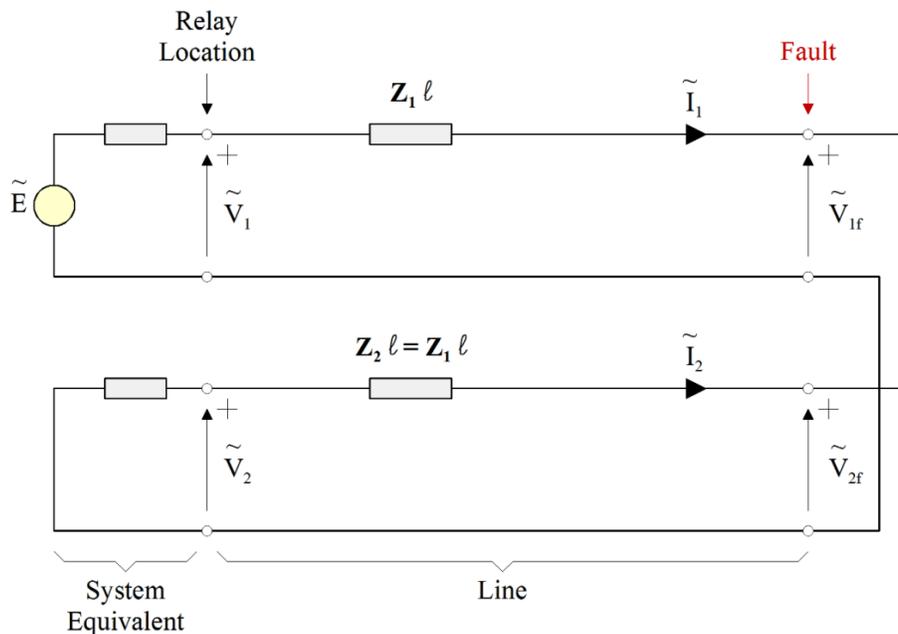


Figura 9.7: Red de secuencia equivalente para fallas de fase a fase

Tenga en cuenta que los siguientes son válidos:

$$\begin{aligned} \tilde{V}_1 &= z_1 \tilde{I}_1 + \tilde{V}_{1F} \\ \tilde{V}_2 &= z_1 \tilde{I}_2 + \tilde{V}_{2F} \\ \tilde{V}_{1F} &= \tilde{V}_{2F} \end{aligned}$$

Al sustituir en las ecuaciones la impedancia "vista" por los relés, se obtiene:

$$\text{Relé 1: } Z_{\text{relé1}} = \frac{k_1(\tilde{V}_a - \tilde{V})}{k_2(\tilde{I}_a - \tilde{I}_B)} = \frac{k_1(1 - a^2) \tilde{V}_1}{k_2(1 - un^2 y_0)} \frac{1}{1 - un y_0} \frac{una \tilde{V}_2}{k_2 \tilde{I}_1} \frac{A \tilde{V}_2}{a \tilde{I}_2} \frac{k_1 z_1}{k_2} \frac{k_1 \tilde{V}_{1F}}{k_2 \tilde{I}_1} \frac{A \tilde{V}_{2F}}{a \tilde{I}_2}$$

$$\text{Relé 2: } Z_{\text{relé2}} = \frac{k_1(\tilde{V}_B - \tilde{V})}{k_2(\tilde{I}_B - \tilde{I}_C)} = \frac{k_1 a^2 una \tilde{V}_1}{k_2 a^2 un y_0} \frac{\tilde{V}_1}{a} \frac{una \tilde{V}_2}{a^2 \tilde{I}_2} \frac{k_1 \tilde{V}_1}{k_2 \tilde{I}_1} \frac{\tilde{V}}{\tilde{I}_2} \frac{k_1}{k_2} Z$$

$$\text{Relé 3: } Z_{\text{relé3}} = \frac{k_1(\tilde{V}_C - \tilde{V}_a)}{k_2(\tilde{I}_C - \tilde{I}_a)} = \frac{k_1 a}{k_2} \frac{1 - \tilde{V}_1^2}{1 - \tilde{I}_2^2} \frac{a}{a} \frac{\tilde{V}}{\tilde{I}_2^2} \frac{k_1 \tilde{V}}{k_2 \tilde{I}_1} \frac{una \tilde{V}}{un y_0^2} \frac{k_1 z_1}{k_2} \frac{k_1 \tilde{V}_{1F}}{k_2 \tilde{I}_1} \frac{una^2 \tilde{V}_{2F}}{un y_0^2}$$

Se observa que la impedancia más pequeña será vista por el segundo relé (los otros términos que aparecen en los relés 1 y 3 son aditivos), por lo que el segundo relé proporcionará el valor más pequeño y es igual a la impedancia de secuencia positiva de la línea desde el relé hasta la ubicación de la falla.

Se pueden realizar análisis similares para otras fallas de línea a línea. Por ejemplo, para el caso de una falla de Fase A y Fase B, el primer relé "verá" el valor de impedancia más pequeño y será igual a la impedancia de secuencia positiva de la línea desde el relé hasta la ubicación de la falla.

9.4.4 Elementos de relé de distancia para fallas a tierra

Los relés de distancia para fallas a tierra están diseñados para que "vean" una impedancia aparente igual a la distancia a la falla multiplicada por la impedancia de secuencia positiva por unidad de longitud del circuito, es decir $Z = z_1$. para cualquier falla a tierra en la línea, es decir, fallas monofásicas a tierra, y fallas línea a línea a tierra. Este objetivo se logra con el diseño de relés de la Figura 9.8. Tenga en cuenta que hay tres elementos, es decir, tres relés y cada relé tiene tres bobinas, dos bobinas de corriente y una tensión.

Las bobinas del primer relé se alimentan con las siguientes entradas: tensión $\tilde{V} = k_1 \tilde{V}_a$, Actual $\tilde{I}_{c, \text{bobina,1}} = k_2 \tilde{I}_a$, y actual $\tilde{I}_{c, \text{bobina,2}} = k_2 \tilde{I}_a - \tilde{I}_B = \tilde{I}_C$, respectivamente. Las bobinas del segundo relé se alimentan con las siguientes entradas: tensión $\tilde{V} = k_1 \tilde{V}_B$, Actual $\tilde{I}_{c, \text{bobina,1}} = k_2 \tilde{I}_B$, y actual $\tilde{I}_{c, \text{bobina,2}} = k_2 \tilde{I}_a - \tilde{I}_B = \tilde{I}_C$, respectivamente. Y las bobinas del tercer relé se suministran con el siguientes entradas: voltaje $\tilde{V} = k_1 \tilde{V}_C$, Actual $\tilde{I}_{c, \text{bobina,1}} = k_2 \tilde{I}_C$, y actual $\tilde{I}_{c, \text{bobina,2}} = k_2 \tilde{I}_a - \tilde{I}_B = \tilde{I}_C$, respectivamente.

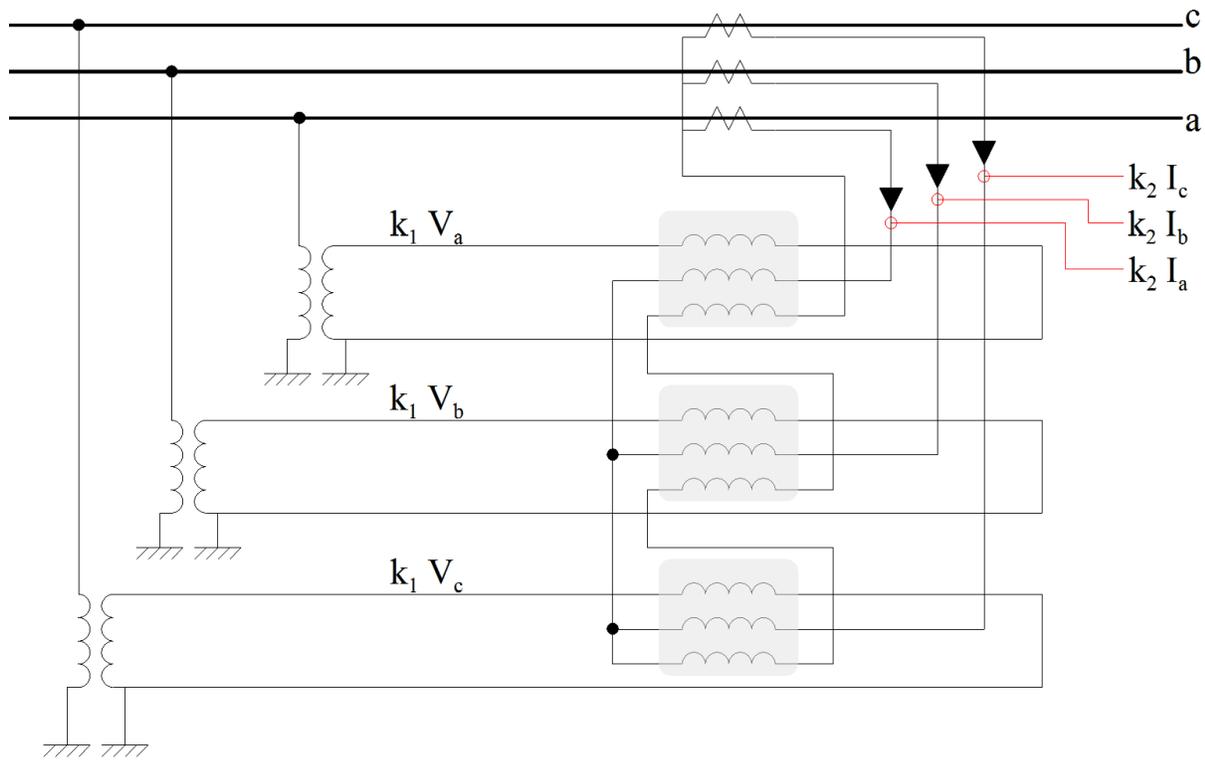


Figura 9.8: Relé de distancia trifásico para fallas de fase a tierra

(Indique la ubicación del disyuntor a la derecha de los TC)

Considere el primer relé de la figura 9.8. Las entradas a este relé son: $k_1 V_a, \tilde{k}_2 I_a, \tilde{k}_2 I_b, \tilde{k}_2 I_c$. Un
 La realización electromecánica de un relé de impedancia modificada se muestra en la Figura 9.x.

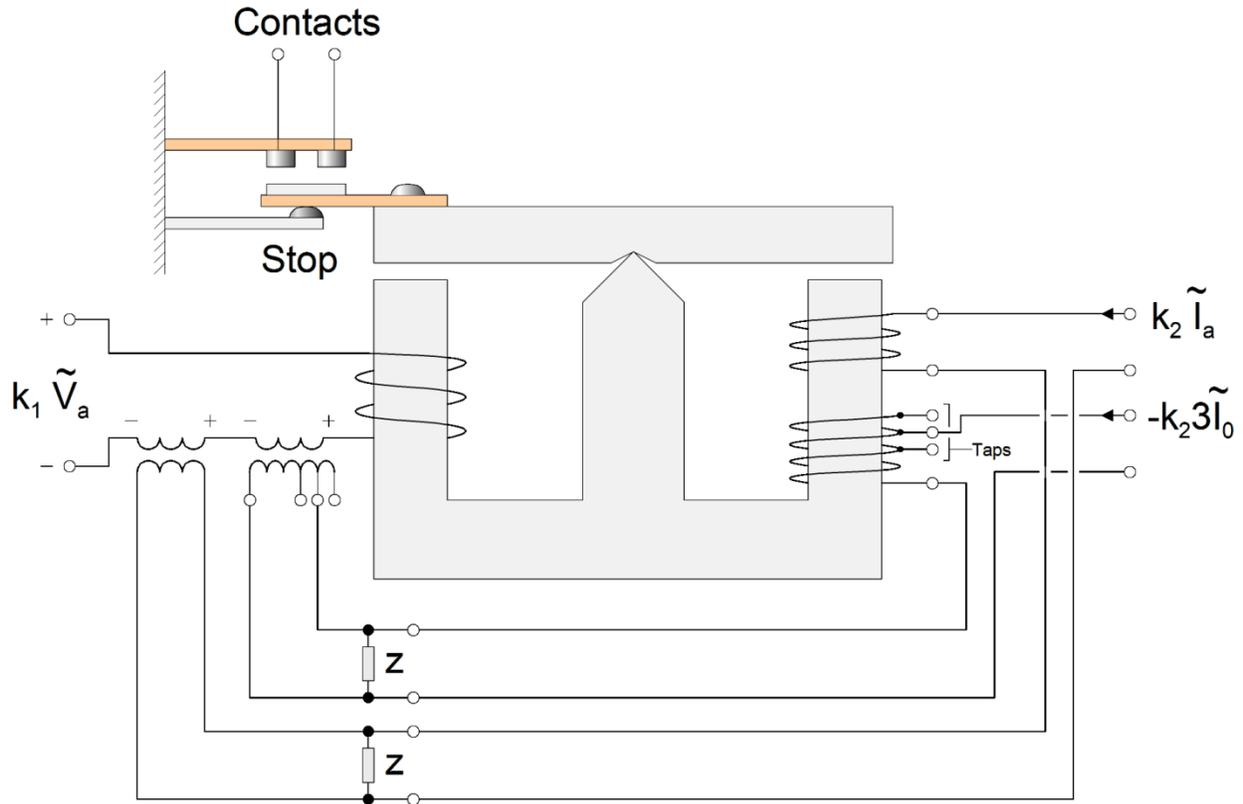


Figura 9.9: Implementación de la viga de equilibrio del relé 1 de la figura 9.8

Para una falla de fase A a tierra, el relé de fase A "verá" la siguiente impedancia:

$$\frac{k_1 \tilde{V}_a}{k_2 \tilde{I}_a} = \frac{k_1}{k_2} \frac{\tilde{V}_a}{\tilde{I}_a} = m \tilde{Z}_1$$

Mediante la selección apropiada de la constante m se puede demostrar que el relé "verá" una impedancia equivalente igual a la impedancia de secuencia positiva del circuito desde la ubicación del relé hasta la falla. Considere el circuito equivalente para una sola línea a tierra. La siguiente retención:

$$\tilde{V}_1 = z_1 \tilde{I}_1 + \tilde{V}_{1F}$$

$$\tilde{V}_2 = z_1 \tilde{I}_2 + \tilde{V}_{2F}$$

$$\tilde{V}_0 = z_0 \tilde{I}_0 + \tilde{V}_{0F}$$

Añadiendo todas las ecuaciones anteriores:

$$\tilde{V}_a = (2z_1 + z_0) \tilde{I}_1 + 3z_1 \tilde{I}_1 + (z_0 + z_1) \tilde{I}_0 + z_1 \tilde{I}_a + (z_0 + z_1) \tilde{I}_0$$

$$\frac{\tilde{V}_a}{\tilde{I}_a} = \frac{Z_0 + Z_1}{Z_1} \tilde{I}_0 \quad Z_1$$

Tenga en cuenta que al comparar la ecuación anterior con la anterior, para que el relé "vea" la impedancia de secuencia positiva, el factor m debe seleccionarse como:

$$m = \frac{Z_0 + Z_1}{Z_1}$$

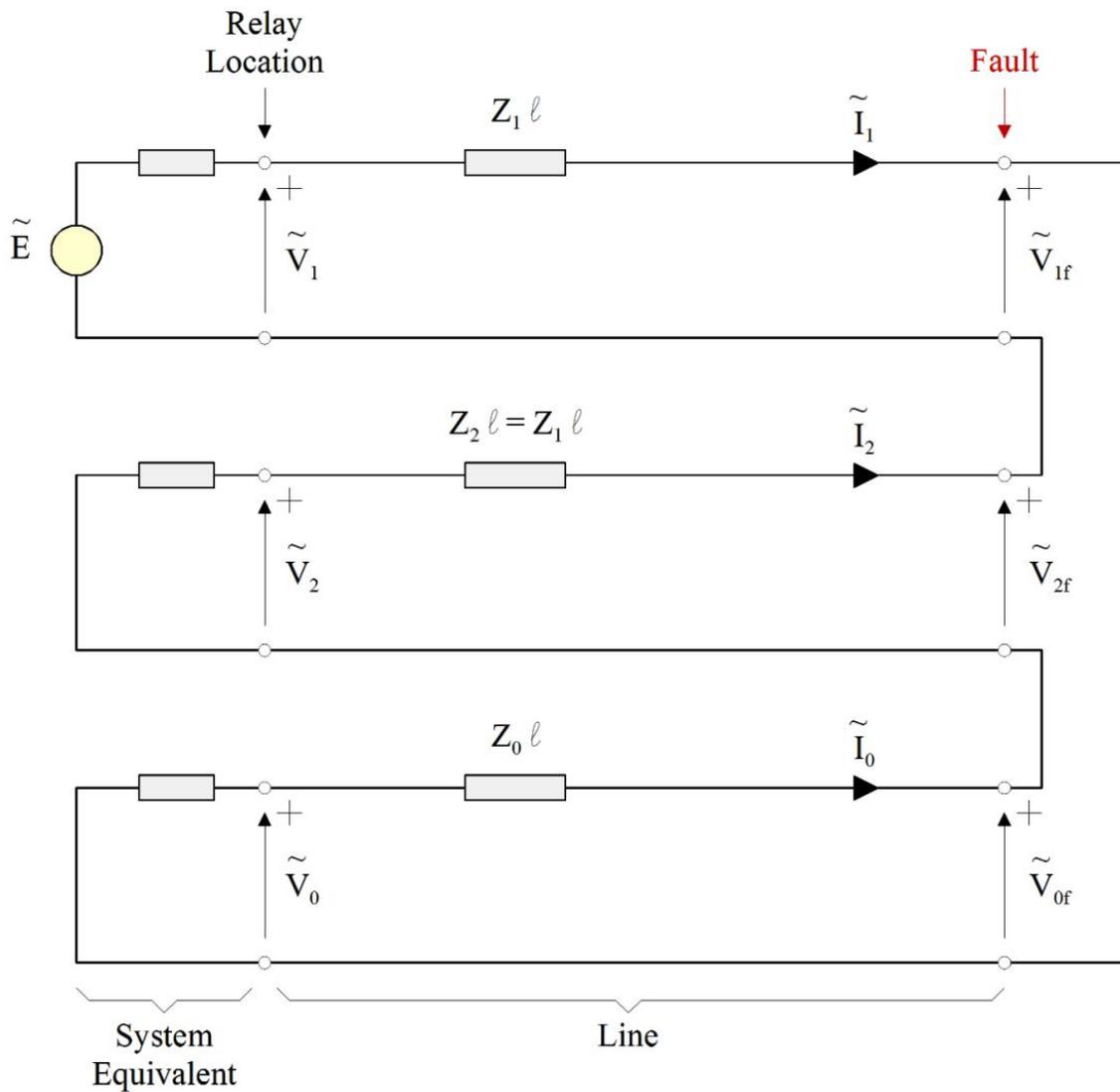


Figura 9.10: Red de secuencia equivalente para fallas de fase a tierra

La aplicación de los relés de distancia trifásicos descritos anteriormente cubrirá la mayoría de las fallas en una línea trifásica. En el caso de líneas en la misma torre / poste, pueden ocurrir tipos adicionales de fallas. En este caso, el rendimiento de los relés de distancia debe evaluarse cuidadosamente.

9.4.5 Práctica típica para la protección de líneas

El relé de distancia típico incluye las siguientes funciones: protección de distancia de línea y protección de distancia de tierra. Para cada una, normalmente se proporcionan tres zonas y algunos fabricantes también proporcionan zonas de protección adicionales (es decir, la zona 4). Discutiremos la práctica típica para las zonas 1, 2 y 3. Una práctica típica es establecer la zona 1 del relé de distancia en aproximadamente el 80% de la impedancia de la línea (es decir, para alcanzar el 80% de la longitud de la línea). Esta operación es rápida con solo un pequeño retraso (dos o tres ciclos) para evitar disparos en transitorios. Esta práctica permite la protección de la línea para la mayoría de las fallas a lo largo de la línea. La cifra del 80% se selecciona para asegurar que la operación de la zona 1 (que normalmente no tiene ningún retraso de tiempo apreciable) no opere en fallas más allá de la línea. En otras palabras, tenemos un margen de seguridad del 20%. La zona 2 se configura típicamente para alcanzar el 125% de la longitud de la línea. Los retrasos de tiempo son moderados en el orden de 10 a 20 ciclos para coordinarse con otros esquemas de disparo rápido. Y la zona 3 generalmente está configurada para alcanzar el 100% de la línea más el 150% de la siguiente línea. Los retrasos de tiempo para la zona 3 son típicamente 30 o más ciclos. Estas selecciones se ilustran en la Figura 9.11. Estas selecciones proporcionan protección de línea primaria (zona 1 y 2) así como protección de respaldo (zonas 2 y 3).

Las ventajas del esquema anterior son la simplicidad y la dependencia únicamente de la información local. Sin embargo, existen ciertas desventajas: (a) es posible y muy probable que los interruptores en los dos terminales de la línea no se disparen simultáneamente, especialmente si los relés en los dos terminales de la línea "ven" la falla en diferentes zonas, (b) es difícil aplicar este esquema en líneas con compensación de capacitores en serie, y (c) bajo ciertas condiciones, la impedancia de la línea "vista" por los relés puede entrar en la característica de la zona 3 - por ejemplo, una carga pesada del línea y posiblemente voltaje reducido. En este caso, el relé puede dispararse incluso si no hay ninguna falla en la línea. Nos referimos a este evento como "invasión de carga". Más adelante discutiremos los esquemas piloto que abordar algunos de estos problemas.

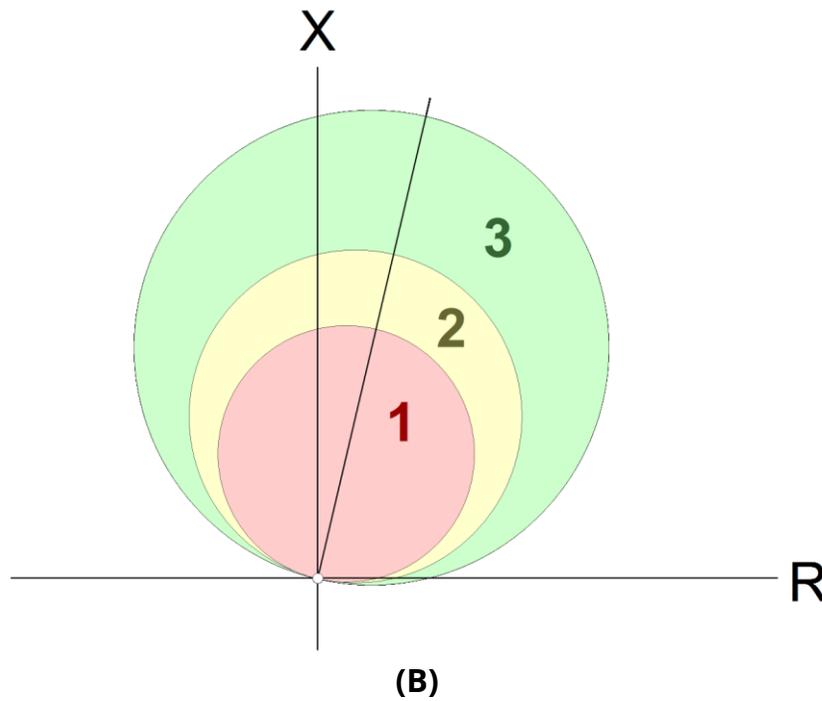
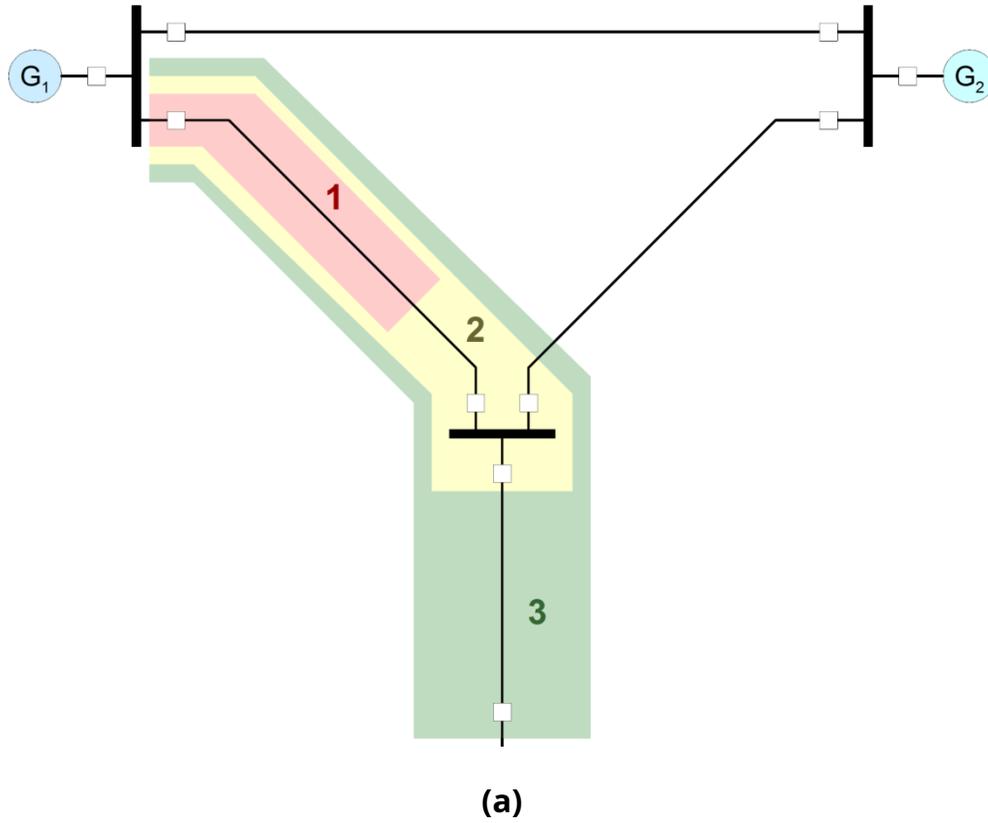


Figura 9.11: Ilustración de una aplicación típica de relé de distancia
 (a) Cobertura geográfica de las zonas
 (b) Característica del relé de las tres zonas

La aplicación de la retransmisión a distancia para líneas eléctricas se ilustrará con ejemplos.

Ejemplo E9.x. Se utiliza un relé de distancia para proteger una línea de transmisión de 115 kV con los siguientes parámetros:

$$Z_1 = 5.710 + j39.052 \text{ ohmios} \quad Z_2 = 5.710 + j39.052 \text{ ohmios} \quad Z_0 = 35.152 + j120.446 \text{ ohmios}$$

$$Z_1' = 87.1 + j12805.0 \text{ ohmios} \quad Z_2' = 2.871 + j12805.0 \text{ ohmios} \quad Z_0' = 17.757 + j20500.8 \text{ ohmios}$$

La línea es de 115 kV (LL), 53,5 millas de largo. La relación CT del relé de distancia es 2000: 5 y la relación PT es 69kV: 115V (el lado alto PT está conectado fase a tierra). La configuración del relé de distancia se establece para fallas a tierra, es decir, monitorea la tensión de fase a tierra y una corriente compensada igual a la corriente de fase más un factor m multiplicado por la corriente de secuencia cero.

Se desea configurar este relé para que alcance el 75% de la línea. Seleccione el factor de compensación m y el ajuste de impedancia del relé en ohmios (en el lado del relé NO en el lado de la línea). El factor de compensación debe redondearse al primer punto decimal y la configuración de impedancia debe redondearse a ohmios.

Solución: El factor de compensación es:

$$m = \frac{120.446 + 39.052}{39.052} = 2.0836 \quad \text{metro } 2.1$$

El ajuste de impedancia en el lado de la línea

$$Z_{\text{línea}} = (0.75) (5.71 + j39.052) = 4.28 + j29.29 \quad \text{ohmios}$$

El ajuste de impedancia en el lado del relé:

$$Z_{\text{relé}} = \frac{115}{2000} - Z_{\text{línea}} = \frac{69000}{5} - (0.644) (4.28 + j29.29) = 2.758 + j18.861 \text{ ohmios} \quad 19.06 \text{ m} \angle 81.9^\circ \text{ ohmios}$$

Seleccione: 19 ohmios a 80 grados.

Ejemplo E9.x. Considere el sistema de energía eléctrica de la Figura E9.1 y la línea de energía ilustrada. Se instala un relé de distancia en los terminales de la línea y se desea configurar la zona 1 del relé para alcanzar el 80% de la longitud de la línea. Las relaciones CT y PT son 3000: 5 y 69.000: 115 respectivamente. Seleccione la configuración del relé. Expresé la configuración en el lado del relé.

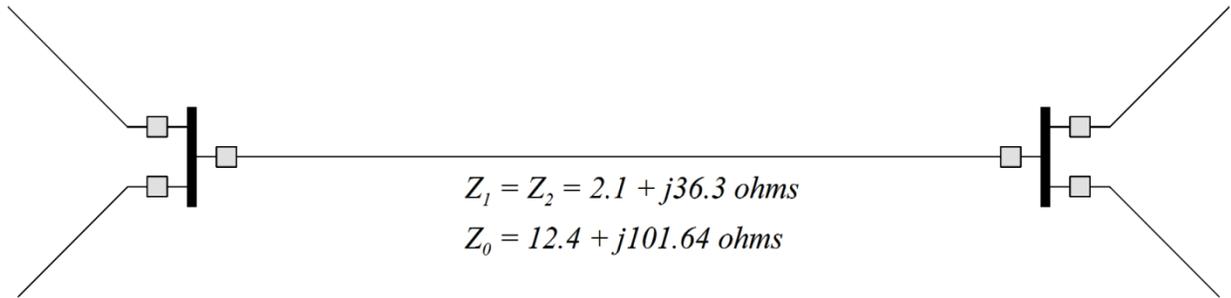


Figura E9.x: Una línea eléctrica

Solución: Para determinar la configuración del relé, es necesario calcular la impedancia de secuencia positiva de la línea, así como la impedancia de secuencia cero de la línea.

A completar.

Ejemplo E9.x: Considere una línea de 53,7 millas de largo protegida con relés de distancia en ambos extremos. A El relé de distancia está protegiendo esta línea. La Los TC y TT que alimentan este relé son: 2000: 5A, 86.000: 69V. Los ajustes del relé son:

$$Z_{\text{relé, zona1}} = 10.220 \text{ mi } j^{83.120} \text{ ohmios} \quad k = 1,95 \text{ mi } j^5 \quad \text{demora} : 0,03s$$

$$Z_{\text{relé, zona2}} = 17.252 \text{ mi } j^{83.120} \text{ ohm } s, \quad k = 1,95 \text{ mi } j^5 \quad \text{demora} : 0,15s$$

$$Z_{\text{relé, zona3}} = 25.204 \text{ mi } j^{83.120} \text{ ohmios} \quad k = 1,95 \text{ mi } j^5, \quad \text{demora} : 0,5s$$

(a) Suponga una falla de línea única a tierra en el punto A que se encuentra a 5.1 millas de la terminal T1 de la línea. Estime los tiempos de disparo de los dos interruptores CB1 y CB2. (tenga en cuenta que proporciona el circuito con los parámetros).

(b) Suponga una falla de línea única a tierra en el punto B que está ubicado a 16.2 millas de la terminal T1 de la línea. Estime los tiempos de disparo de los dos interruptores CB1 y CB2. (nota proporcionar circuito con parámetros).

Se proporciona el modelo WinIGS de esta línea y el sistema interconectado, archivo: [xxxxxxxxxxxx](#). Este ejemplo indica que con el relé de distancia podemos terminar permitiendo la falla en la línea durante mucho tiempo.

Solución: Primero se realizará un análisis de fallas para determinar qué “verán” los dos relés en los terminales de la línea.

9.4.6 Discusión sobre la protección de distancia de línea no piloto

La protección de distancia de línea es un esquema eficaz y selectivo para la protección de una línea de transmisión. Sin embargo, hay casos en los que puede que no brinde la protección requerida y con la velocidad deseable.

Discutimos una serie de casos que resultan en un retraso en el funcionamiento de la protección de distancia o en la falla de disparo. Los diversos esquemas de protección que se han descrito hasta ahora tienen dos

limitaciones cuando se aplican a las líneas de transmisión: (a) no son capaces de determinar con absoluta certeza que la falla está en la línea bajo protección y por lo tanto deben depender de la coordinación para el correcto despeje de la falla, y (b) carecen de la capacidad para eliminar la falla en una línea simultáneamente en los dos extremos de la línea. Debido a estas limitaciones, la detección y eliminación de fallas no puede ser rápida.

Caso 1: considere una falla de línea de alta impedancia. Es posible que el relé de distancia "vea" esta falla más allá de la zona 1 e incluso de la zona 2, en cuyo caso puede dispararse después de una larga demora o puede que nunca se dispare.

Caso 2: Los relés de distancia en los dos extremos "ven" la falla en diferentes zonas.

Los problemas discutidos anteriormente son limitaciones de la protección de distancia de línea. El resultado final es que depender únicamente de la protección de distancia sin piloto no puede lograr una detección rápida de fallas y un disparo de la línea simultáneamente desde los dos extremos.

Por las razones anteriores, se han desarrollado esquemas de relés piloto para permitir la detección rápida y confiable de fallas y el disparo de la línea. Estos esquemas se discutirán a continuación.

9.5 Relés de la línea de alimentación piloto

La retransmisión piloto puede verse como el esquema de protección diferencial del pobre. La retransmisión piloto requiere comunicación entre los relés en los terminales de la línea. En general, los esquemas de retransmisión piloto no envían información completa de un terminal a otro, sino información limitada o procesada, como es posible por la tecnología utilizada. La figura 9.12 ilustra el esquema de retransmisión piloto de una manera conceptual. Es importante señalar que los diversos esquemas de retransmisión piloto utilizan información diferente entre los dos extremos de la línea. En general, cualquier esquema de retransmisión piloto consta de tres componentes: (a) los medios de comunicación, (b) la información comunicada y la lógica utilizada para procesar esta información, y (c) la acción de disparo. Actualmente, las opciones utilizadas con respecto a estos tres componentes se muestran en la Tabla 9.x.



Figura 9.12: Retransmisión piloto - Disposición conceptual

Tabla 9.x: Medios de retransmisión piloto, opciones lógicas y de disparo

Medios de comunicación	Lógica	Viaje
Alambre piloto Línea telefónica (tonos de audio)	Direccional Fase	Viaje de transferencia Bloqueo

Portadora de línea eléctrica (30-300kHz) Microondas (2-12 GHz) Fibra óptica	Diferencial analógico Diferencial digital	Sincronizado
---	--	--------------

9.5.1 Medios de comunicación

Esta sección describe las diversas opciones para los medios de comunicación. Hay dos cuestiones: (a) la información que se comunicará y (b) los medios físicos que se utilizarán para la transmisión. Ambos se discutirán brevemente.

Mensajes de comunicación: En general, los esquemas de retransmisión piloto transmitirán información de un relé a otro relé. La información es típicamente un voltaje o corriente o ambos que son típicamente sinusoides, es decir

$$\sqrt{2}A \cos(\omega t + \phi)$$

Tenga en cuenta que un voltaje o una corriente pueden describirse en términos de tres variables, magnitud, frecuencia y fase.

Muchas veces, y con el fin de minimizar el costo, las corrientes y voltajes en el sistema trifásico se utilizan para formar una sola variable, típicamente una combinación lineal de las cantidades de secuencia positiva, negativa y cero. Como ejemplos, las Figuras 9.13, 9.14 y 9.15 ilustran tres sistemas diferentes, el primero ilustra la transmisión de una señal específica y la falta de la señal. Esto puede considerarse un sistema que envía solo dos piezas distintas de información: ENCENDIDO o APAGADO. Una desventaja obvia de este sistema es que cuando se transmite la señal de APAGADO, no hay forma de saber si la intención es enviar una señal de cero o si el sistema no funciona. El segundo sistema también envía solo dos piezas de información al cambiar a diferentes frecuencias. En general, nos referimos a estas frecuencias como "guardia" y "disparo". ya que podemos usar esta señal para simplemente verificar que el relé está en modo operativo o que el relé está comunicando que está bien para disparar. El tercer esquema proporciona información adicional modulando la señal transmitida. Con el la modulación activada puede enviar información adicional.

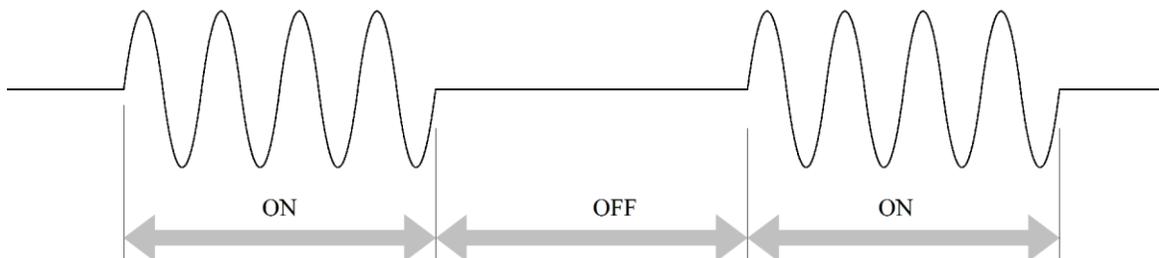


Figura 9.13 Señal de comunicaciones ON-OFF

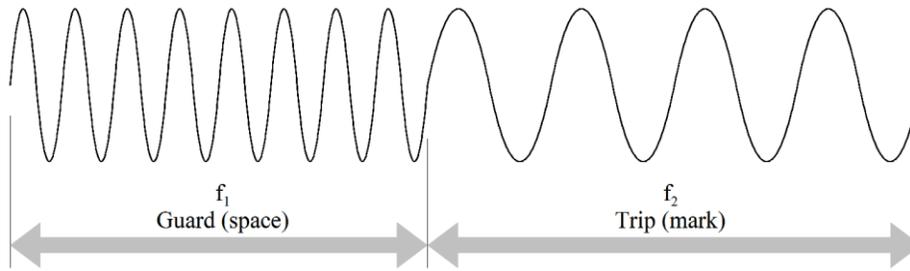


Figura 9.14 Señal de comunicaciones de protección / disparo (FSK: Modulación por desplazamiento de frecuencia)

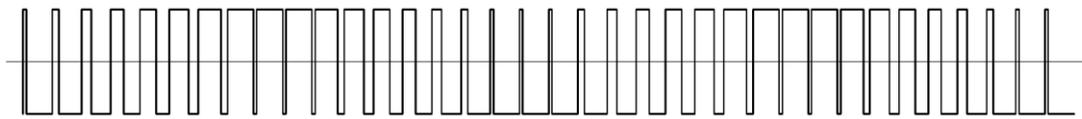


Figura 9.15: Señal de comunicación modulada por período de pulso

Alambre piloto: El cable piloto se utiliza para líneas cortas. Normalmente, se utiliza un cable de 15 kV debidamente blindado. El tamaño típico es # 19, par trenzado. Ancho de banda de 0 a 4 kHz. El hilo piloto transmite una señal analógica que es proporcional a la corriente eléctrica en la línea o proporcional a la corriente diferencial de la línea entre los dos terminales de la línea. Estas dos opciones, es decir, (a) el cable piloto transporta corrientes en condiciones normales de funcionamiento y (b) el cable piloto no transporta corriente, se muestran en las Figuras 9.16 y 9.17 respectivamente. Tenga en cuenta que la ventaja del enfoque del cable piloto es que la línea con falla se desconecta de la red mediante un disparo simultáneo de los interruptores en los dos extremos, ya que los dos relés verán la misma corriente de operación y corrientes de restricción.

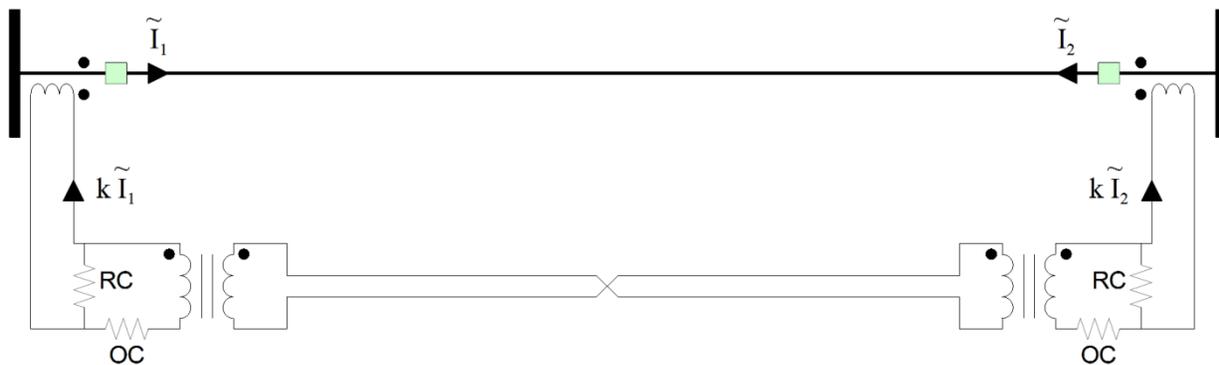


Figura 5.16: Esquema de disparo del sistema de cable piloto: el cable piloto no transporta corriente
En condiciones normales de funcionamiento

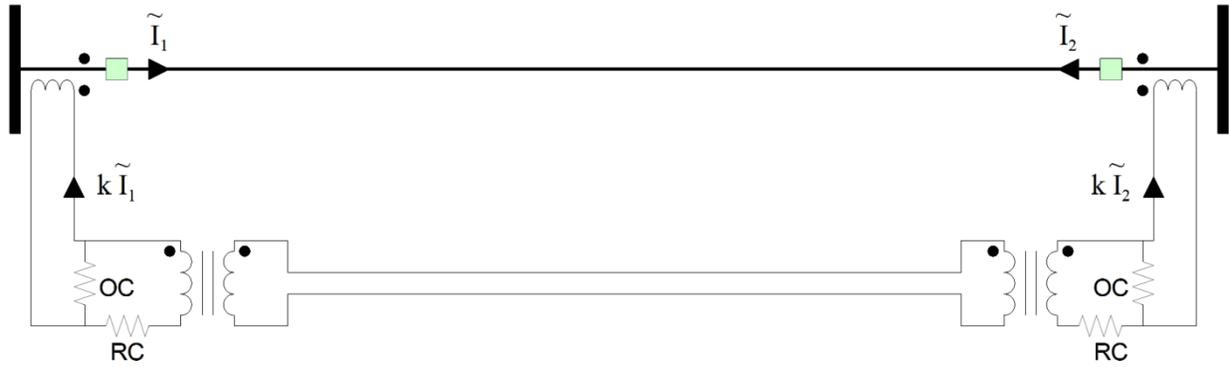


Figura 9.17: Esquema para bloquear el sistema de cable piloto: el cable piloto lleva corriente por debajo
Condiciones de funcionamiento normales

El cable piloto se usa típicamente para líneas relativamente cortas, por ejemplo, menos de 5 millas. Incluso para líneas de transmisión de corta longitud, se deben considerar los voltajes inducidos sustanciales a lo largo del cable piloto durante una falla. Un ejemplo ilustrará los niveles de los voltajes inducidos en los cables piloto.

El esquema deferente del cable piloto se aplica igualmente bien a dos terminales y líneas de terminales múltiples.

Ejemplo E9.x: Considere la línea eléctrica de la Figura E9.xy el cable piloto a lo largo de la línea. El hilo piloto está conectado a tierra como se indica en la figura. Suponga una falla monofásica a tierra en el punto A de la línea.

- Calcule el voltaje inducido en el cable piloto.
- Suponga que se coloca un transformador neutralizador en la ubicación B. Calcule los voltajes inducidos en el cable piloto.
- Suponga un reactor de drenaje mutuo instalado en la ubicación C y conectado a tierra como se indica en la figura. Calcule el voltaje de transferencia máximo en el cable piloto.

Solución: El modelo WinIGS para este sistema se muestra en la Figura E9.xa.

A completar.

Portador de línea eléctrica: El portador de la línea eléctrica utiliza los conductores de energía para transmitir información. Para confinar la información en la línea bajo protección, se utilizan trampas de ondas, condensadores de acoplamiento y reactancias de RF. En la figura 9.18 se muestra una disposición típica. En la Figura 9.19 se muestra una fotografía de una instalación típica. La frecuencia de las señales utilizadas está en el rango de 50 a 490 kHz. La potencia típica es de 10 vatios, lo que es bueno para distancias de hasta 100 millas. Para distancias más largas se utilizan transmisores de 100 Watts. Por lo general, solo se usa un ancho de banda de 4 kHz para protección.

El portador de línea eléctrica se utiliza en varias configuraciones. Lo más común es equipar solo una fase con una trampa de ondas, un condensador de acoplamiento y un inductor de RF. En este caso, normalmente se utiliza la fase intermedia, ya que es más probable que la fase intermedia experimente la menor probabilidad de una falla en esa fase. Sin embargo, existen sistemas que utilizan dos fases para una mayor confiabilidad, como el que se muestra en la Figura 9.19. También hay sistemas que utilizan las tres fases.

Discuta los problemas de transmisión cuando ocurre una falla en el conductor de fase utilizado para transmisión.

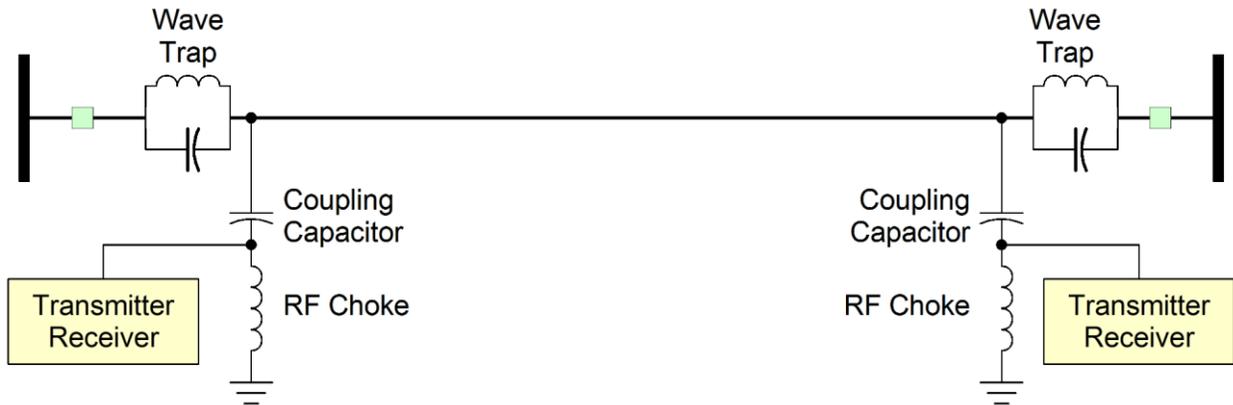


Figura 9.18: Ilustración del sistema portador de línea eléctrica



Figura 9.19: Sistema portador de línea en 500 kV con dos fases
(Cortesía de TVA)

Microonda: Opera en frecuencias de 150 MHz a 20 GHz. Necesita trayectoria de "visión óptica". Proporciona muchos canales de 4 kHz. La capacidad extra se utiliza para otras comunicaciones. Se utiliza cuando se requiere la transmisión de datos.

Fibra óptica: Este se está convirtiendo en el enlace de comunicación preferido. Proporciona varios miles de canales de comunicación de 4 kHz. La capacidad adicional se utiliza para otras comunicaciones y se puede alquilar para obtener ingresos adicionales. Se han utilizado varias implementaciones diferentes. Actualmente, el uso de alambre blindado compuesto se ha convertido en el estándar. Se utiliza cuando se requiere la transmisión de datos.

9.5.2 Viaje

Esta sección describe las diversas opciones para generar la señal de disparo del relé.

Disparar versus bloquear: La retransmisión piloto se clasifica como *sistema de viaje de transferencia* si es necesaria una señal de comunicación para el disparo. Un sistema de bloqueo es aquel en el que la presencia de una señal transmitida evita el disparo del interruptor.

La opción seleccionada depende de la selección de los medios de comunicación y la confiabilidad del canal de comunicación. Como ejemplo, considere el uso de PLC. En este caso, una falla en la línea puede afectar el canal de comunicación. Será preferible un esquema de bloqueo.

Por redundancia, se pueden utilizar dos sistemas. En este caso, uno puede ser un viaje de transferencia y el otro un bloqueo.

El viaje de transferencia puede ser (a) directo, (b) permisivo o (c) redundante.

9.5.3 Lógica

Esta sección describe las diversas opciones para transmitir lógica.

Bloqueo de comparación direccional: El principio fundamental de este esquema es el siguiente: la dirección de la falla se puede determinar fácilmente en cualquier terminal mediante relés de distancia o por sobrecorriente. La señal de bloqueo se transmite solo cuando ocurre una falla en un dirección en extremo inverso. El esquema se ilustra en la Figura 9.20.

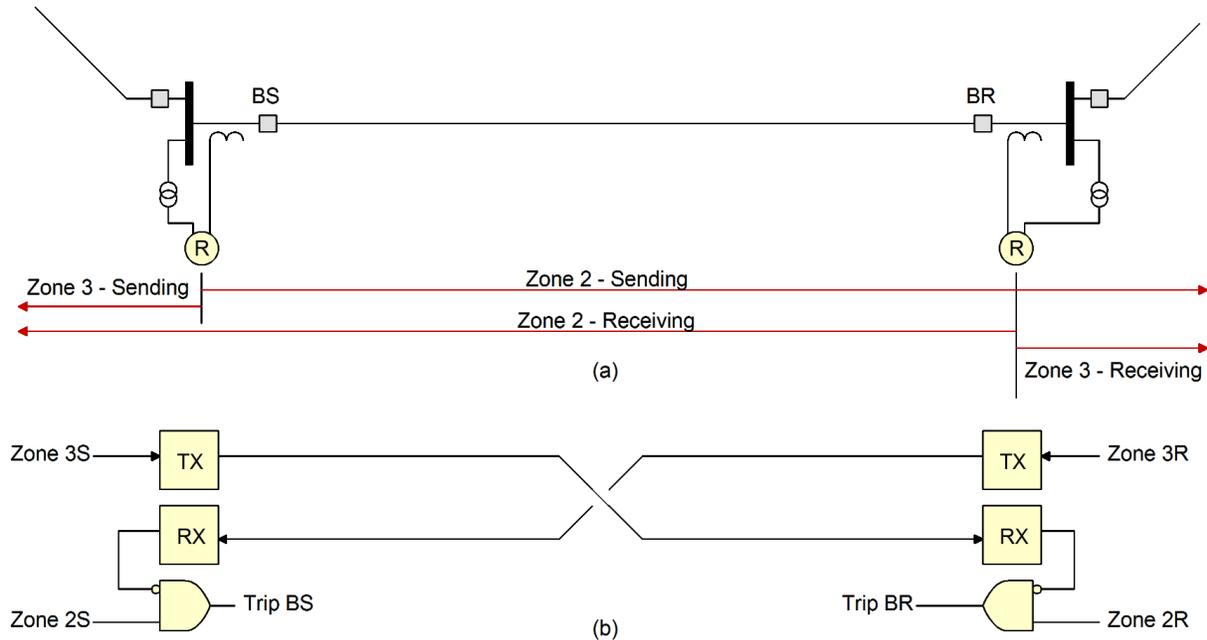


Figura 9.20: Esquema básico de bloqueo de comparación direccional (DCB)

El esquema se puede implementar con una variedad de relés, se ha mencionado que se pueden usar relés de distancia o relés de sobrecorriente direccionales. En caso de relés mho: configure el relé de avance entre el 175% y el 200% de la línea. Configure el relé de retroceso de 125% a 160%.

Ejemplo E9.x: Considere el sistema de energía eléctrica de la Figura E5.x. Determine la configuración para la protección de la línea 10-20.

A completar

Desbloqueo de comparación direccional: El principio fundamental de este esquema es: Durante las condiciones normales de funcionamiento, envíe una señal de bloqueo de diferente frecuencia. La presencia de esta señal indica que el equipo está funcionando.

Ejemplo E9.x: Considere el sistema de energía eléctrica simplificado de la Figura E5.x. Determine la configuración para la protección de la línea 10-20.

A completar

Viaje de transferencia directo por debajo del alcance: El principio fundamental de este esquema es: Si se detecta una falla en la línea que se va a proteger (zona 1 por debajo del alcance, típicamente el 80% de la longitud de la línea), la línea se dispara sin demora intencional. Requiere un canal de comunicación independiente de la línea a proteger.

El esquema se puede implementar con: una señal de guarda que cambia la frecuencia para el disparo. La frecuencia de guarda monitorea la integridad del canal de comunicación.

Configuraciones típicas: uso de un relé de distancia y configúrelo para el 80% de la longitud de la línea.

Si la línea es demasiado corta, es posible que este esquema no funcione bien.

Ejemplo E9.x: Considere el sistema de energía eléctrica simplificado de la Figura E5.x. Determine la configuración para la protección de la línea 10-20. El viaje de transferencia puede ser (a) directo, (b) permisivo o (c) redundante.

A completar

Problemas con el canal de comunicación:

- (a) integridad del canal
- (b) ruido
- (c) retrasos

Disparo de transferencia de alcance excesivo permisivo (POTT): El principio fundamental de este esquema es: Utilice relés de sobrealcance de distancia y disparo de transferencia de diferente frecuencia para cada extremo. La falla en la línea será detectada por ambos relés en la dirección de avance. El término permisivo indica en general que se necesita la cooperación de dos o más relés para la acción de disparo. La lógica básica de este esquema se muestra en la Figura 9.21.

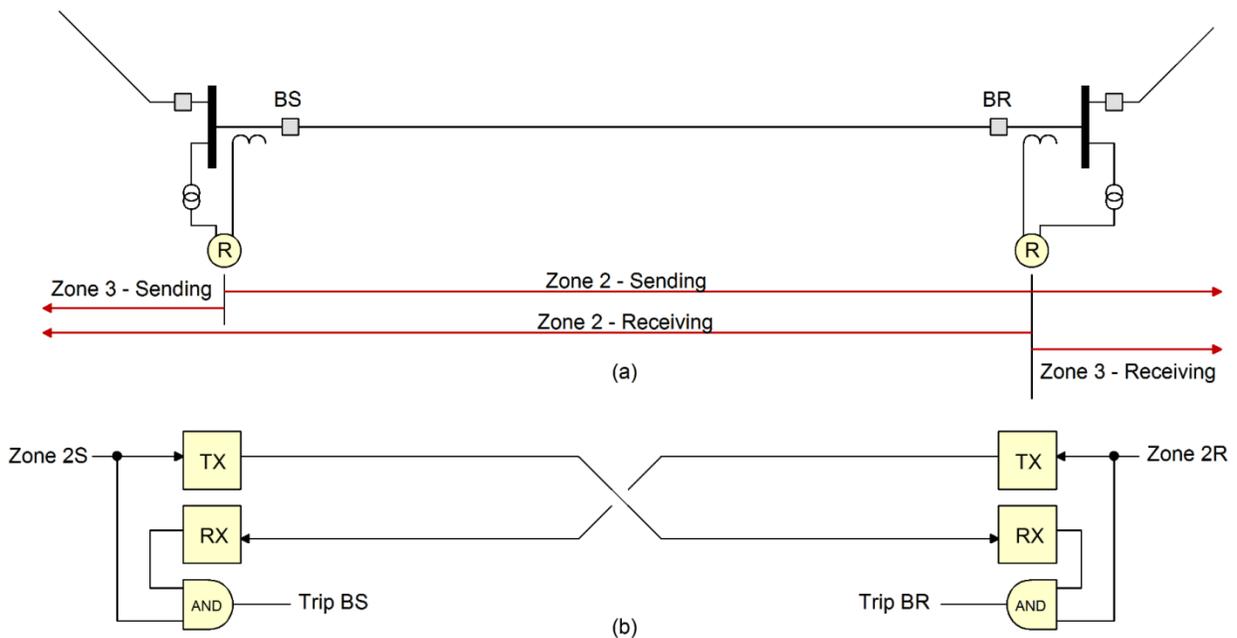


Figura 9.21: Esquema de Disparo de Transferencia de Sobrealcance Permisivo Básico (POTT)

El esquema se puede implementar con: Configuraciones de distancia típicas: 150% de impedancia de línea.

Ejemplo E9.x: Considere el sistema de energía eléctrica simplificado de la Figura E5.x. Determine la configuración para la protección de la línea 10-20.

Solución: Para el esquema POTT, seleccionaremos un ajuste del 150% de la impedancia de línea.

A completar

Ejemplo E9.x: Una línea de transmisión tiene una impedancia de secuencia cero que es 3,5 veces su impedancia de secuencia positiva. Calcule el exceso de alcance recomendado para el esquema POTT.

Solución: La impedancia vista por el relé para una falla monofásica a tierra al final de la línea será:

$$Z = \frac{z_1 + z_2 + z_0}{3} = \frac{2z_1 + 3,5z_1}{3} = 1,83z_1$$

o 183% de la impedancia de línea. Por lo tanto, para llegar al final de la línea para fallas monofásicas, seleccione un ajuste de 190% o 200%.

Disparo de transferencia de alcance inferior permisivo (PUTT): El principio fundamental de este esquema es: Utilice un relé de alcance insuficiente y uno de alcance excesivo en ambos extremos. El relé de sobrealcance realiza la función permisiva. El relé de alcance insuficiente inicia un viaje de transferencia.

El relé se dispara cuando el relé de sobrealcance "ve" la falla (función permisiva) y se ha recibido un disparo de transferencia. Tenga en cuenta que el esquema requiere dos relés en cada extremo. El circuito de control se muestra a continuación.

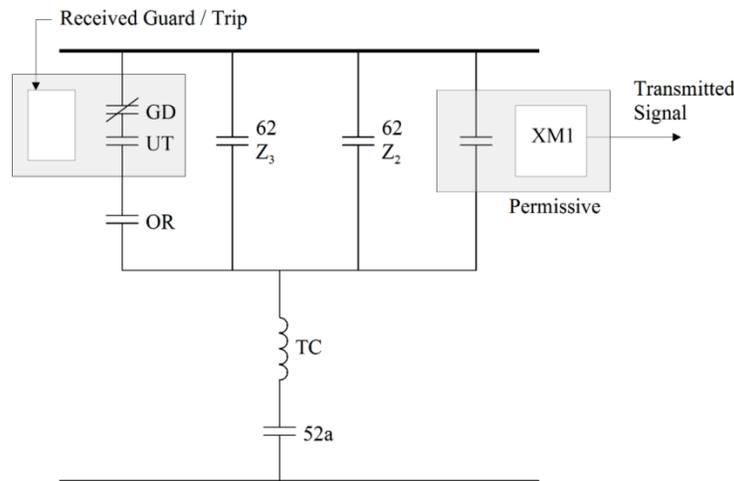


Figura 9.22: Circuito de control de un relé de disparo de transferencia de subalcance permisivo

Ejemplo E9.x: Considere el sistema de energía eléctrica simplificado de la Figura E5.x. Determina el ajustes para la protección de la línea 10-20.

A completar

Comparación de fases: El principio fundamental de este esquema es: Si las corrientes en ambos extremos están en fase, la falla está en la línea a proteger. Si la falla es externa, las corrientes están desfasadas 180 grados.

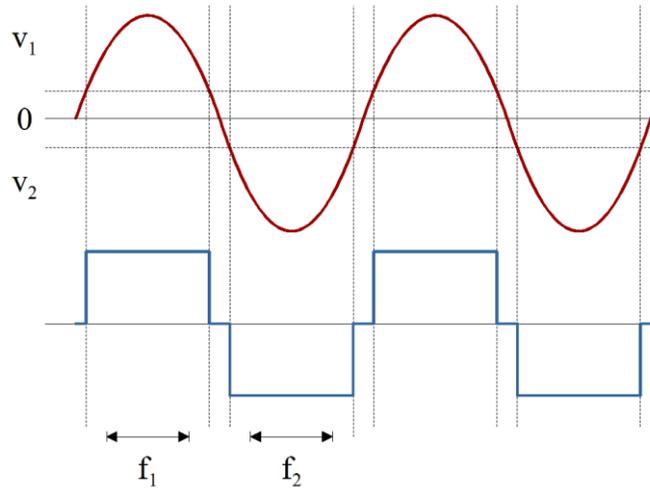


Figura 9.23: Generación de señales de comparación de fases

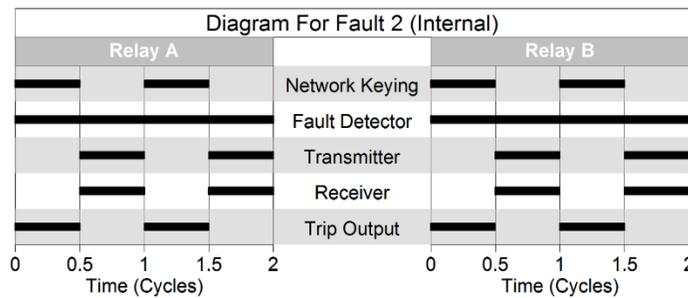
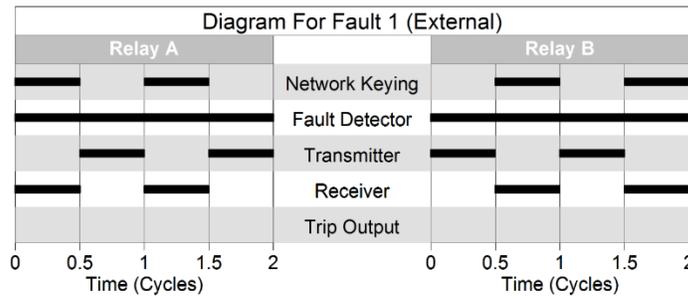
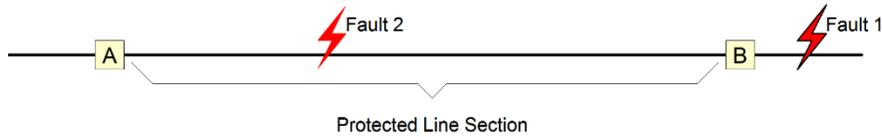


Figura 9.24: Ejemplo de protección de línea de comparación de fases

El esquema se puede implementar con: Se envía una señal de cierta frecuencia durante el semiciclo positivo de la corriente. (o se envía una señal para ambos semiciclos de diferente frecuencia). En realidad, la relación de fase no es exactamente de 180 grados. Genera ejemplos.

La implementación puede ser con comparación de fase no segregada o con comparación de fase segregada. Explique ventajas, desventajas.

Discuta los cambios de fase y retrasos relacionados con la transmisión. Si el cable usa aislamiento con dieléctrico ϵ , el tiempo de transmisión en líneas largas puede introducir un cambio de fase sustancial. Por ejemplo, una línea de 150 millas.

Ventaja: funciona solo con corriente y por lo tanto no necesita voltaje (ventaja de costo).

Ideal para líneas cortas.

9.6 Protección diferencial de línea

Los diversos esquemas de protección que se han descrito hasta ahora tienen dos limitaciones básicas cuando se aplican a las líneas de transmisión: (a) no son capaces de determinar con absoluta certeza que la falla está en la línea bajo protección y por lo tanto deben depender de la coordinación para la limpieza adecuada de la falla, y (b) carecen de la capacidad de eliminar la falla en una línea simultáneamente en los dos extremos de la línea. Debido a estas limitaciones, la detección y eliminación de fallas no puede ser rápida. La protección rápida y el disparo simultáneo de la línea desde ambos terminales se pueden lograr con protección diferencial y comunicaciones entre los relés en los dos terminales de la línea. En menor medida, se pueden lograr objetivos similares con la retransmisión piloto. Examinaremos primero la protección diferencial y luego la retransmisión piloto.

La protección diferencial para las líneas de transmisión presenta desafíos debido a la distancia entre los dos terminales de la línea. La aplicación directa de la protección diferencial requerirá cables de un extremo de la línea al otro. Estos cables estarán en paralelo con la línea eléctrica y durante las fallas pueden experimentar voltajes inducidos.

Los esquemas de protección diferencial brindan más certeza para identificar si la falla está dentro de la zona de protección. Sin embargo, debido a la extensión geográfica de las líneas de transmisión, la retransmisión diferencial no se puede aplicar fácilmente, excepto en líneas relativamente cortas. Esto se puede entender fácilmente ya que para un esquema diferencial, las corrientes deben medirse en los dos extremos de la línea simultáneamente y llevarse a la ubicación del relé diferencial. Los cables que requiere la protección diferencial tradicional presentarán problemas técnicos, logísticos y de costos adicionales. Durante las fallas, los voltajes inducidos en estos cables pueden ser excesivos y deben mitigarse con diseños apropiados. Sin entrar en más discusiones sobre los temas,

Los esquemas de protección diferencial tienen atractivas ventajas. Por esta razón, se han desarrollado enfoques y sistemas a lo largo de los años para permitir algunas de estas ventajas para el

protección de líneas de transmisión. Dado que el obstáculo básico para proporcionar protección diferencial a las líneas es la comunicación de los voltajes y corrientes desde los terminales de la línea al relé, los desarrollos fueron en la línea de cuánta información se puede comunicar de un extremo de la línea a otro, con qué medios de comunicación y cómo se utilizará esta información. Nos referimos a todos estos desarrollos (que se presentarán más adelante) como retransmisión piloto. Recientemente, la introducción de mediciones sincronizadas con GPS y comunicaciones de fibra óptica proporcionó la tecnología habilitadora para una verdadera protección diferencial de las líneas de transmisión. Específicamente, las mediciones sincronizadas con GPS permiten la medición simultánea de voltajes y corrientes en terminales remotos de una línea. Estas mediciones tienen una etiqueta de tiempo y se pueden comunicar a través de fibra óptica a la ubicación del relé. El relé puede alinear las medidas en el tiempo y realizar una verdadera función de protección diferencial. En la figura 9.25 se muestra una ilustración de este enfoque. La comunicación de fibra óptica se puede proporcionar en los cables blindados de una línea aérea o mediante líneas de fibra óptica incrustadas en el cable para la transmisión UG. Este enfoque proporciona un método de protección seguro, siempre que la señal GPS esté disponible y la comunicación de fibra óptica esté operativa. La confiabilidad de estos sistemas puede ser muy alta, por ejemplo, para la disponibilidad del GPS, se puede proporcionar un equipo de bajo costo que mantendrá el tiempo del GPS durante un tiempo sustancial. En la figura 9.25 se muestra una ilustración de este enfoque. La comunicación de fibra óptica se puede proporcionar en los cables blindados de una línea aérea o mediante líneas de fibra óptica incrustadas en el cable para la transmisión UG. Este enfoque proporciona un método de protección seguro, siempre que la señal GPS esté disponible y la comunicación de fibra óptica esté operativa. La confiabilidad de estos sistemas puede ser muy alta, por ejemplo, para la disponibilidad del GPS, se puede proporcionar un equipo de bajo costo que mantendrá el tiempo del GPS durante un tiempo sustancial. En la figura 9.25 se muestra una ilustración de este enfoque. La comunicación de fibra óptica se puede proporcionar en los cables blindados de una línea aérea o mediante líneas de fibra óptica incrustadas en el cable para la transmisión UG. Este enfoque proporciona un método de protección seguro, siempre que la señal GPS esté disponible y la comunicación de fibra óptica esté operativa. La confiabilidad de estos sistemas puede ser muy alta, por ejemplo, para la disponibilidad del GPS, se puede proporcionar un equipo de bajo costo que mantendrá el tiempo del GPS durante un tiempo sustancial.

períodos en caso de pérdida de señales de satélite y se pueden utilizar líneas de fibra óptica redundantes.

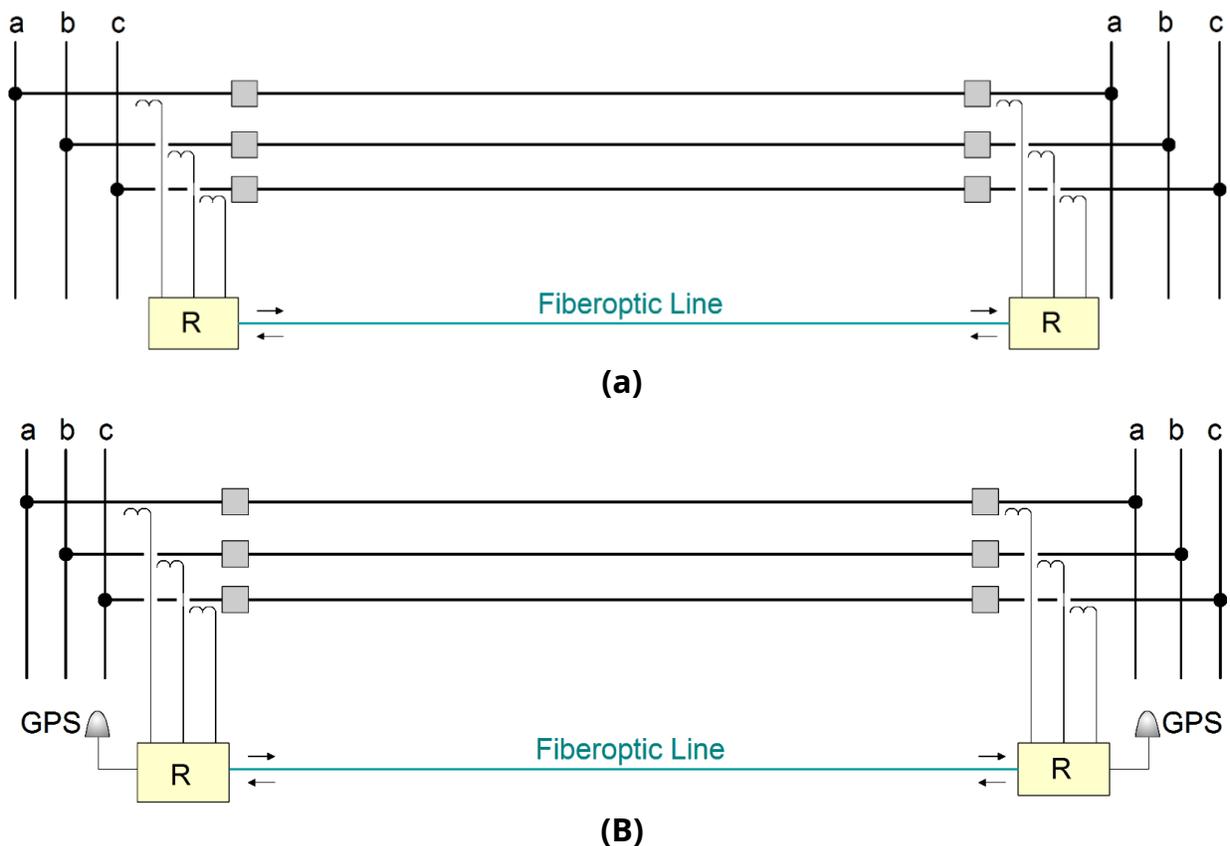


Figura 9.25: Ilustración de la protección diferencial de línea
(a) Diferencial de línea con comunicaciones rápidas
(b) Medidas sincronizadas con GPS

La protección diferencial de línea es un desarrollo relativamente reciente. Por otro lado, hay muchos esquemas de retransmisión piloto heredados y se están instalando muchos más. A continuación se ofrece una revisión de estos esquemas.

Para comprender mejor el impacto de la no sincronización, se considera un ejemplo simple.

Ejemplo E9.x: Considere una línea de transmisión con un cable de fibra óptica entre los dos terminales de la línea. Suponga que se aplica un esquema diferencial de línea para la protección de la línea. Suponga un error de tiempo de 0,1 mseg. Calcule la corriente en la bobina de operación del relé diferencial cuando la línea transporta 1500 A.

Solución: por simplicidad, no consideraremos ningún otro problema. Suponemos que la corriente es la misma en ambos terminales de la línea y el error se debe solo al error de sincronización. Un error de tiempo de 0,1 ms significa un error de fase de 2,16 grados. Así, la corriente diferencial será:

$$\tilde{I}_o = 1,500.0 \cdot 1500 \text{ mi}_{j2.16^\circ} = 1.065 \cdot j56.5353 \cdot 56.545 \text{ mi}_{j88.92^\circ}$$

9.6.1 Protección diferencial del cable piloto

Este esquema se ilustra en las Figuras 9.16 y 9.17.

9.6.2 Protección diferencial de línea del plano alfa

Este método se basa en transmitir el fasor de corriente medido de un extremo de la línea al otro y tomar la relación de los fasores de corriente en los dos extremos de la línea. Para una línea ideal y despreciando la corriente capacitiva de la línea, esta relación será exactamente -1.0. Si hay una falla interna en la línea, la relación del fasor actual será diferente de -1.0. Para una falla externa, la relación será cercana a -1.0. Para una línea trifásica, el método utiliza corrientes trifásicas en ambos lados de la línea.

Debido a la corriente capacitiva de la línea, la relación de las corrientes se desviará de -1.0. Cuanto más larga sea la línea, mayor será la desviación. Además, la relación variará dependiendo de la carga de la línea. En una línea con carga más ligera, la relación de las corrientes en los dos extremos puede desviarse mucho más que el valor de -1,0. Otro problema que afecta la precisión de la relación es la sincronización horaria de las mediciones. En cualquier momento, los errores harán que la relación se desvíe del - Valor 1.0. Por todas estas razones, el relé está configurado para operar solo cuando la relación tiene un valor que prácticamente garantiza que una falla interna está causando la desviación. Basado en muchos estudios, el La característica recomendada del relé se muestra en la Figura 9.26.

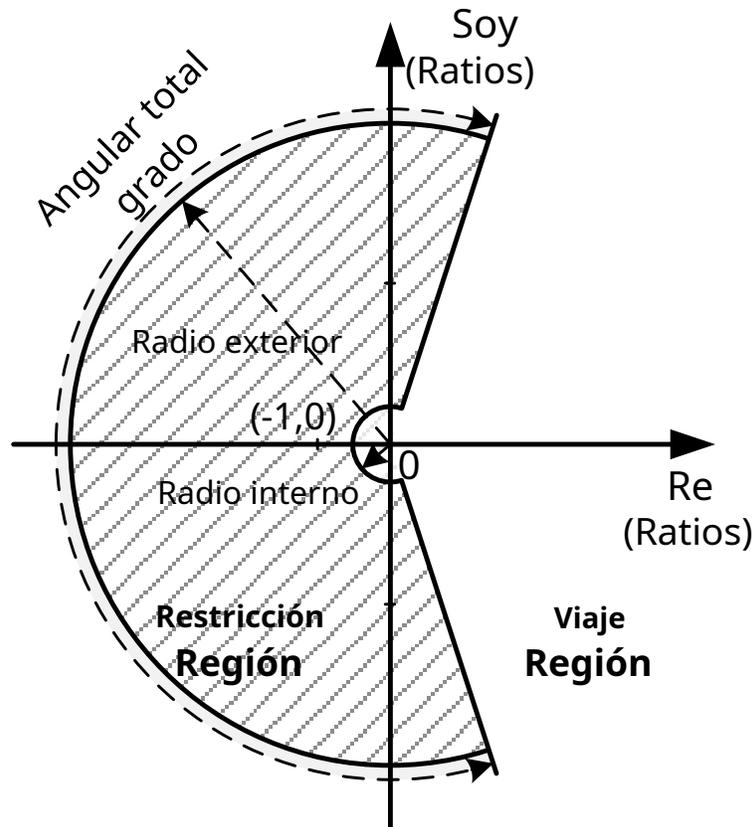


Figura 9.26: Característica de protección diferencial de línea en el plano alfa

9.7 Protección de líneas contra ondas viajeras

Cuando ocurre una falla en una línea de transmisión, genera transitorios que se propagan a través de las líneas de transmisión a velocidades muy rápidas. Nos referimos a estos como ondas viajeras. La velocidad de propagación varía según el modo del transitorio. Por ejemplo, las fallas de línea a línea generalmente generan transitorios que viajan a una velocidad aproximadamente igual a la velocidad de la luz. Las fallas a tierra inician dos tipos de ondas viajeras; uno viaja a la velocidad de la luz (modo lineal) y otro viaja a velocidad reducida, típicamente del 50 al 70% de la velocidad de la luz (modo terrestre). Las ondas viajeras se han explorado para la protección de líneas de transmisión durante muchas décadas. Los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de relés que utilizan ondas viajeras (TW) para detectar y localizar fallas de una manera rápida, rentable y relativamente confiable.

Una falla inicia tanto ondas viajeras de corriente como ondas viajeras de voltaje. Así, en teoría, se pueden detectar ondas viajeras de voltaje u ondas viajeras de corriente. Un ejemplo a continuación ilustra el funcionamiento de un relé de onda viajera ideal.

Ejemplo E9.x: Considere un transformador de corriente ideal de línea aérea de 115 kV de 27,5 millas de largo

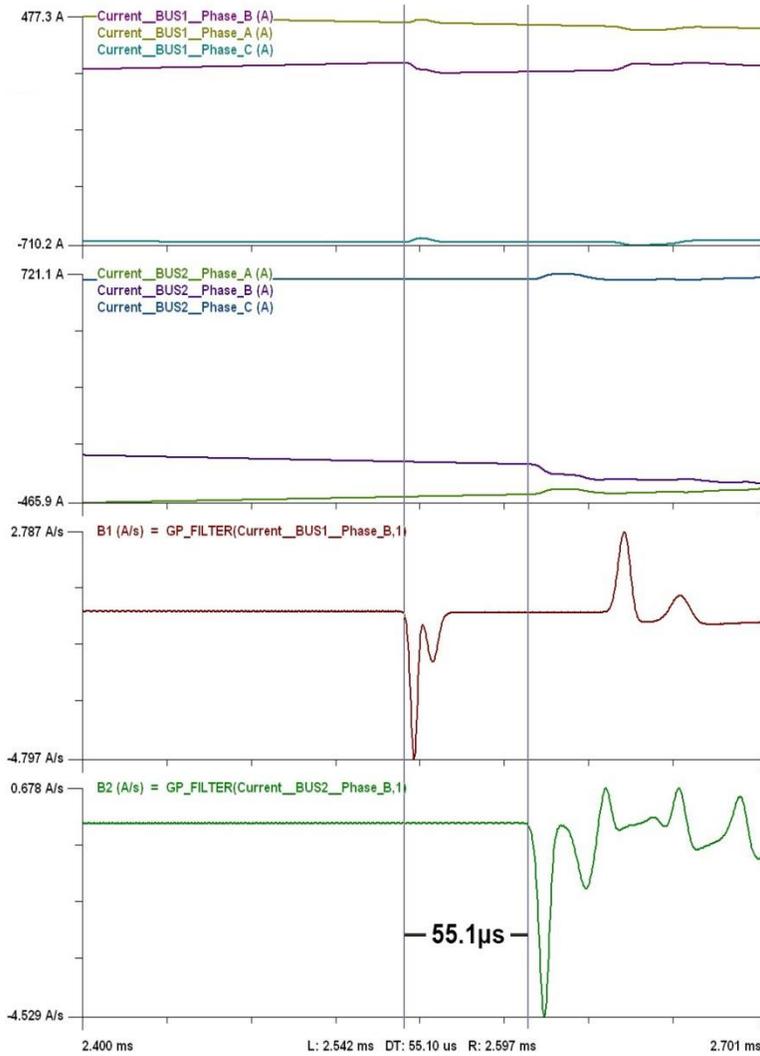
Tasa de muestreo 2 Ms / s

Dos conjuntos de trazas superiores: corrientes trifásicas en dos extremos de la línea, respectivamente

Baje dos trazas: formas de onda filtradas de fases con falla. Hora de llegada de la ola en los dos extremos están claros.

Localización de fallos:

Localización de fallos:



$$I_F \quad \text{línea} \quad L / 2 \quad r \quad \text{línea}$$

Línea aérea de 115 kV de 27,5 millas de largo

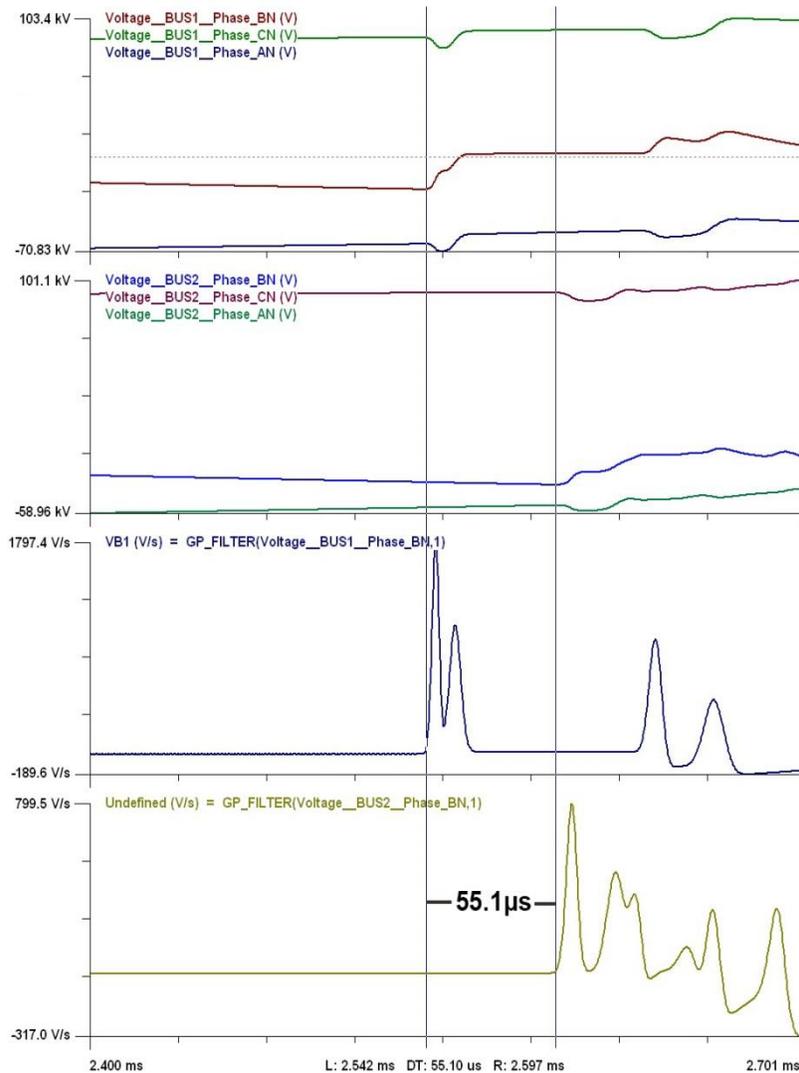
Transformadores de voltaje ideales

Tasa de muestreo 2 Ms / s

Los dos primeros conjuntos de trazas: voltajes trifásicos en dos extremos de la línea, respectivamente

Inferior dos trazas: formas de onda filtradas de fase con falla. El tiempo de llegada de la ola en los dos extremos es claro.

Localización de fallos:



Este ejemplo ilustra que, en teoría, tanto las ondas viajeras de voltaje como las de corriente pueden usarse para detectar el tiempo de llegada de las ondas de voltaje o de corriente y así calcular la ubicación de la falla. También debe tenerse en cuenta que el uso de mediciones sincronizadas con GPS es muy importante para este relé.

Cuando estos relés se aplican con TC o TT de diseño convencional o especial, se deben considerar las características de los transformadores de medida. Tenga en cuenta que estos relés dependen

al detectar el rápido aumento del frente de onda viajera que, en general, comprende altas frecuencias. Por lo tanto, los transformadores de instrumentos deben permitir el paso de altas frecuencias tanto como sea posible. Desde este punto de vista, los transformadores de corriente representan una mejor opción. Esta es la razón por la que muchos fabricantes prefieren utilizar la corriente como la cantidad de detección [7] [8].

El ejemplo indicó un relé que usa los tiempos de llegada de la onda viajera en ambos extremos de la línea (método de dos extremos). Es posible diseñar el relé para que se base en los tiempos de llegada de las ondas viajeras en un solo extremo. En este caso, el tiempo de llegada de las ondas reflejadas se mide con el fin de localizar la falla. Porque como las ondas viajeras se reflejan y refractan cuando encuentran discontinuidades a lo largo de la línea, las ondas reflejadas no son tan fuertes y generan un problema de confiabilidad.

9.7 Protección de líneas mutuamente acopladas

Muchas líneas eléctricas pueden compartir el derecho de paso (o torres / postes) con otras líneas en parte o en toda su longitud. En este caso, existe un acoplamiento mutuo entre las líneas. El acoplamiento mutuo induce voltajes en las líneas con falla y sin falla y puede alterar lo que los relés "ven" con la posibilidad de alterar la decisión del relé. Estos efectos se analizarán con un ejemplo.

Ejemplo para agregar.

Para las líneas mutuamente acopladas, el desafío lo presenta el acoplamiento mutuo magnético que afecta principalmente a las redes de secuencia cero. La figura 9.27 muestra un ejemplo de sistema de líneas de transmisión acopladas mutuamente. Tenga en cuenta que, en general, el acoplamiento mutuo puede ocurrir en una sola sección de las líneas.

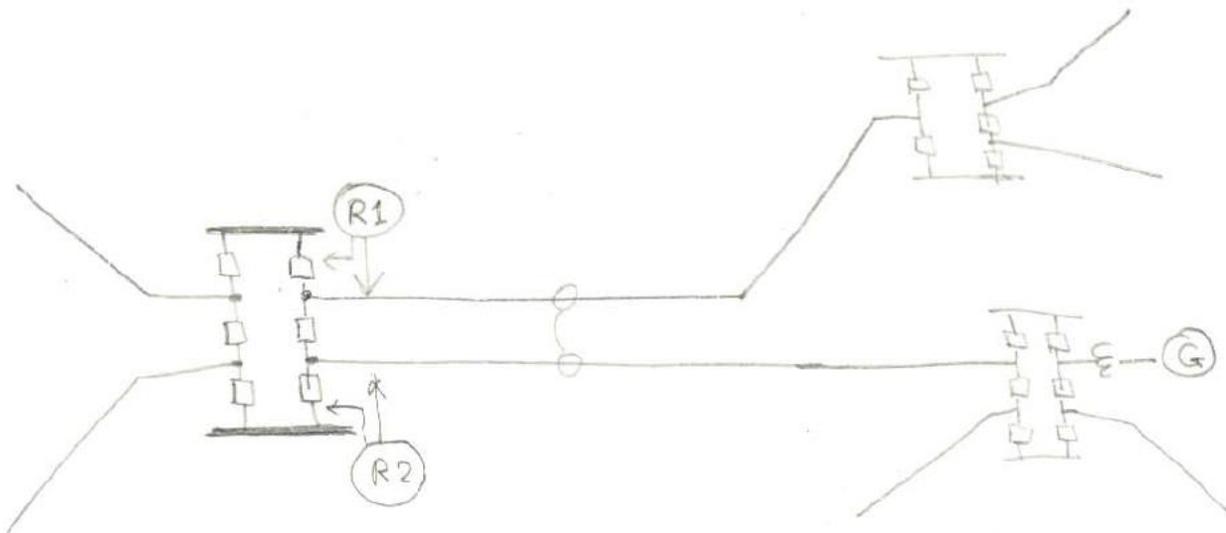


Figura 9.27: Líneas de transmisión mutuamente acopladas

Un enfoque para superar la influencia del acoplamiento de secuencia cero y el voltaje / corriente inducidos en líneas adyacentes es proporcionar compensación a los relés de distancia. Los relés reciben la entrada de la corriente de secuencia cero de las líneas adyacentes para calcular la impedancia aparente. Se basa en el supuesto de que toda la longitud de la línea protegida está bajo la misma influencia de la corriente de secuencia cero I_0 . Las principales desventajas de este enfoque es que el voltaje inducido en la línea bajo protección no solo está influenciado por la corriente de secuencia cero de la línea adyacente, sino también por la corriente de secuencia positiva y negativa (normalmente 5% -7%). . Así, incluso en perfectas condiciones, el método de compensación adolece de errores sistemáticos.

El esquema de protección diferencial de línea funciona bien en líneas mutuamente acopladas [12].

Ejemplo E9.x: Considere el sistema de energía eléctrica de la Figura E9-X. Los parámetros de los distintos componentes del sistema se muestran en la Figura. Los parámetros de secuencia de las dos líneas se dan en las Figuras E9-xa y E9-xb (la línea con fallas es la que se muestra en la Figura E9-X). La impedancia de secuencia cero mutua entre las dos líneas es de 27,5 ohmios. La impedancia de secuencia mutua positiva / negativa es cero.

Considere una falla de línea a tierra en la ubicación A indicada 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. Suponga que hay un relé de distancia ubicado en el lado del bus infinito de la línea con falla. Suponga además que la zona uno de este relé está configurada para 54 ohmios en un ángulo de 80 grados (en la línea lado) y el factor de compensación m de este relé se establece en 1,5.

Determine si el relé se disparará en la zona 1. Muestre todos sus cálculos.

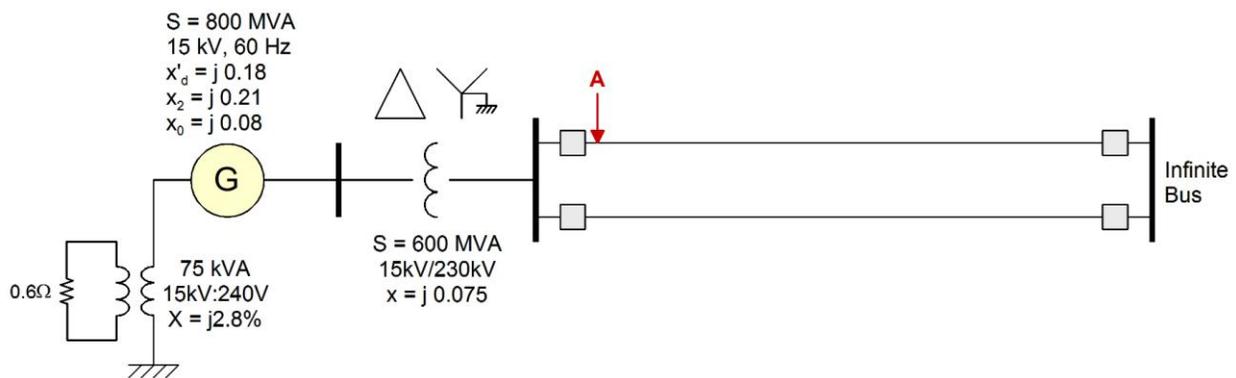


Figura E9-x: Ejemplo de líneas de transmisión mutuamente acopladas

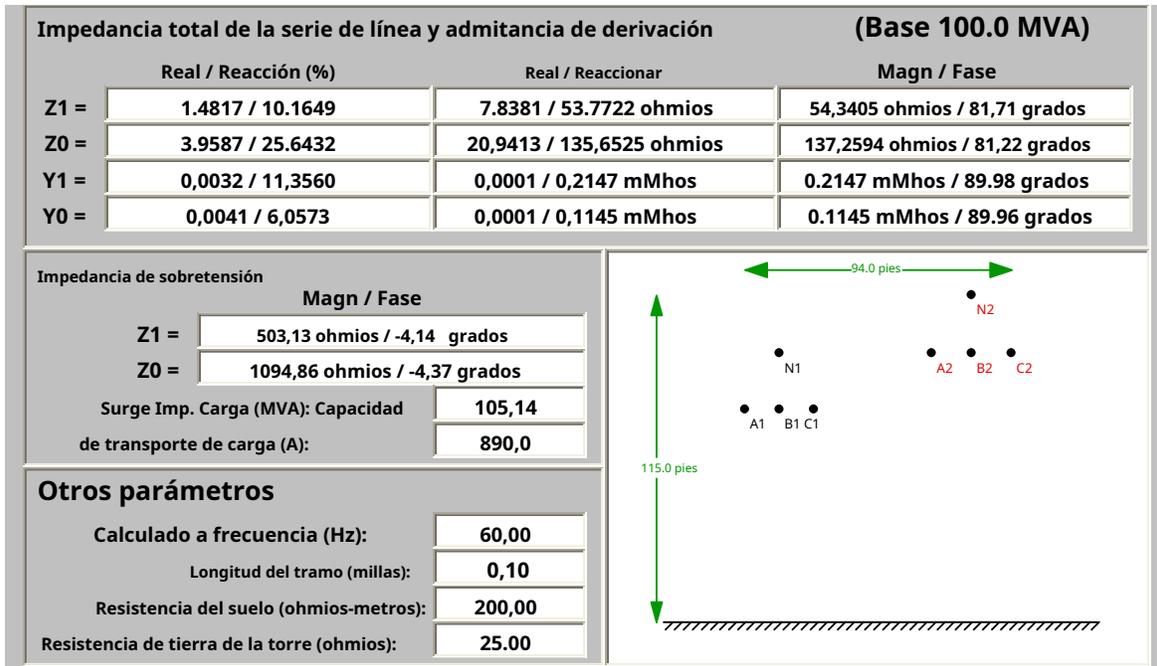


Figura E9-Xa: Parámetros de secuencia y topología del ejemplo acoplados mutuamente Líneas - Línea 2

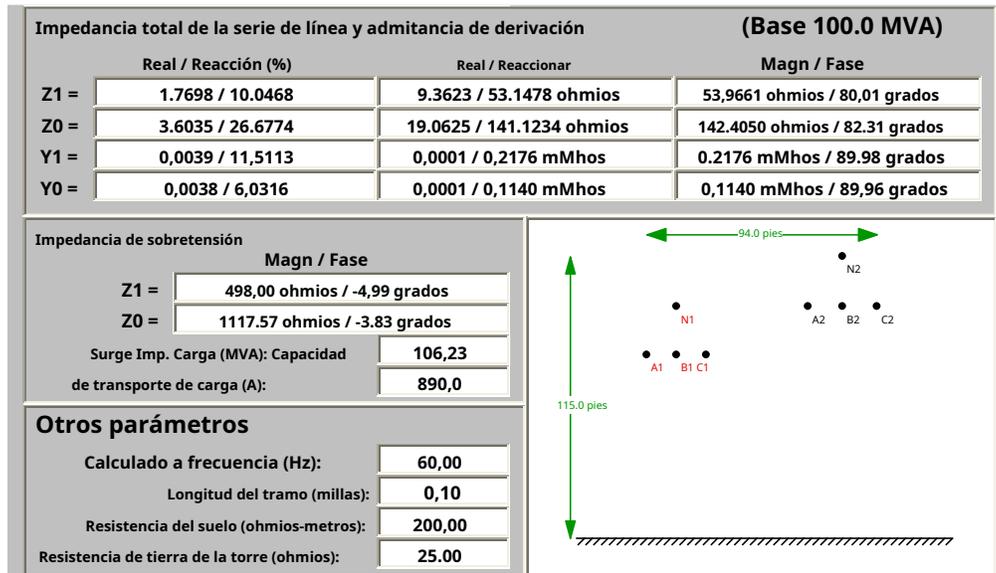
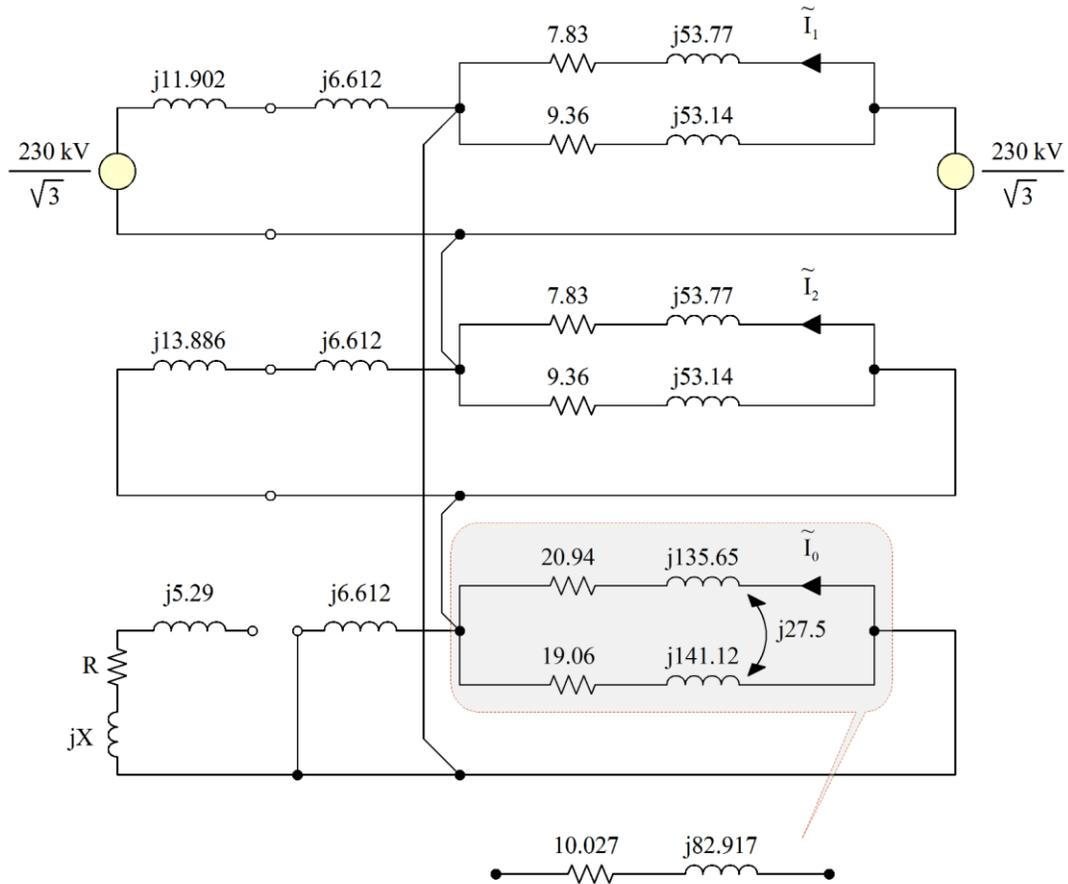


Figura E9-Xb: Parámetros de secuencia y topología del ejemplo acoplados mutuamente Líneas - Línea 1

Solución: El circuito equivalente para la condición de falla especificada es:



El análisis de cortocircuito del circuito anterior produce:

$$\tilde{I}_1 = 933,6 \text{ mi}_{\beta 2,31^\circ}$$

$$\tilde{I}_2 = 990,6 \text{ mi}_{\beta 2,53^\circ}$$

$$\tilde{I}_0 = 172,8 \text{ mi}_{\beta 79,79^\circ}$$

$$\tilde{I}_a = 933,6 \text{ mi}_{\beta 2,31^\circ} + 990,6 \text{ mi}_{\beta 2,53^\circ} + 172,8 \text{ mi}_{\beta 79,79^\circ} = 2.096,8 \text{ mi}_{\beta 2,20^\circ}$$

$$\tilde{V}_1 = 132,77 \text{ mi}_{\beta 0^\circ}$$

$$\tilde{V}_2 = 0$$

$$\tilde{V}_0 = 0$$

El relé verá la siguiente impedancia:

$$Z \sim \frac{\tilde{V}_a}{I_a 1,5I_0} \sim 56,36 \text{mi}_{j81,94\%} \text{ ohmios}$$

El relé "verá" la falla fuera de su zona.

Ejemplo E9.y: Considere el sistema de energía eléctrica ilustrado en la Figura E9-Ya. La construcción de las líneas se ilustra en la Figura E9-Yb. Los conductores de fase de la línea tienen los siguientes parámetros: $r = 0.08$ ohmios / milla, radio = 0.5 pulgadas, GMR = 0.0325 pies. Por simplicidad, descuide los cables blindados. Considere una falla trifásica en el punto A (70% de la longitud de la línea). Calcule la impedancia "vista" por el relé indicado en la figura. La longitud de las líneas mostradas horizontalmente en la Figura es de 83 millas, mientras que la longitud de las líneas mostradas verticalmente es de 12 millas. Todas las líneas son líneas de 230 kV. Las tres fuentes equivalentes son idénticas a los siguientes parámetros: $Z_1 = Z_2 = j12,2$ ohmios y $Z_0 = j8,9$ ohmios. Antes de la falla, el sistema opera con nominal voltajes y descargados. Por simplicidad, descuide las corrientes capacitivas.

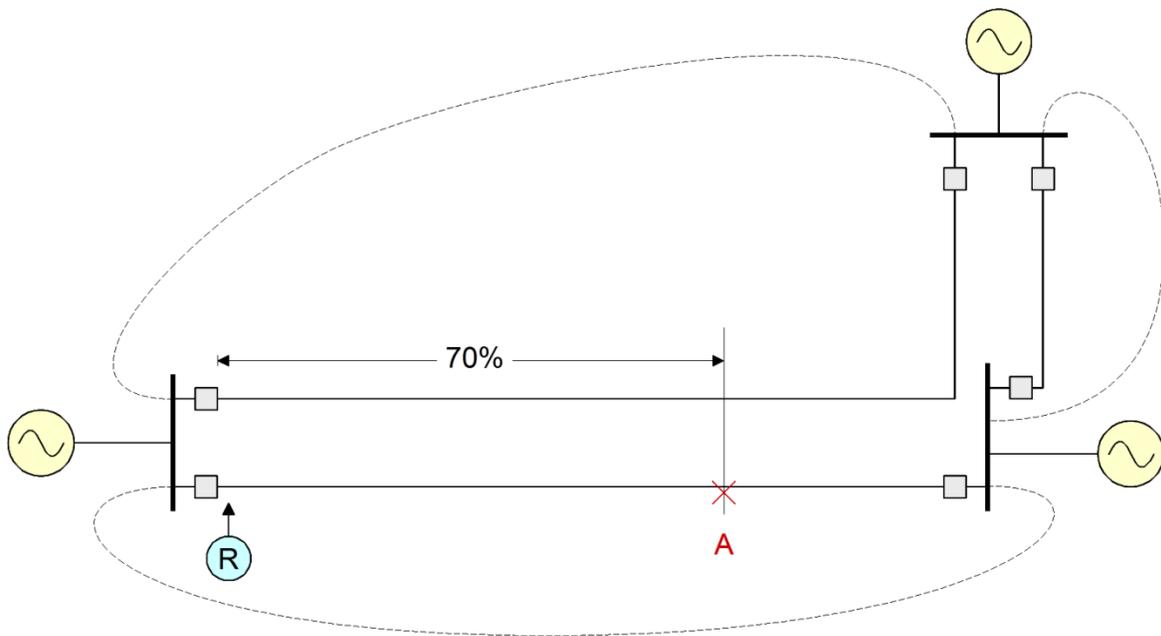


Figura E9-Ya: Ejemplo de líneas de transmisión parcialmente acopladas

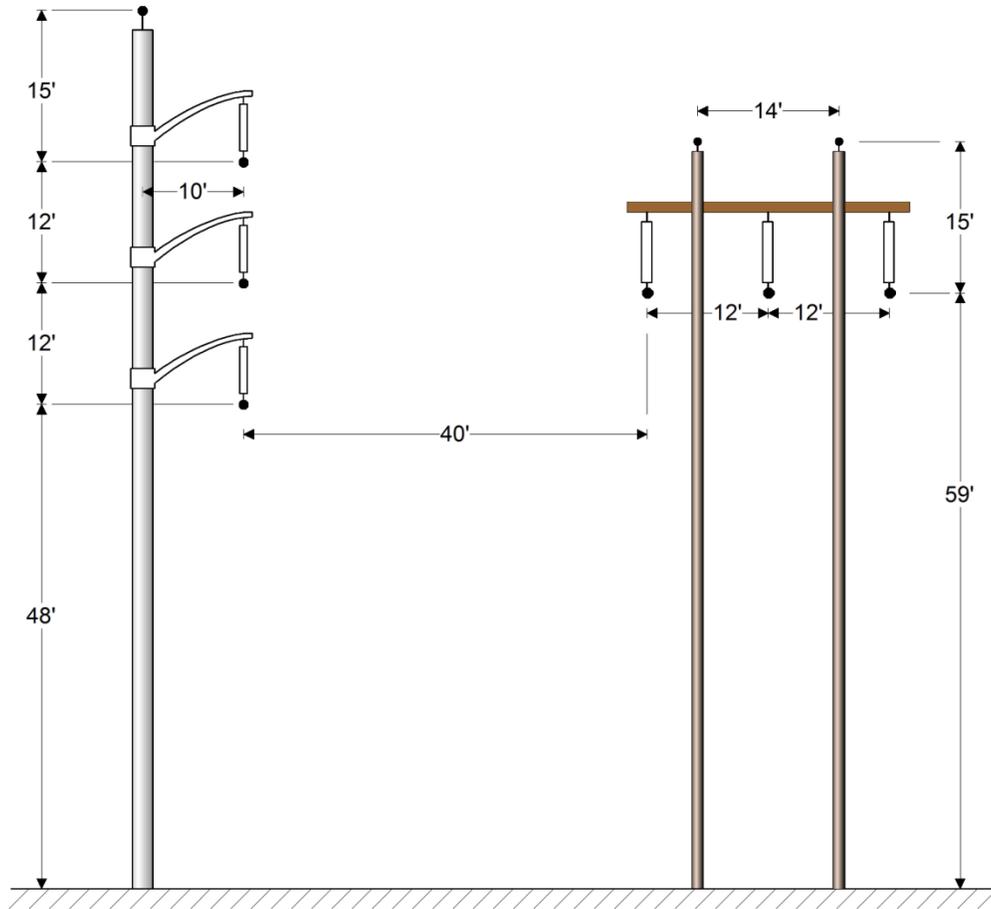
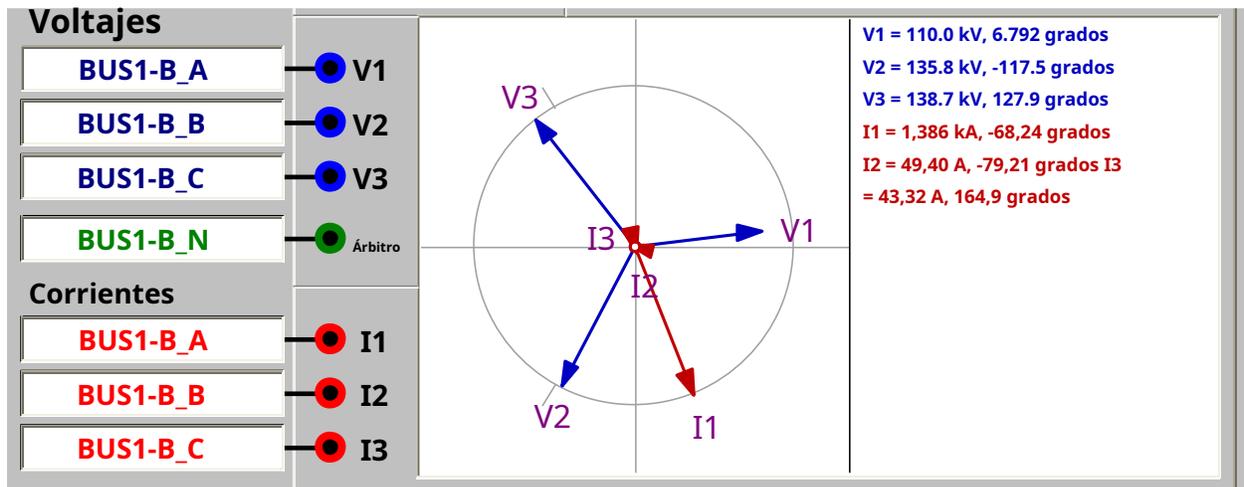
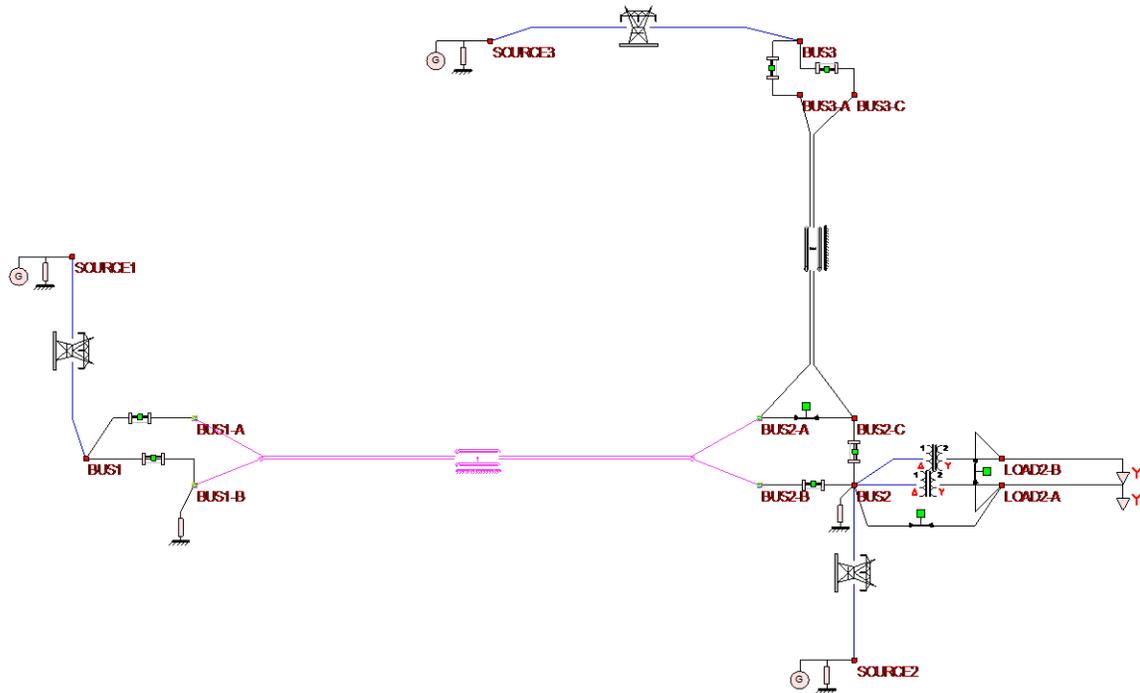
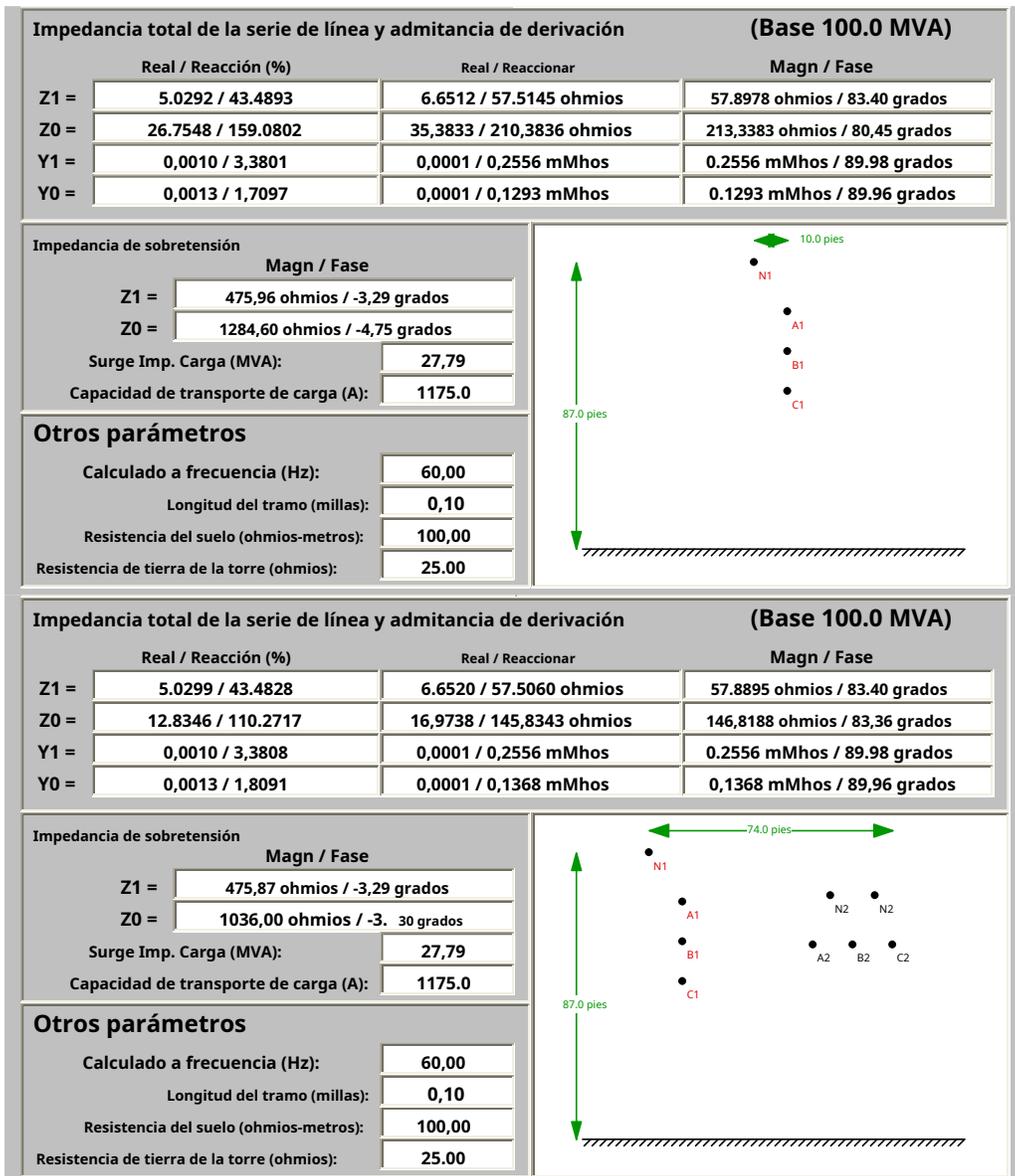
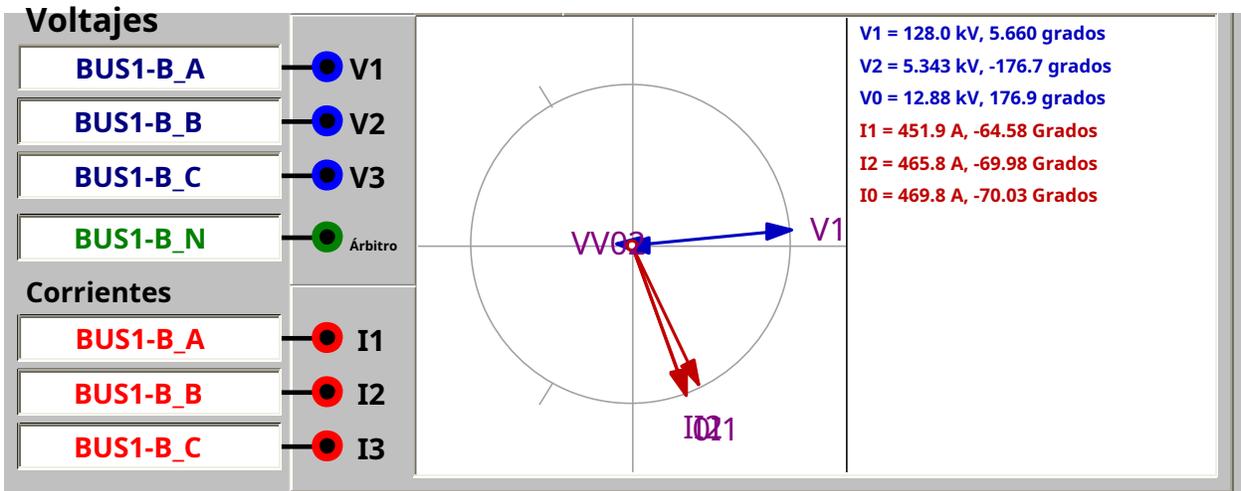


Figura E9-Yb: Topología de líneas de transmisión mutuamente acopladas





Impedancia total de la serie de línea y admitancia de derivación (Base 100.0 MVA)			
	Real / Reacción (%)	Real / Reaccionar	Magn / Fase
Z1 =	6.6630 / 44.4818	8.8118 / 58.8272 ohmios	59,4835 ohmios / 81,48 grados
Z0 =	17.0545 / 109.3824	22,5545 / 144,6582 ohmios	146.4060 ohmios / 81.14 grados
Y1 =	0,0013 / 3,2914	0,0001 / 0,2489 mMhos	0.2489 mMhos / 89.98 grados
Y0 =	0,0046 / 1,9441	0,0003 / 0,1470 mMhos	0,1470 mMhos / 89,87 grados

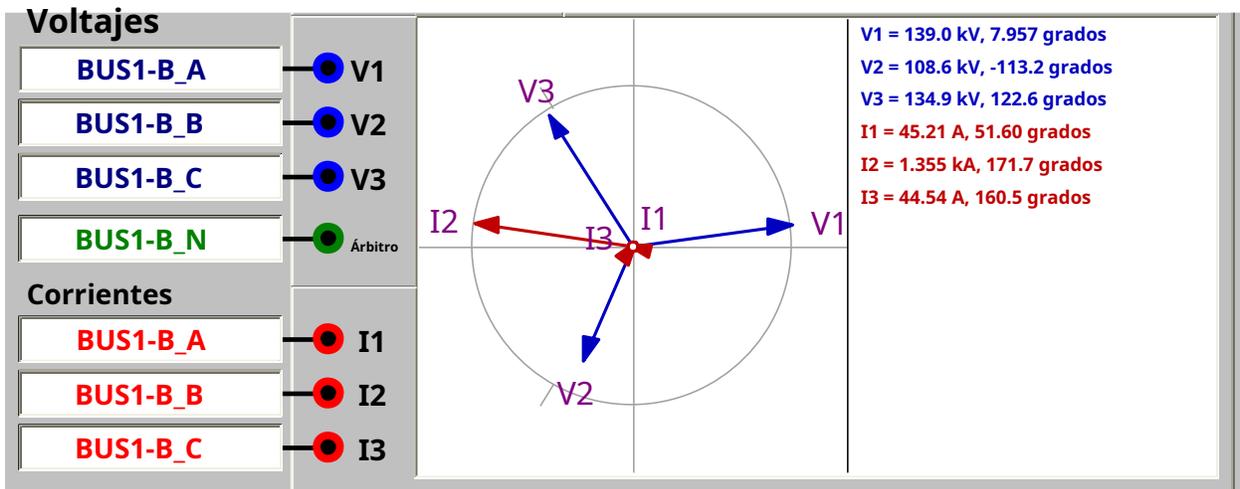
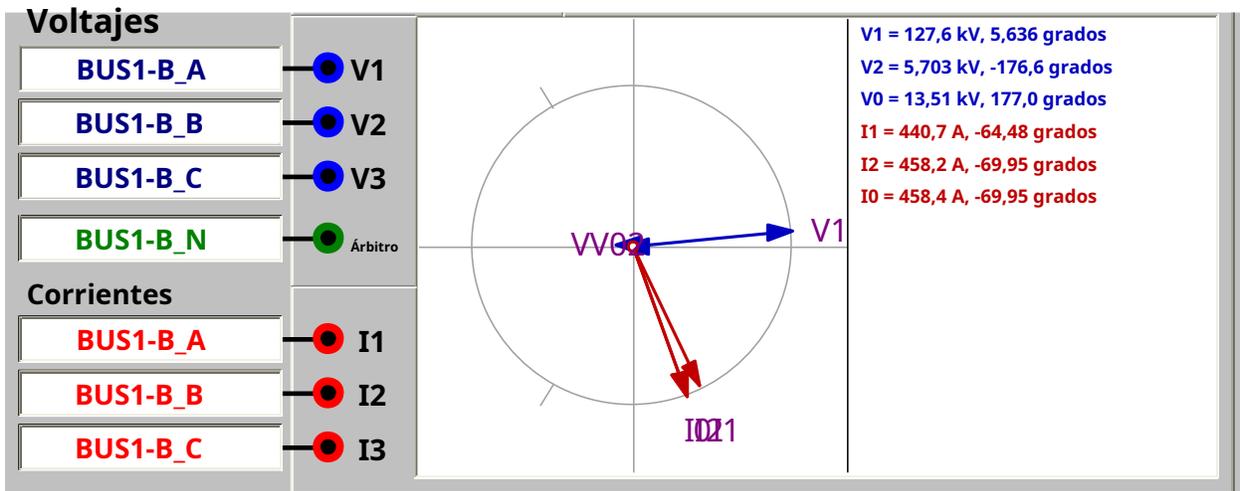
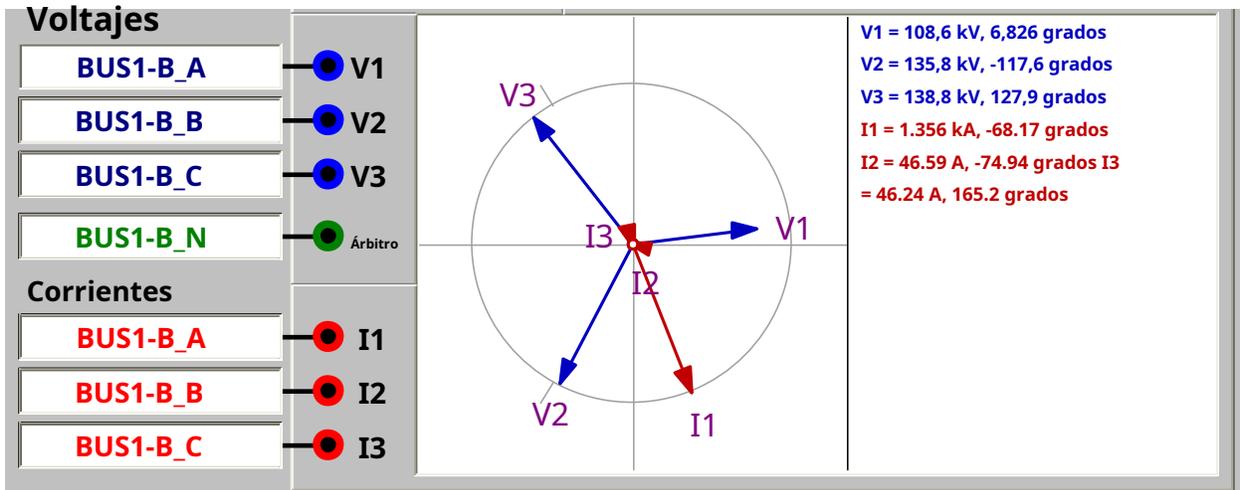
Impedancia de sobretensión	
	Magn / Fase
Z1 =	488,88 ohmios / -4,25 grados
Z0 =	997,96 ohmios / -4,3 6 grados
Surge Imp. Carga (MVA):	27.05
Capacidad de transporte de carga (A):	1175.0

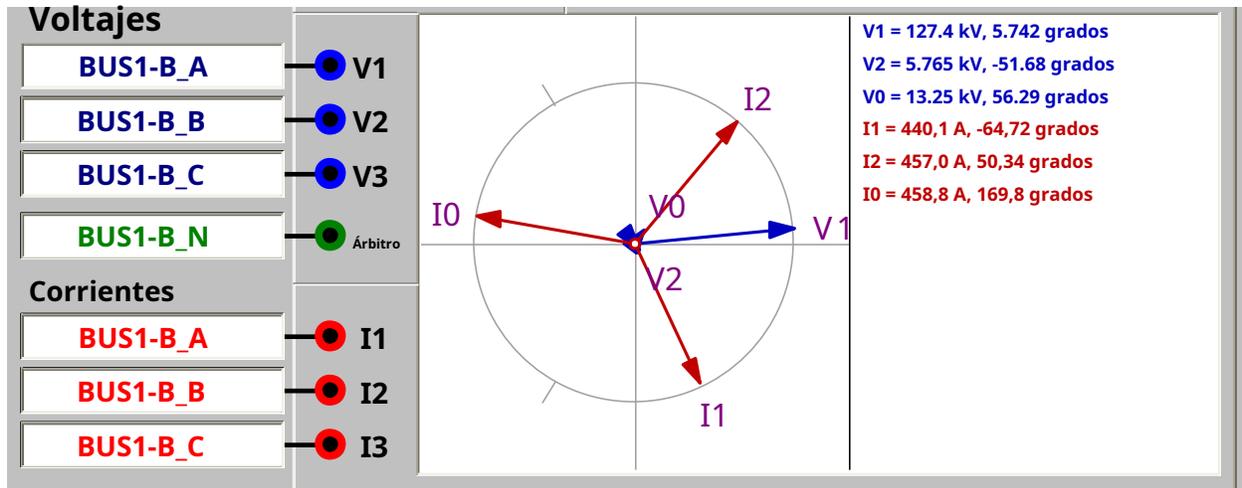
Otros parámetros	
Calculado a frecuencia (Hz):	60,00
Longitud del tramo (millas):	0,10
Resistencia del suelo (ohmios-metros):	100,00
Resistencia de tierra de la torre (ohmios):	25.00

Diagrama de un sistema de potencia con tres fases (A1, B1, C1) y tres neutros (N1, N2, N2). Se muestran dimensiones de 74.0 pies y 87.0 pies.

Impedancia y admitancia de derivación de la serie de secuencia cero de línea total (Bases: 115,0 kV 100,0 MVA)			
	Real / Reacción (%)	Real / Reaccionar	Magn / Fase
Z0 =	- 0.2388 / -205.8164	- 0.3158 / -272.1923 ohmios	272,1924 ohmios / -90,07 grados
Y0 =	0,0014 / -0,2767	0,0001 / -0,0209 mMhos	0.0209 mMhos / -89.71 grados

Otros parámetros	Calculado en	Resistividad del suelo
	60,00 Hz	100,00 Ohm-m





9.8 Protección de líneas de transmisión compensadas en serie

La aplicación de relés de impedancia puede verse comprometida en líneas con compensación en serie.

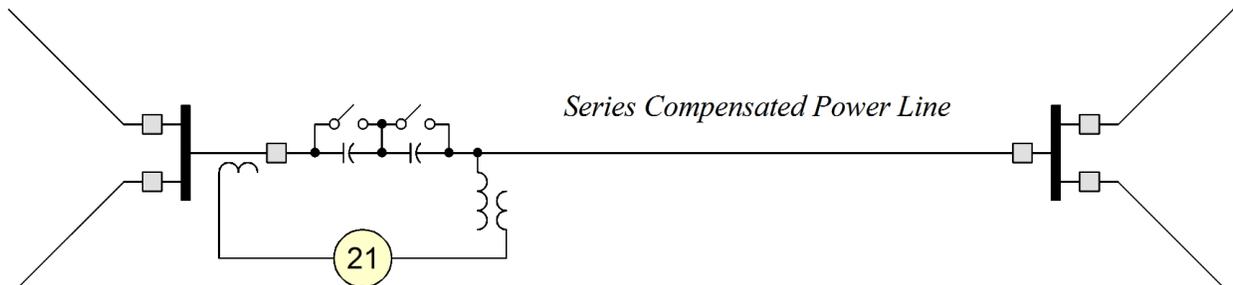


Figura 9.28: Ejemplo de línea de transmisión compensada en serie

Las líneas de transmisión son componentes importantes de los sistemas eléctricos modernos. Con una demanda cada vez mayor de transmisión de energía, los sistemas de transmisión están evolucionando con mayor complejidad. Una forma de aumentar la capacidad de transmisión y mejorar la estabilidad es agregar condensadores en serie (SC) para formar líneas compensadas en serie. Con un diseño adecuado, también pueden reducir las pérdidas y amortiguar las oscilaciones subsíncronas [1-2]. Debido a los derechos de paso limitados, muchos circuitos de transmisión comparten el derecho de paso creando líneas mutuamente acopladas. El acoplamiento puede involucrar múltiples circuitos con diferentes longitudes de acoplamiento para cada circuito.

En líneas compensadas en serie, los desafíos de protección son causados por la impedancia capacitiva de los capacitores conectados en serie que interrumpen la impedancia inductiva continua de las líneas de transmisión. La figura 9.28 muestra un ejemplo de sistema de transmisión compensado en serie, con SC a un lado de la línea. Considere las fallas F_1 y F_2 en los dos terminales del condensador en serie. Un relé de protección de distancia ubicado en el terminal del lado derecho de la línea “verá” estas fallas en diferentes ubicaciones. Por ejemplo, si la línea está compensada al 50%, el relé verá la falla F_1 en el medio de la línea y disparará incorrectamente la línea, mientras que verá la falla F_2 al final de la línea.

línea. Para evitar este tipo de mal funcionamiento, la configuración del relé de distancia se acortará, desensibilizando el relé y reduciendo la protección.

El esquema de protección de distancia piloto no puede proteger adecuadamente las líneas compensadas en serie por las siguientes razones: la protección de distancia no piloto debe ser insensibilizada y los esquemas piloto dependen de relés de distancia. El esquema de comparación de direcciones tiene problemas de inversión de corriente similares.

La protección diferencial de línea es uno de los esquemas de protección más efectivos. Sin embargo, todavía existen algunos déficits. (a) la inversión de corriente en algunas situaciones conducirá a un mal funcionamiento de la protección diferencial; (b) Las líneas de transmisión EHV compensadas en serie suelen ser largas con corrientes de carga sustanciales que violan el principio de protección diferencial.

Un método eficaz y confiable para proteger líneas compensadas en serie es la protección basada en estimación de estado dinámico.

A completar.

9.9 Protección de líneas de terminales múltiples

A completar.

9.9.1 Problemas en la alimentación

La aplicación de relés de impedancia puede verse comprometida en líneas con grifos debido al problema de entrada o salida. El problema de la alimentación se muestra en la Figura 9.29. Tenga en cuenta que en este caso la línea derivada contribuye a la corriente de falla y hace que la impedancia "vista" por el relé sea mayor que la impedancia de la propia línea.

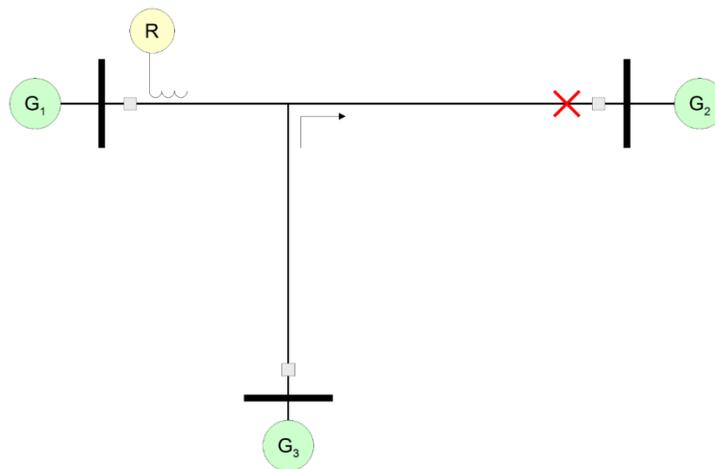


Figura 9.29: Ilustración del problema de alimentación

9.9.2 Problemas de alimentación de salida

La aplicación de relés de impedancia puede verse comprometida en líneas con derivaciones debido al problema de salida. El problema de la alimentación de salida se muestra en la Figura 9.30. En este caso, la corriente de falla eléctrica que sale a la línea de derivación hace que el relé "vea" una impedancia que es menor que la impedancia de la línea.

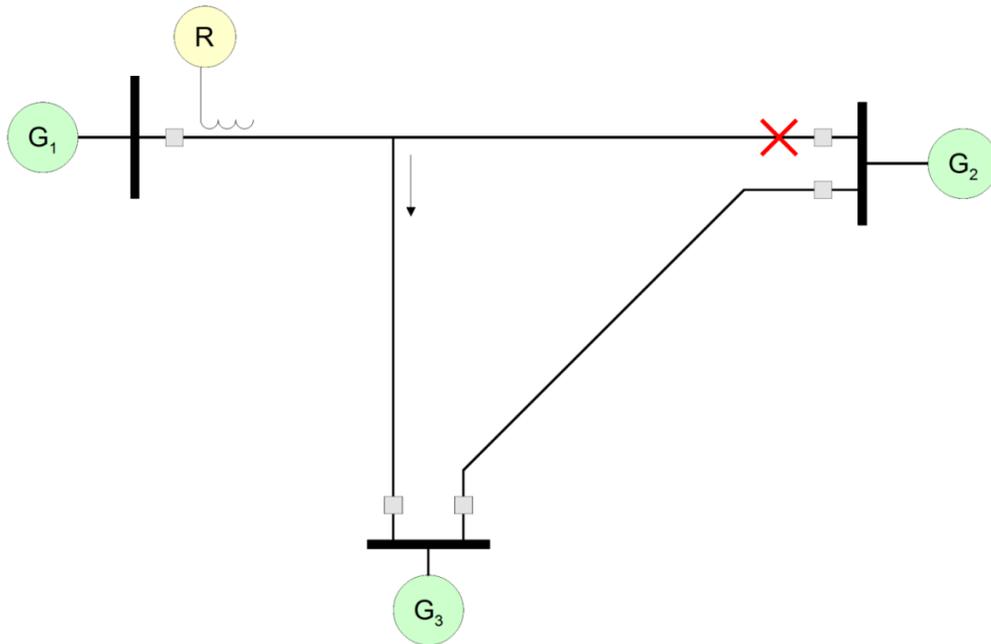


Figura 9.30: Ilustración del problema de salida

9.10 Protección de circuitos de transmisión UG

A completar.

9.11 Protección de líneas de transmisión de CC

A completar.

Las líneas MTDC actuales están equipadas con 'protección contra ondas viajeras (TWP)' como protección primaria y la protección diferencial de corriente de línea como protección de respaldo. El TWP adopta principalmente las ideas de ABB y SIEMENS: para determinar si hay fallas internas de la derivada de la tensión o la corriente. La protección diferencial de corriente de línea es simplemente una suma de corrientes instantáneas entre los terminales de la línea. Sin embargo, la protección diferencial de corriente tiene un retraso largo (500 - 800 ms) para evitar un funcionamiento incorrecto durante los transitorios (ya que para las líneas de CC

las corrientes capacitivas de derivación pueden ser muy grandes durante fallas externas). Estos relés de protección se han instalado en prácticos sistemas MTDC.

Más detalles, así como algunas consideraciones para sistemas prácticos, son los siguientes.

Actualmente, las líneas MTDC se implementan utilizando topologías VSC en lugar de topologías CSC debido al control de flujo de energía flexible, sin fallas de conmutación, etc. Entre muchas topologías VSC, la topología MMC podría ser más preferible debido a una frecuencia de conmutación más baja, armónicos más bajos, etc. un sistema MMC-MTDC de cuatro terminales cerca de Beijing, China (en el futuro, el sistema puede ampliarse con más terminales). La mayor parte de la construcción está terminada a finales de 2019.

Hay dos puntos de vista principales entre los investigadores sobre cómo proteger las líneas de transmisión de CC en las redes MTDC. El primer punto de vista es aplicar controles a los convertidores / apagar el polo fallado / apagar la estación convertidora / abrir el disyuntor del lado de CA cuando las líneas de CC tienen fallas. De hecho, estas ideas se han aplicado a dos líneas de CC terminales. Sin embargo, para las redes MTDC, el principal problema es que la zona de corte de energía no se minimizará con estas medidas (ya que las fallas en las líneas MTDC pueden causar problemas de sobrecorriente / subtensión en muchas estaciones convertidoras, y en las redes MTDC una estación convertidora está conectada a múltiples transmisiones). Por lo tanto, el segundo punto de vista podría ser más preferible: similar a las redes de CA, se pueden instalar interruptores de circuito de CC en los terminales de cada línea de transmisión y usar relés de protección para proteger cada línea de transmisión de CC (el desarrollo de los interruptores de circuito de CC lo ha hecho posible). De hecho, el práctico sistema MMC-MTDC de cuatro terminales de China utiliza el "segundo punto de vista" antes mencionado.

Sin embargo, la protección de relés en redes MTDC es bastante desafiante ya que la corriente de falla puede aumentar extremadamente rápido durante la falla y el tiempo restante para los relés de protección es muy limitado (de lo contrario, los interruptores de CC no pueden interrumpir una corriente de falla tan grande y la corriente de falla puede causar daños a los interruptores de la electrónica de potencia). Por lo tanto, en la práctica, los inductores generalmente se instalan en los terminales de las líneas de CC o dentro de las estaciones convertidoras para limitar la corriente de falla (pero la los inductores no deben ser demasiado grandes para poner en peligro la dinámica del sistema MTDC). Aun así, el tiempo que queda para los relés de protección es limitado. En el sistema MTDC de cuatro terminales en China, el sistema le pide al relé que determine la falla dentro de los 3 ms posteriores a la ocurrencia de la falla y le dé al interruptor de CC otros 3 ms para interrumpir la corriente de falla (6 ms en total). Es por eso que los relés de protección basados en información local son muy atractivos para la protección primaria de la línea. Sin embargo, todavía existen problemas como la sensibilidad limitada de los relés hacia fallas internas de alta impedancia si se utiliza el TWP y problemas de selectividad si el inductor limitador de corriente es demasiado pequeño, etc. tema de investigación en curso.

9.12 Protección sin configuración de la línea de alimentación

El análisis de los diversos esquemas de protección de línea muestra que: (a) los esquemas pueden ser muy complejos y provocar errores humanos y (b) hay casos en los que los esquemas pueden no funcionar como se esperaba. Estas dos razones se deben a una cantidad sustancial de errores de operación del relé. Investigación reciente

ha introducido un nuevo método para la protección de línea, la protección basada en estimación de estado dinámico, también conocido como protección sin ajuste.

Estado dinámico **mi**estimulación **Based PAG**rotection (EBP) (también conocida como protección sin ajustes) simplifica los ajustes de la protección y no necesita coordinación con otras funciones de protección. La idea principal de este esquema es monitorear la consistencia entre las mediciones y el modelo dinámico por la salud de los componentes, o el nivel de confianza. Aquí, el modelo dinámico se construye encontrando todas las leyes físicas que deben satisfacer las mediciones. La protección diferencial de corriente ampliamente utilizada es un caso especial de EBP, cuyo modelo dinámico describe la suma cero de las corrientes de dos lados según la ley de corrientes de Kirchhoff. También es intuitivo que la protección será más efectiva al combinar todas las leyes físicas (por ejemplo, la ley de corriente de Kirchhoff, la ley de voltaje de Kirchhoff, la ley de Faraday, etc.).

Para ilustrarlo con un ejemplo. Para ser agregado.

9.13 Localización avanzada de fallas en líneas de transmisión

La localización precisa de fallas en las líneas de transmisión es muy valiosa para los operadores y el personal de servicios públicos, ya que se puede minimizar la cantidad de tiempo dedicado a buscar la falla. Por lo tanto, se pueden reducir el tiempo de interrupción, la mano de obra y los costos operativos. Las técnicas de localización de fallas heredadas se pueden clasificar principalmente en dos grupos: métodos basados en fasores de frecuencia fundamental y métodos basados en ondas viajeras. Los detalles de estos métodos se presentan a continuación.

Los relés de impedancia se basan en el cálculo de la distancia de una falla desde la ubicación del relé. El uso principal de esta información es decidir la acción de protección, es decir, disparar o no disparar los interruptores apropiados. Sin embargo, esta información también es útil para encontrar la ubicación de la falla y realizar las reparaciones necesarias. En particular, microprocesador
Las implementaciones de relés de distancia pueden proporcionar esta información en una pantalla o enviarla al centro de control sin un gasto adicional sustancial.

Hace mucho tiempo que se reconoció que el problema de la localización de fallas en los circuitos de potencia es importante por dos razones: (a) minimización del tiempo de inactividad mediante una reparación rápida y, por lo tanto, mayor confiabilidad del sistema (especialmente para circuitos de cables) y (b) mejor selectividad de los esquemas de protección en virtud del conocimiento de la ubicación de la falla (por ejemplo, los relés de distancia se basan en la evaluación de la distancia de la falla). Las tendencias recientes hacia la automatización han acentuado la importancia de la localización de fallas. A lo largo de los años, se han desarrollado varias tecnologías para la localización de fallas. Estas tecnologías se pueden clasificar en las siguientes:

- a) Métodos basados en el ruido audible de la recreación de fallas (golpes), este método requiere que un equipo real vaya al lugar y realice las pruebas,
- b) Métodos basados en la ubicación estratégica de indicadores de circuito con falla, este método requiere inspección visual del indicador de circuito con falla, o si los FCI son equipos con comunicaciones, para llevar toda la información a una ubicación central y determinar la ubicación mediante análisis.

- c) Detección y medición del tiempo de viaje del primer transitorio, este método requirió un equipo que pueda registrar formas de onda con tasas de muestreo muy altas (recuerde que los transitorios viajan con una velocidad cercana a la de la luz y para medir el tiempo de viaje es necesario capturar los transitorios con suficiente resolución de tiempo), y
- d) Métodos basados en la estimación de la impedancia del circuito a la falla y extracción de la ubicación de la falla a partir de los valores de impedancia conocidos por unidad de longitud.

Los dos primeros métodos se utilizan ampliamente en circuitos de distribución, especialmente en sistemas de cable URD. La tecnología thumper consiste en inyectar un impulso al cable averiado. La falla en el cable se vuelve a encender bajo el impulso y el ruido generado se utiliza para determinar la ubicación de la falla. La aplicación del thumper requiere que el cable esté fuera de servicio y, en general, lleva mucho tiempo. Una crítica a la tecnología thumper es que somete el cable a sobretensiones adicionales y, por lo tanto, puede afectar la vida útil del cable.

Los indicadores de circuito defectuoso son dispositivos que se activan por el flujo de la corriente de falla. Básicamente, un indicador de circuito defectuoso es un dispositivo de dos estados: el estado uno es normal y el estado dos indica que se ha detectado una corriente eléctrica por encima de un valor umbral. La aplicación de muchos indicadores de circuito con fallas en ubicaciones estratégicas a lo largo de un circuito, es decir, uno en cada transformador, proporciona un medio para determinar la ubicación de la falla entre dos ubicaciones. Están disponibles modelos con reinicio manual o automático. También están disponibles modelos con / sin comunicaciones.

Los relés de impedancia se basan en el cálculo de la distancia de una falla desde la ubicación del relé. El uso principal de esta información es decidir la acción de protección, es decir, disparar o no disparar los interruptores apropiados. Sin embargo, esta información también es útil para encontrar la ubicación de la falla y realizar las reparaciones necesarias. En particular, microprocesador
Las implementaciones de relés de distancia pueden proporcionar esta información en una pantalla o enviarla al centro de control sin un gasto adicional sustancial.

Hace mucho tiempo que se reconoció que el problema de la localización de fallas en los circuitos de potencia es importante por dos razones: (a) minimización del tiempo de inactividad mediante una reparación rápida y, por lo tanto, mayor confiabilidad del sistema (especialmente para circuitos de cables) y (b) mejor selectividad de los esquemas de protección en virtud del conocimiento de la ubicación de la falla (por ejemplo, los relés de distancia se basan en la evaluación de la distancia de la falla). Las tendencias recientes hacia la automatización han acentuado la importancia de la localización de fallas. A lo largo de los años, se han desarrollado varias tecnologías para la localización de fallas. Estas tecnologías se pueden clasificar en las siguientes:

- a) Métodos basados en el ruido audible de la recreación de fallas (golpes), este método requiere que un equipo real vaya al lugar y realice las pruebas,
- b) Métodos basados en la ubicación estratégica de indicadores de circuito con falla, este método requiere inspección visual del indicador de circuito con falla, o si los FCI son equipos con comunicaciones, para llevar toda la información a una ubicación central y determinar la ubicación mediante análisis.
- c) Detección y medición del tiempo de viaje del primer transitorio, este método requirió un equipo que pueda registrar formas de onda con tasas de muestreo muy altas (recuerde que los transitorios viajan con una velocidad cercana a la de la luz y para medir el tiempo de viaje es necesario capturar los transitorios con suficiente resolución de tiempo), y

- d) Métodos basados en la estimación de la impedancia del circuito a la falla y extracción de la ubicación de la falla a partir de los valores de impedancia conocidos por unidad de longitud.

Los dos primeros métodos se utilizan ampliamente en circuitos de distribución, especialmente en sistemas de cable URD. La tecnología thumper consiste en inyectar un impulso al cable averiado. La falla en el cable se vuelve a encender bajo el impulso y el ruido generado se utiliza para determinar la ubicación de la falla. La aplicación del thumper requiere que el cable esté fuera de servicio y, en general, lleva mucho tiempo. Una crítica a la tecnología thumper es que somete el cable a sobretensiones adicionales y, por lo tanto, puede afectar la vida útil del cable.

Los indicadores de circuito defectuoso son dispositivos que se activan por el flujo de la corriente de falla. Básicamente, un indicador de circuito defectuoso es un dispositivo de dos estados: el estado uno es normal y el estado dos indica que se ha detectado una corriente eléctrica por encima de un valor umbral. La aplicación de muchos indicadores de circuito con fallas en ubicaciones estratégicas a lo largo de un circuito, es decir, uno en cada transformador, proporciona un medio para determinar la ubicación de la falla entre dos ubicaciones. Están disponibles modelos con reinicio manual o automático. También están disponibles modelos con / sin comunicaciones.

El tercer método se basa en hardware especializado que registra el tiempo de viaje hasta la falla y extrae la distancia a la falla a partir de la velocidad conocida de propagación de las ondas EM en el circuito. Específicamente, el tiempo de viaje desde la ubicación de monitoreo hasta la falla se mide con hardware bastante sofisticado. Para un circuito dado (parámetros del circuito), la velocidad de propagación de las sobretensiones a lo largo del circuito se conoce y se utiliza para estimar la ubicación de la falla. Esta tecnología es compleja y requiere un hardware sofisticado y costoso.

El cuarto método requiere el registro de voltajes y corrientes en cualquier lugar a lo largo del circuito con falla. A partir de los voltajes y corrientes registrados y la impedancia conocida por unidad de longitud del sistema, se puede estimar la distancia a la falla. La introducción de relés numéricos y equipos de registro de fallas digitales han hecho que este método sea muy atractivo. Específicamente, el equipo mencionado proporciona registros del voltaje y la corriente durante la falla. Estos datos se pueden procesar en el relé o en el equipo de registro de fallas para proporcionar la ubicación de la falla. Además, estas grabaciones se almacenan típicamente y / o se pueden transmitir a ubicaciones centrales a través de una variedad de medios de comunicación, es decir, teléfono, fibra, microondas, etc. Los datos se pueden procesar en la ubicación central para estimar la distancia a la falla. Este enfoque proporciona el beneficio adicional de que las grabaciones de varios dispositivos se pueden utilizar para estimar la ubicación de la falla, aumentando así la precisión del método de localización de la falla. Hay muchas formas de estimar la ubicación de la falla a partir de los voltajes y corrientes registrados. Esta sección revisa los métodos existentes y proporciona una discusión de los problemas y limitaciones del enfoque.

El método básico de localización de fallas se explica con la ayuda de la Figura 10.x. Un relé, registrador de perturbaciones, etc. se coloca en un extremo del circuito. Este dispositivo registra el voltaje y la corriente en esa ubicación del circuito.

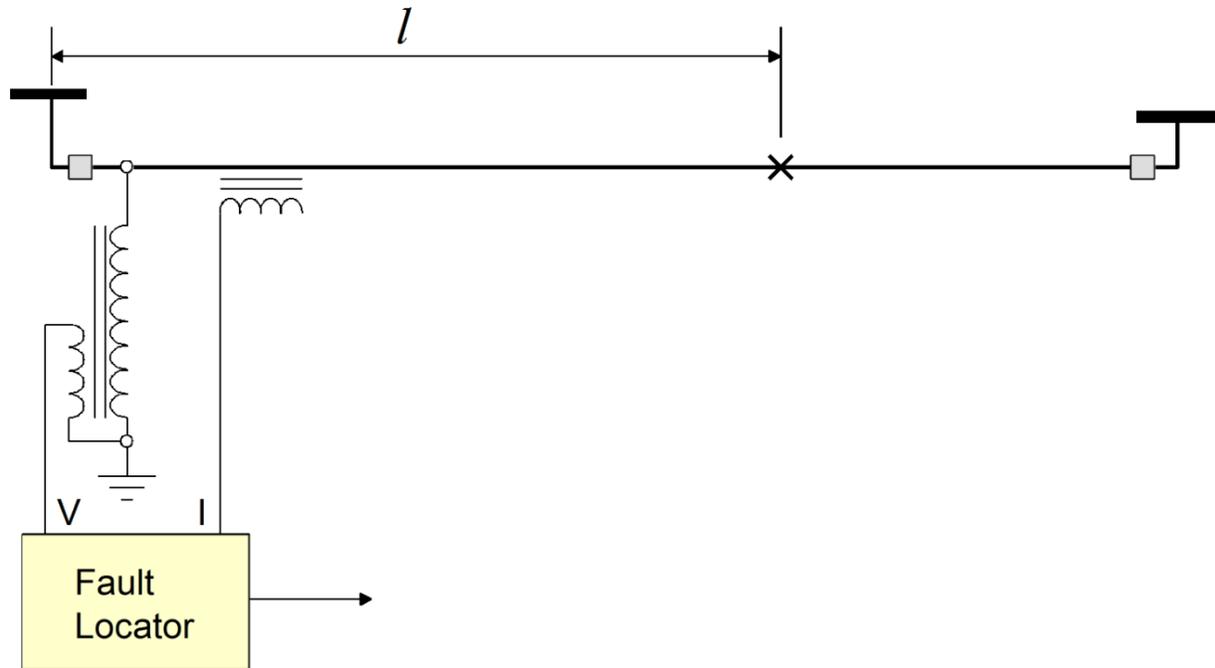


Figura 9.31: Principio de localización de fallas desde la impedancia del circuito hasta la falla

Suponga que ocurre una falla en un punto ubicado l metros del dispositivo de grabación. Durante las condiciones de falla, los voltajes y corrientes registrados se procesan para obtener los fasores \tilde{V} y \tilde{I} del voltaje y la corriente. La impedancia "vista" en la ubicación de la grabadora es:

$$Z_F \sim \frac{\tilde{V}}{\tilde{I}}$$

donde z es la impedancia del circuito por unidad de longitud.

Por lo tanto:

$$\frac{Z_F}{z} = \frac{\tilde{V}}{z\tilde{I}}$$

El enfoque anterior es simplista y es válido para circuitos simples con impedancia específica por unidad de longitud. En realidad, los circuitos son mucho más complicados, es decir, circuitos trifásicos con 3, 4 o 5 cables, o circuitos monofásicos con múltiples rutas de retorno de corriente de falla, como neutros, cables de tierra y tierra. Examinaremos la aplicación del principio anterior a los circuitos eléctricos típicos.

Suponga que se han registrado datos de falla en el Bus 1 de una línea de longitud total L durante una falla en algún punto de la línea (l millas del Bus 1) como se ilustra en la Figura 9.x. El registrador de fallas o relé (DFR) ha capturado las formas de onda de voltaje y corriente en las tres fases en el Bus 1 Terminal.

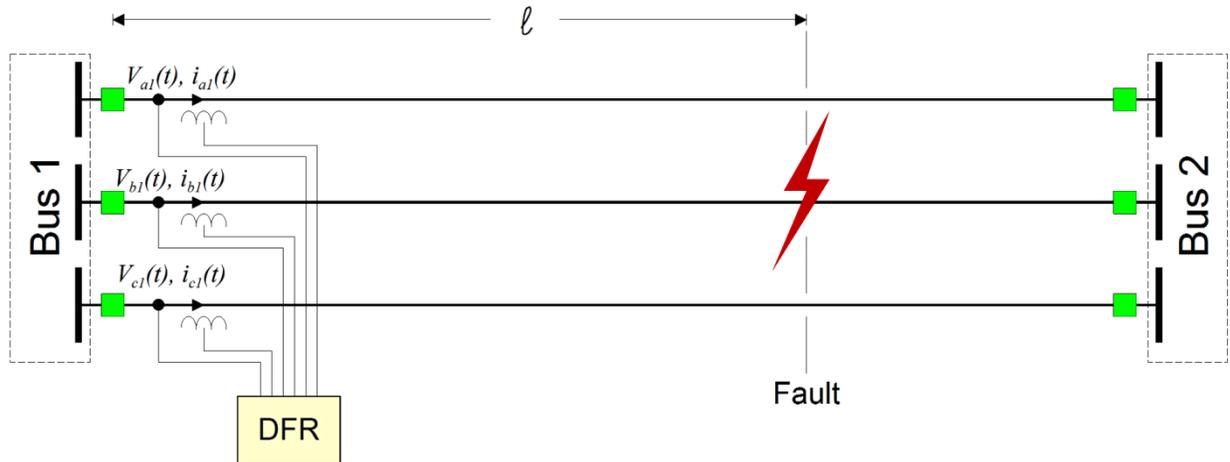


Figura 9.32: Ilustración de un circuito con falla con monitoreo de un solo extremo

El voltaje registrado en la fase con falla es:

$$\tilde{V}_F = (X_{fa} \tilde{I}_a + X_{\text{pensión completa}} \tilde{I}_b + X_{fc} \tilde{I}_c) + V_{\text{arco}}$$

Expresando el voltaje del arco como una conductancia multiplicada por la corriente de falla, se obtiene:

$$\tilde{V}_F = (X_{fa} \tilde{I}_a + X_{\text{pensión completa}} \tilde{I}_b + X_{fc} \tilde{I}_c) + r_{\text{soldado americano}} \tilde{I}_a$$

Dividiendo partes reales e imaginarias:

$$\begin{aligned} V_{fr} &= (X_{fa} \tilde{I}_a + X_{\text{pensión completa}} \tilde{I}_b + X_{fc} \tilde{I}_c) r_{\text{soldado americano}} \\ V_{fi} &= (X_{fa} \tilde{I}_a + X_{\text{pensión completa}} \tilde{I}_b + X_{fc} \tilde{I}_c) r_{\text{soldado americano}} \end{aligned}$$

Tras la solución de las ecuaciones anteriores para la distancia a la falla: tenga en cuenta que en este caso también se calcula el voltaje del arco de falla.

Métodos basados en fasores de frecuencia fundamental

Estos métodos utilizan fasores de tensión y corriente de frecuencias fundamentales para calcular la impedancia y luego la distancia entre la ubicación de la falla y los terminales de la línea [13]. Pueden clasificarse además en algoritmos de un solo extremo y de dos extremos. (a) **Algoritmos de un solo extremo** calcule la distancia a la falla de los fasores de voltaje y corriente en un extremo. La principal ventaja es que no requiere canales de comunicación desde el extremo remoto. La precisión de estos métodos depende en gran medida del tipo de falla y de la impedancia de la falla, así como de la precisión del modelo de línea, la presencia de circuitos mutuamente acoplados y los parámetros de conexión a tierra de la línea [4-5]. (B) **Algoritmos de dos extremos** utilice fasores de tensión y corriente en ambos extremos de la línea. Pueden subdividirse en métodos que utilizan mediciones sincronizadas con GPS o mediciones no sincronizadas. En general, estos métodos son más precisos que los métodos de un solo extremo, ya que se mitiga la influencia de la impedancia de falla y los circuitos acoplados entre sí. [6-7].

Existe una variedad de algoritmos en función de los datos disponibles, por ejemplo, tensiones de dos extremos y corrientes de un solo extremo, tensiones y corrientes de dos extremos [8-10]. Las principales desventajas de los métodos de un solo extremo o de dos extremos basados en fasores de frecuencia fundamental son las siguientes. Primero, los algoritmos se basan en fasores de frecuencia fundamental, por lo que los resultados de la localización de fallas pueden no ser precisos si el sistema está experimentando transitorios. En segundo lugar, algunos de estos métodos utilizan un modelo de línea de secuencia (secuencia positiva, negativa y cero) que es un modelo aproximado y aumenta el error de localización de fallas. En tercer lugar, la conexión a tierra de la línea generalmente se descuida y esto puede generar errores mayores dependiendo del tipo de falla.

Métodos basados en ondas viajeras: Cuando se inicia una falla en una línea de transmisión, se generan ondas viajeras de alta frecuencia y se propagan hacia ambos terminales de la línea aproximadamente con la velocidad de la luz. En cada discontinuidad, por ejemplo un bus con múltiples líneas, la falla, etc., reflejan y transmiten generando más ondas viajeras. Los métodos basados en ondas viajeras [11-12] monitorean las ondas viajeras y el tiempo de viaje de estas ondas para determinar la ubicación de la falla. Se pueden clasificar en dos grupos: algoritmos de terminación única y algoritmos de terminación doble. (a) **Algoritmos de un solo extremo** utilice señales de tiempo posteriores en una terminal para identificar la ubicación de la falla, incluido el localizador de fallas de Tipo A, C, E y F [13-15]. **Escribe un** mide la diferencia de tiempo entre la llegada del primer frente de onda y su reflexión; **Tipo C** inyecta un impulso de alta frecuencia desde un terminal y mide la diferencia de tiempo entre la llegada de la reflexión y la inyección; **Tipo E y F** son bastante similares con el Tipo C, se espera que los impulsos inyectados se generen al cerrar / abrir el disyuntor en un terminal. (B) **Algoritmos de dos extremos** utilice las diferencias de tiempo entre la llegada del primer frente de onda a ambos terminales para identificar la ubicación de la falla, incluido el localizador de fallas Tipo B y D [14, 16-17]. **Tipo B** mide las diferencias de tiempo enviando señales de parada de un extremo a otro; **Tipo D** es bastante similar con el Tipo B, excepto que usa etiquetado de tiempo sincronizado para aumentar la precisión. Debido a que las ondas viajeras están moduladas por las características dependientes de la frecuencia de la línea, se requiere el procesamiento de señales digitales para identificar el tiempo real de llegada de la onda. Para ello, se aplican diferentes métodos, incluida la Transformación Wavelet (WT) [17-19]. Los métodos basados en ondas viajeras tienen las siguientes desventajas. En primer lugar, la intensidad de las ondas viajeras está muy influenciada por el tiempo de inicio de la falla en relación con el ciclo de frecuencia de potencia. Esto genera el problema de la confiabilidad de la detección de las ondas viajeras. En segundo lugar, requieren instrumentación especial, ya que los TC habituales filtrarán el contenido de alta frecuencia de las ondas viajeras. Relacionado con este tema está la necesidad de muestrear a tasas muy altas. Tercero, la precisión del localizador de fallas depende de la frecuencia de muestreo de las mediciones [20]. Por ejemplo, un sistema con una frecuencia de muestreo de 100 kilo-muestras por segundo (ks / s), podría causar un error sistemático de hasta 0.93 millas con el localizador de fallas tipo D.

Presentamos un método que utiliza instrumentación existente, CT y VT y valores muestreados sincronizados con GPS con mayor precisión en la localización de fallas en las líneas de transmisión. El método utiliza un modelo dinámico de línea de alta fidelidad (modelo trifásico basado físicamente con representación explícita de conexión a tierra) y estimación de estado dinámico. Llamamos a este método el **EBFL (Estado dinámico miestimulaciónDSE) Based Fault Locular**). La idea principal de EBFL es tratar la ubicación de la falla como un parámetro del modelo de línea dinámica y estimar la ubicación de la falla mediante un algoritmo DSE [2122]. El artículo describe los conceptos básicos del método, el modelo dinámico de línea y presenta numerosos experimentos numéricos para cuantificar el rendimiento del método. Si bien el método es igualmente aplicable a los sistemas de transmisión por cable, las discusiones se limitan a

titulares.

9.14 Resumen y conclusiones

A completar.

9.15 Problemas

Problema P9.1: Se utiliza un relé de impedancia para proteger la línea de transmisión de 115 kV ilustrada en la Figura P9.1 con los siguientes parámetros del conductor de fase: Radio = 0.691 pulgadas, Radio medio geométrico = 0.0456 pies y Resistencia = 0.085 ohmios por milla. La longitud de la línea es de 45 millas.

La relación CT del relé de impedancia es 2000: 5 y la relación VT es 69kV: 69V. El ingeniero de relés decide que el relé de impedancia se configurará de la siguiente manera: (a) la zona 1 se configurará para alcanzar el 80% de la longitud de la línea, (b) la zona 2 se configurará para alcanzar el 135% de la línea y (c) la zona 3 se configurará para alcanzar el 100% de la línea más el 125% de la siguiente línea. La longitud más larga de la siguiente línea es de 35 millas. y el diseño es idéntico al de la línea protegida.

Calcule la configuración del relé de impedancia en ohmios (en el lado del relé).

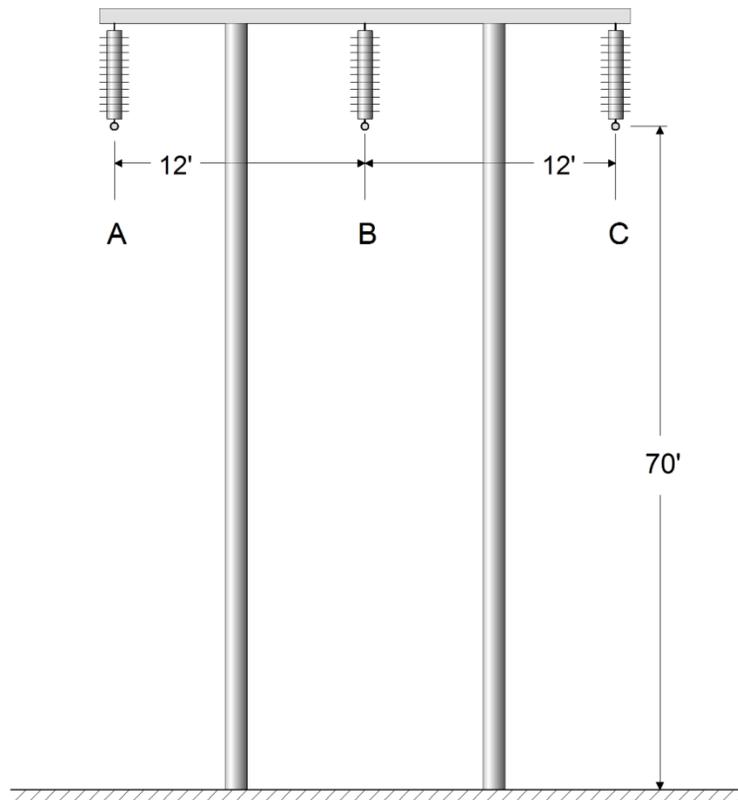


Figura P9.1: Configuración de línea de 115 kV

Solución: Impedancia de línea:

$$z_s = 0,185 \, j1.3756 \quad \text{ohmios / milla}$$

$$z_{\text{metro}} = \left(\frac{1}{3} z_s \right)_{C.A.} = 0,1 \, j0,6708 \quad \text{ohmios / milla}$$

$$Z_1 = z_s \cdot Z_{\text{metro}} = 0.085 \, j0,7048 \quad \text{ohmios / milla}$$

$$Z_{\text{serie}} = 45z_1 = 31,95 \, \text{mi} \, j0,20 \quad \text{ohmios}$$

Por lo tanto, los ajustes de impedancia en el lado de la línea de alimentación son:

$$Z_{zo \, e1} = 25.56 \, \text{mi} \, j^{83.120} \quad \text{ohmios}$$

$$Z_{zo \, e2} = 43,13 \, \text{mi} \, j^{83.120} \quad \text{ohmios}$$

$$Z_{zo \, e3} = 63.01 \, \text{mi} \, j^{83.120} \quad \text{ohmios}$$

Los ajustes de relé en el lado del relé (secundario) se calculan de la siguiente manera. Primero se calcula la transformación de la impedancia a través de los transformadores de instrumentos:

$$Z_{\text{relé}} = \frac{\frac{69}{69,000}}{\frac{5}{2000}} Z_{\text{línea}} = 0,40 Z_{\text{línea}}$$

Entonces, la configuración del relé en el lado secundario es:

$$Z_{\text{relé, zona1}} = 10.220 \, \text{mi} \, j^{83.120} \quad \text{ohmios}$$

$$Z_{\text{relé, zona2}} = 17.252 \, \text{mi} \, j^{83.120} \quad \text{ohmios}$$

$$Z_{\text{relé, zona3}} = 25.204 \, \text{mi} \, j^{83.120} \quad \text{ohmios}$$

Problema P9.2: Se utiliza un relé de distancia para proteger la línea de transmisión de 115 kV de 42.5 millas de largo que se ilustra en la Figura P9.2. Los parámetros del conductor se encuentran en la base de datos del programa WinIGS. La línea está conectada a una fuente trifásica con los siguientes parámetros:

Potencia nominal: 100 MVA, Tensión nominal: 115 kV,

$$Z_1 = j0,035 \, pu, \quad Z_2 = j0,035 \, pu, \quad Z_0 = j0,04 \, pu$$

La relación CT del relé de impedancia es 2000: 5 y la relación VT es 69kV: 69V. El ingeniero de relés decide que el relé de impedancia se configurará de la siguiente manera: (a) la zona 1 se configurará para alcanzar el 80% de la línea, (b) la zona 2 se configurará para alcanzar el 135% de la línea y (c) la zona 3 se configurará para alcanzar el 100% de la línea más el 125% de la siguiente línea. La longitud más larga de la siguiente línea es de 35 millas y el diseño es idéntico al de la línea protegida.

(a) Calcule los ajustes del relé de impedancia en ohmios (redondeados al primer punto decimal) y la fase de la impedancia en grados (redondeados a un número entero de grados). Seleccione el factor de compensación (redondeado al primer punto decimal) y los retrasos de tiempo para cada zona. Para estos cálculos, suponga una resistividad del suelo de 100 ohmios metros.

(b) Si la resistividad del suelo varía de 10 ohm.metros a 3000 ohm.metros, cuál será la diferencia en los cálculos de distancia cuando la línea real a la falla a tierra esté a una distancia de 34 millas del relé. Sugerencia: determine lo que el relé calculará como "distancia a la falla" cuando la resistividad del suelo sea de 10, 500 y 3000 ohmios. Metros y grafique los resultados.

Se recomienda el uso de programWinIGS para resolver este problema.

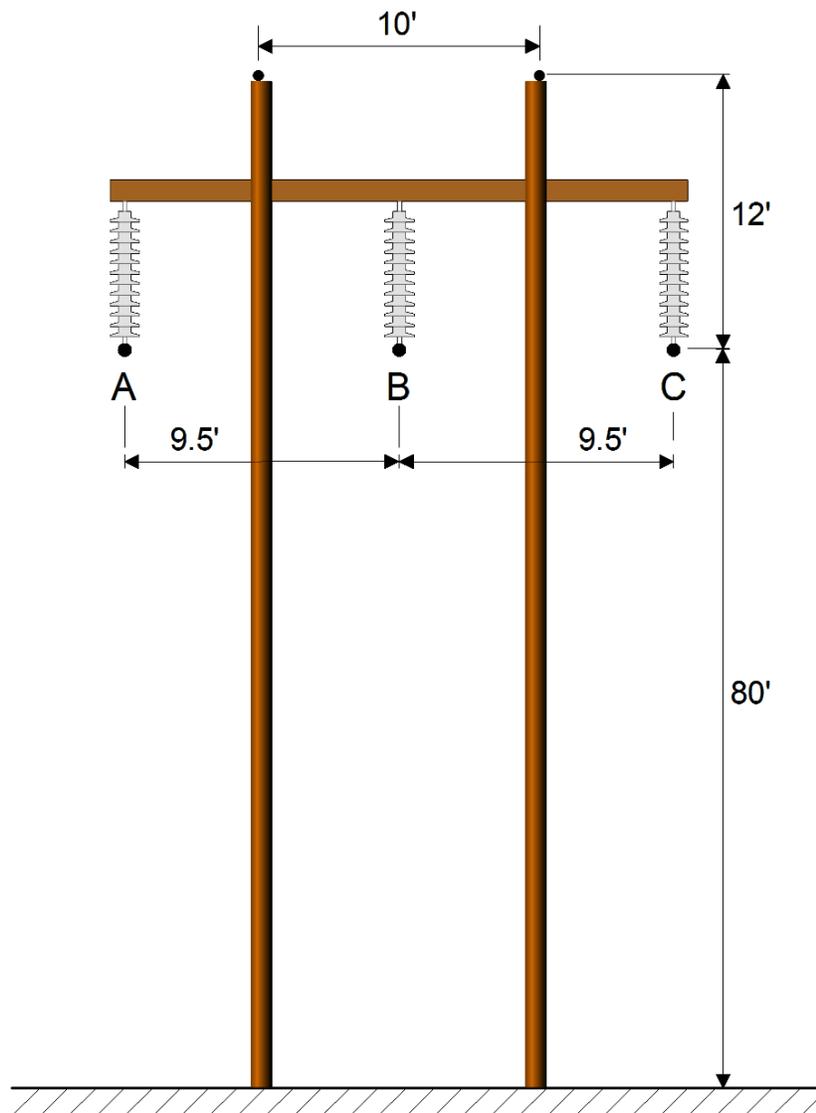
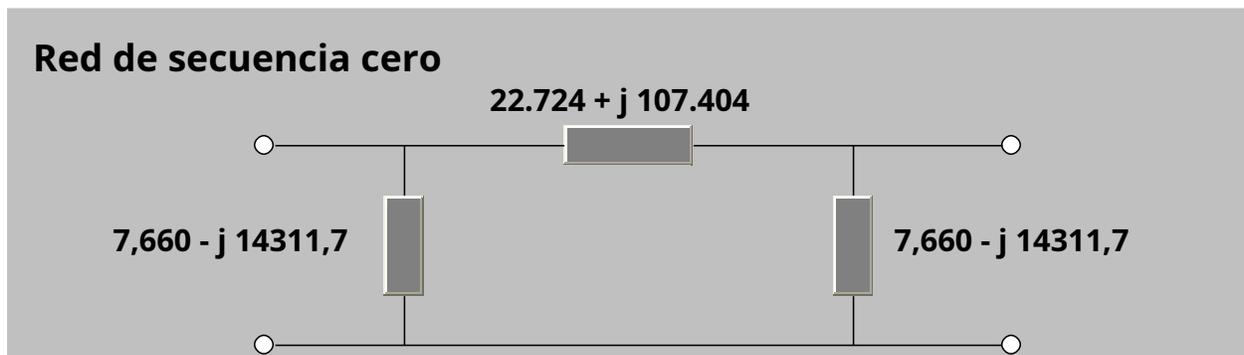
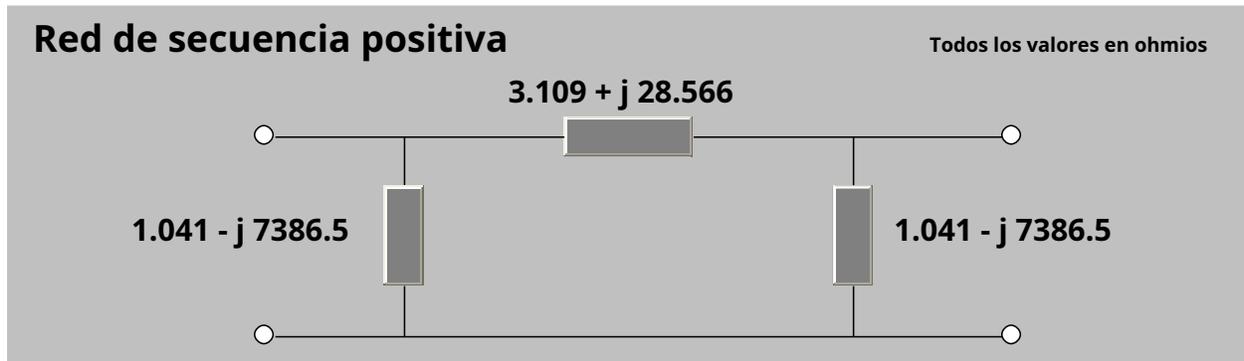


Figura P9.2: Línea aérea de transmisión de 115 kV

(Conductores de fase: ACSR, BITTERN, Alambres blindados: HS, 5/16, resistencia de tierra de la torre = 0.25x resistividad del suelo, Longitud del tramo = 0.075 millas)

Solución: (a) Primero se modela el sistema en formato WinIGS y las impedancias de secuencia del línea son:



El factor de compensación es:

$$\frac{22.724 + j107.404}{3.109 + j28.566} = 2.8236 \text{mi } j1.7520$$

Los ajustes del relé son:

Zona 1: ajuste de impedancia: $z_1 = (0,8) (28,7719 \text{mi } j_{83,78}^0) \frac{0,001}{0,0025} = 9.207 \text{mi } j_{83,78}^0 \text{ ohmios. Seleccione 9.2}$

ohmios, 84 grados, factor de compensación = 2,8 y retardo de tres ciclos.

Zona 2: ajuste de impedancia: $z_1 = (1,35) (28,7719 \text{mi } j_{83,78}^0) \frac{0,001}{0,0025} = 15.5368 \text{mi } j_{83,78}^0 \text{ ohmios. Seleccione}$

15,5 ohmios, 84 grados, factor de compensación = 2,8 y retardo de 15 ciclos.

Zona 3: ajuste de impedancia: $z_1 = (2,25) (28,7719 \text{mi } j_{83,78}^0) \frac{0,001}{0,0025} = 25.895 \text{mi } j_{83,78}^0 \text{ ohmios. Seleccione}$

25,9 ohmios, 84 grados, factor de compensación = 2,8 y retraso de treinta ciclos.

(b) Utilizando el modelo WinIGS, se calcularon las corrientes de falla para la falla de fase a tierra (en la fase A) a una distancia de 34 millas del relé y para las siguientes resistividades del suelo: 10, 100, 500 y 3000 ohmios. . Las distancias resultantes (o impedancias calculadas por el relé son:

$$\text{Caja del medidor de 10 ohmios: } z = \frac{\tilde{V}}{I_a m_i z} = \frac{59,51 \text{ mi}_{j1,11}}{1,440 \text{ mi}_{j80,49} (2,8) 0,486 \text{ mi}_{j80,61}} = 21,25 \text{ mi}_{j79,44} \text{ ohmios}$$

En el lado del relé: $z = 8,5 \text{ mi}_{j79,44} \text{ ohmios}$. Este punto está en la zona 1 y la distancia es de 31,39 millas.

$$\text{Caja del medidor de 100 ohmios: } z = \frac{\tilde{V}}{I_a m_i z} = \frac{60,12 \text{ mi}_{j1,21}}{1,323 \text{ mi}_{j78,57} (2,8) 0,447 \text{ mi}_{j78,74}} = 23,35 \text{ mi}_{j77,44} \text{ ohmios}$$

En el lado del relé: $z = 9,34 \text{ mi}_{j77,44} \text{ ohmios}$. Este punto está en la zona 2 y la distancia es de 34,49 millas.

$$\text{Caja del medidor de 500 ohmios: } z = \frac{\tilde{V}}{I_a m_i z} = \frac{60,54 \text{ mi}_{j1,35}}{1,246 \text{ mi}_{j76,33} (2,8) 0,422 \text{ mi}_{j76,55}} = 24,94 \text{ mi}_{j75,09} \text{ ohmios}$$

En el lado del relé: $z = 9,976 \text{ mi}_{j75,09} \text{ ohmios}$. Este punto está en la zona 2 y la distancia es de 36,84 millas.

$$\text{3000 ohmios caja del medidor: } z = \frac{\tilde{V}}{I_a m_i z} = \frac{61,08 \text{ mi}_{j1,67}}{1,161 \text{ mi}_{j71,57} (2,8) 0,393 \text{ mi}_{j71,87}} = 27,01 \text{ mi}_{j70,04} \text{ ohmios}$$

En el lado del relé: $z = 10,804 \text{ mi}_{j70,04} \text{ ohmios}$. Este punto está en la zona 2 y la distancia es de 39,89 millas.

Problema P9.3 Considere el sistema de energía eléctrica de la figura P9.3a. Cada línea de transmisión está protegida con dos relés mho de tres zonas (uno en cada terminal de la línea). Todas las líneas indicadas son idénticas, como se ilustra en la Figura P9.3b. Las dos líneas paralelas están a una distancia de 107 pies de centro a centro. Las longitudes de las líneas son: 72 (línea en el lado izquierdo), 58 (las dos líneas paralelas), 72 y 82 millas respectivamente. La tensión de funcionamiento del sistema es de 230 kV. La relación de transformación de los TC es 2000: 5 mientras que la relación para los transformadores potenciales es 135.000: 115.

(a) Determine los ajustes para las tres zonas del relé mho R_1 . Uso: zona 1: 80%, zona 2: 125%, zona 3: longitud de línea más 125% de la siguiente línea.

(b) Para una falla de línea única a tierra (SLGF) en la ubicación indicada, determine si el relé R_1 disparará el interruptor. El SLGF se encuentra a 51 millas del relé R_1 .

(c) La clasificación de emergencia de 10 minutos de la línea 2 es 1600 A. En una condición de emergencia específica, el La línea está cargada a 1600 A y el voltaje en la ubicación del relé R_1 ha bajado a 0,92 pu. Determine si el relé mho se disparará en este caso. La carga de la línea tiene un factor de potencia de 0,90 (retraso actual).

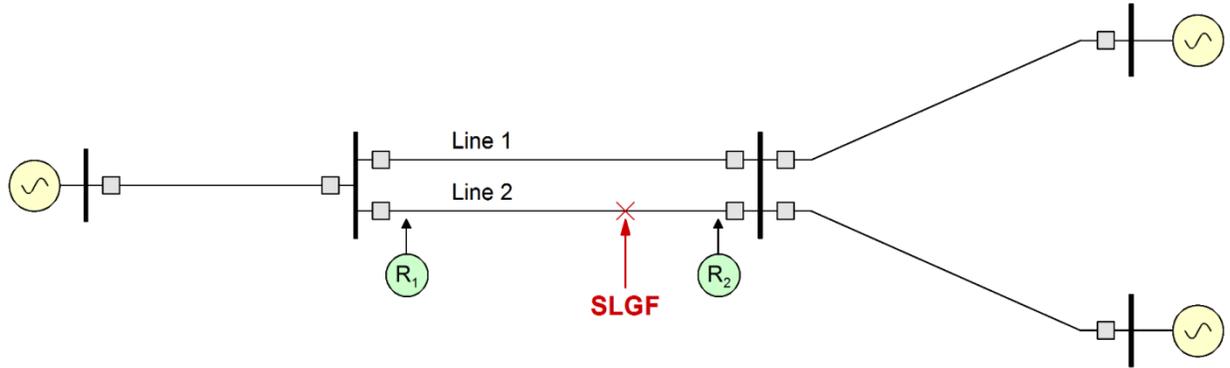


Figura P9.3a

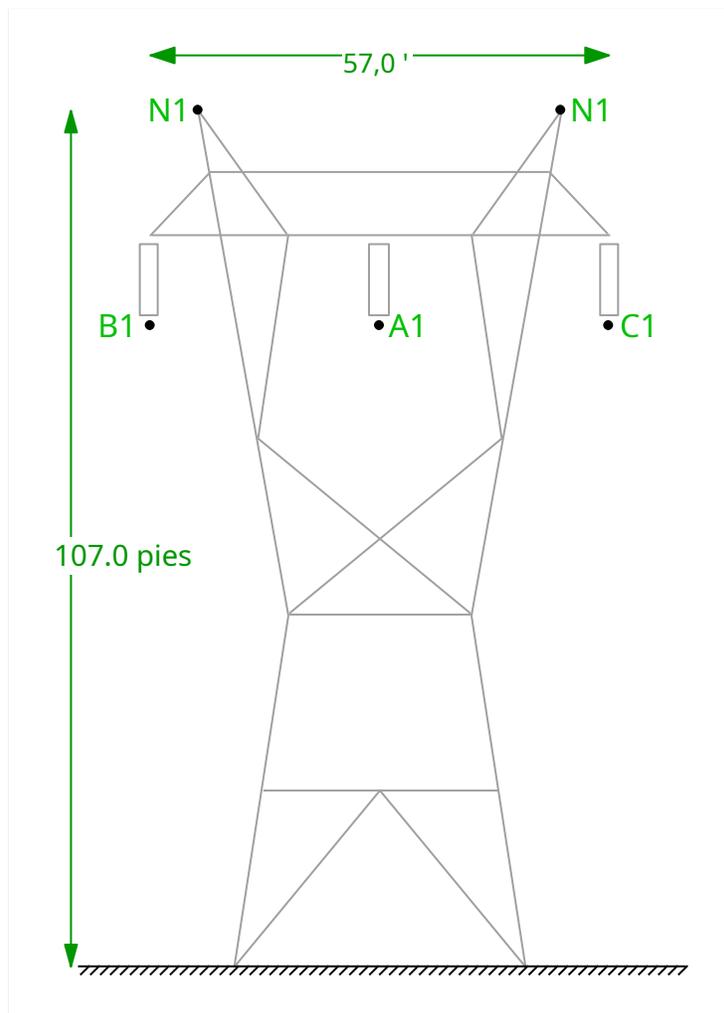
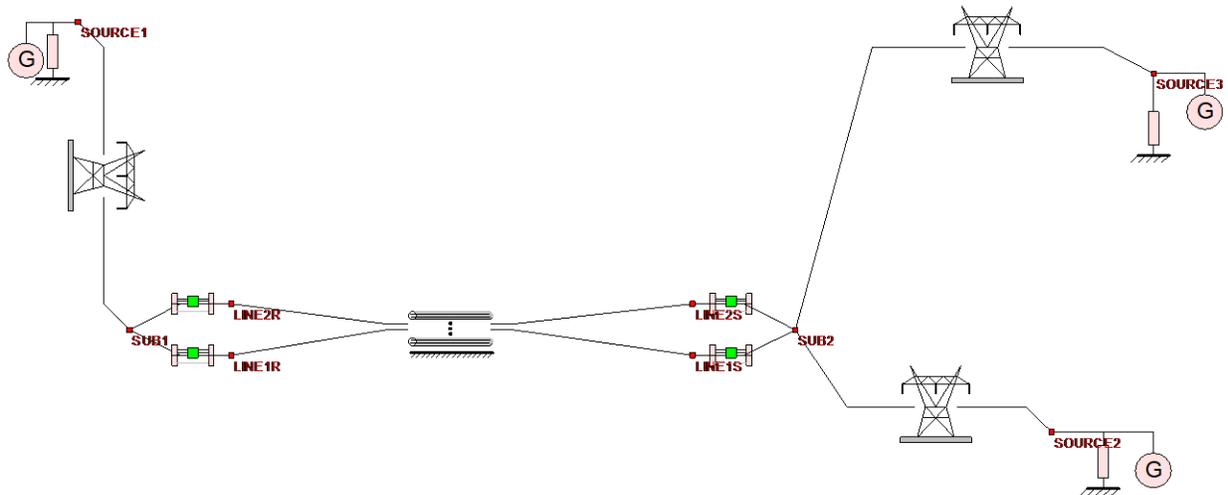


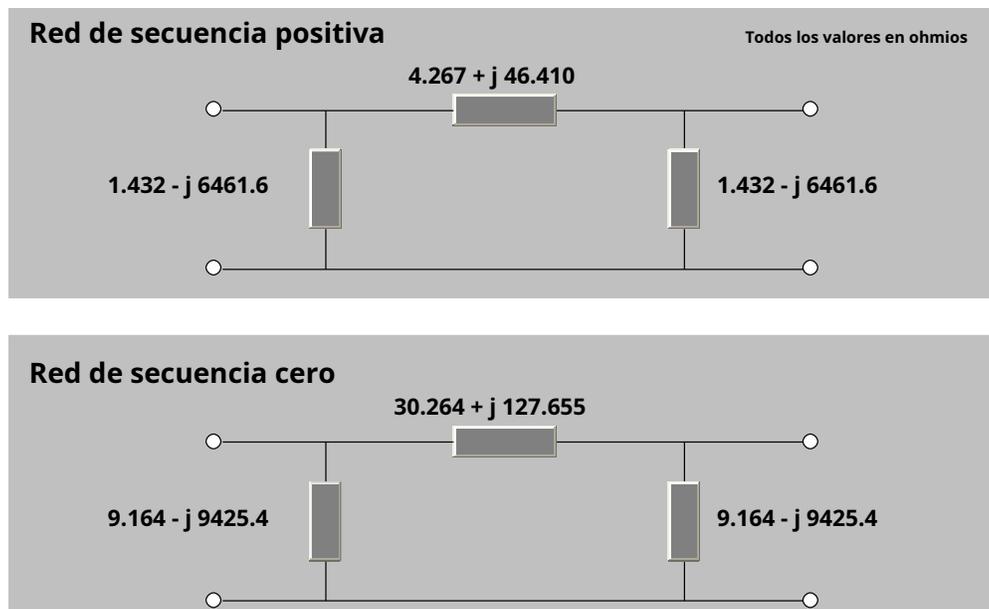
Figura P9.3b

(Conductores de fase: ACSR, BITTERN, Alambres blindados: HS, 5/16)

Solución: Este problema se resuelve con la ayuda del programa WinIGS. El sistema está modelado y el modelo WinIGS se muestra en la siguiente figura.



Los parámetros de secuencia de la línea son:

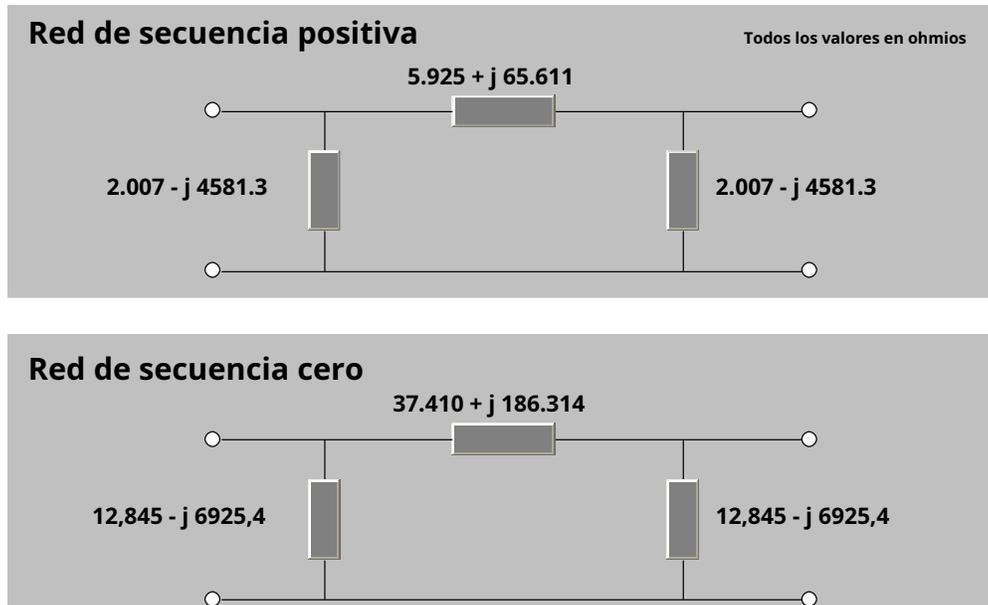


Los ajustes son:

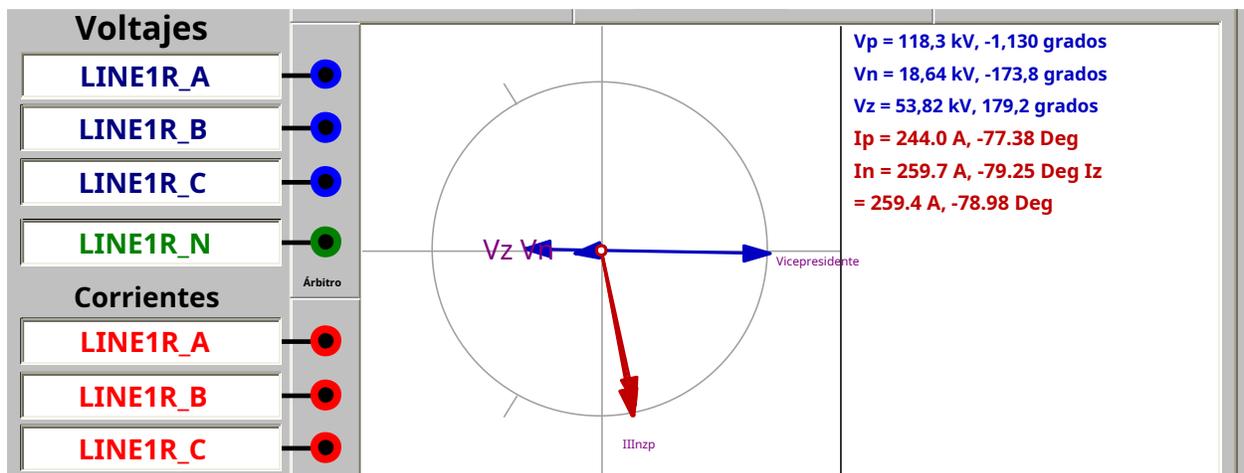
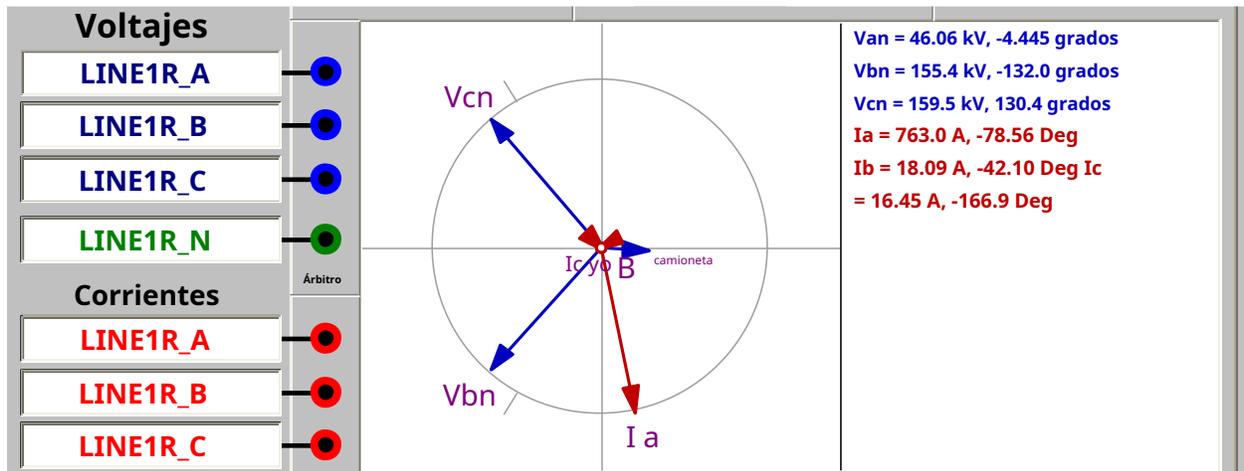
Zona 1: 37,28 ohmios en el lado de la línea, 12,7043 ohmios en el relé, seleccione 13 ohmios. El ángulo de fase es 84,7469 grados, seleccione 85 grados. Retardo: Uso: 4 ciclos. El factor de compensación es 1.815, seleccione $m = 1.8$

Zona 2: 58.25 ohmios en el lado de la línea, 19.8505 ohmios en el relé, seleccione 20 ohmios. El ángulo de fase es 84,7469 grados, seleccione 85 grados. Retraso: Uso: 15 ciclos. El factor de compensación es 1.815, seleccione $m = 1.8$.

Zona 3: $46.6057 + (1.25)(65.878) = 128.9532$ ohms en el lado de la línea, 43.9393 ohms en el relé, seleccione 45 ohms. Ángulo de fase, seleccione 85 grados. Retraso: Uso: 30 ciclos. El factor de compensación es 1.815, seleccione $m = 1.8$. Las impedancias de la siguiente línea más larga se dan a continuación.



(b) El análisis de fallas para este caso se muestra a continuación.



La impedancia vista por el relé será:

$$(2.9348) Z_{relé} \sim \frac{\tilde{V}_a}{I_a (1,8) \tilde{I}_0} = \frac{46.06 mi_{j4.4450}}{0,763 mi_{j78,560} (1,8) (0,2594 mi_{j8,980})} = 45.05 mi_{j4.20}^{7.1} ohmios$$

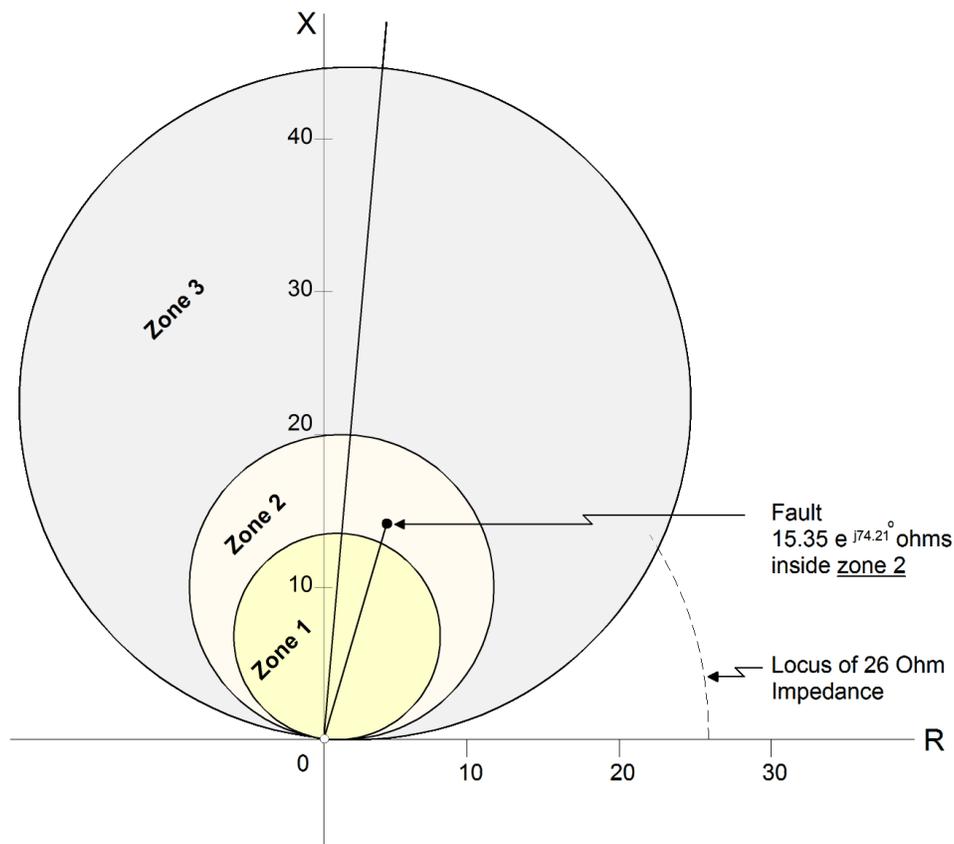
0 15,35 ohmios. El relé se disparará en la zona 2 (consulte la figura siguiente). Tenga en cuenta que para esta distancia debería haberse disparado en la zona 1. Tenga en cuenta también que la fase de la impedancia "vista" por el relé es diferente a la impedancia de línea (74 grados frente a 85 grados).

(c) En este caso, el relé verá una impedancia de

$$(2.9348) Z_{res unly} = \frac{(0,92) (230) \sqrt{3}}{1,6} = 76,35 mi_{j250} ohmios$$

$$Z_{relé} = 26.016 mi_{j250} ohmios$$

0 26 ohmios. Dependiendo del factor de potencia, esta impedancia puede caer dentro de la zona 3. La siguiente figura muestra el lugar geométrico de la impedancia de 26 ohmios. Tenga en cuenta que cuando el factor de potencia es aproximadamente 0,5 (muy bajo), la impedancia entrará en la zona 3 (invasión de carga). Por poder factores por encima de 0,5 la impedancia estará fuera de la región operativa.



Problema P9.x: Considere el sistema de energía eléctrica de la Figura P9.x. Suponga que un relé de sobrecorriente de tiempo está ubicado en la ubicación indicada de la línea de transmisión 1. La relación CT del relé es 1500: 5. Los ajustes del relé son: característico: muy inverso, corriente de arranque = 8 A, dial de tiempo = 1.

Para una condición específica cercana a la falla, las corrientes eléctricas en la línea de transmisión en la ubicación de el relevo son: $y_{oa} = 845A$, $y_{ob} = 931A$ y $y_{oc} = 16,429A$. Calcule el tiempo de disparo del relé de sobreintensidad de tiempo.

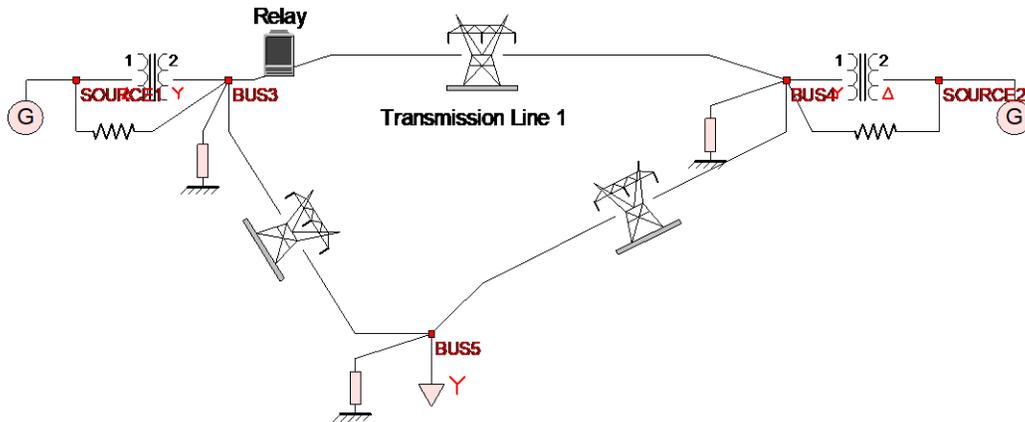


Figura P9.x

Solución: El tiempo de disparo estará determinado por la fase C (corriente más alta). La corriente en el lado del relé es:

$$I_{c, \text{relé}} = 16,429 \frac{5}{1500} = 54,76 \text{ UNA} . \text{ Por lo tanto: } I_r = \frac{54,76 \text{ A}}{8.0 \text{ A}} = 6.845$$

Usando la curva muy inversa, el tiempo de disparo es:

$$t = \frac{19,61}{I_r^2} = 0,491 t_D = 0.918 \text{ segundos}$$

Problema P9.x: Considere el sistema de energía eléctrica de la Figura P9.xa. Cada línea de transmisión es protegido con relés mho de tres zonas (uno en cada extremo de la línea). Todas las líneas indicadas son idénticas; el diseño de las líneas se muestra en la Figura P9.xb. Los conductores de fase son ACSR, BITTERN y los cables blindados son ALUMOWELD, 3 # 7AW. La resistencia de tierra de la torre es de 35 ohmios. La resistividad del suelo es de 185 ohmios. Las dos líneas 1 y 2 están en el mismo derecho de paso separadas por 60 pies (línea central a línea central). Las longitudes de las líneas son: 72, 58, 72 y 82 millas como se indica en la Figura P9.xa. La tensión de funcionamiento del sistema es de 230 kV. La relación de transformación de los TC es 2000: 5 mientras que la relación para los transformadores potenciales es 135.000: 115.

(a) Determine los ajustes para las tres zonas del relé mho R_1 . Utilice la práctica típica como se describe en las notas.

(b) Para una falla monofásica a tierra en la ubicación indicada, determine qué zona del relé R_1 disparará el interruptor. La falla está ubicada a 45.1 millas del relé R_1 .

(c) La calificación de emergencia de 10 minutos de la línea 2 es 1,600 A. En una condición de emergencia específica, el La línea está cargada a 1600 A y el voltaje en la ubicación del relé R_1 ha bajado a 0,92 pu. Determine si el relé mho se disparará en este caso.

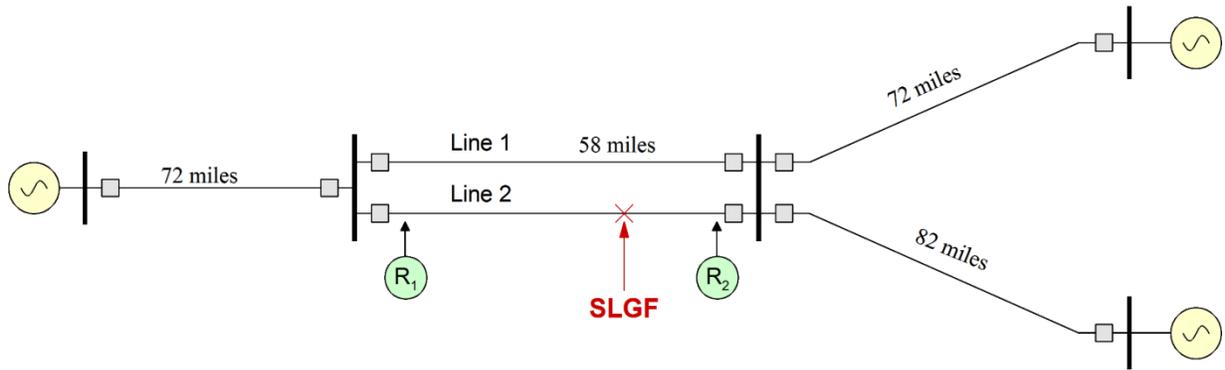


Figura P1a

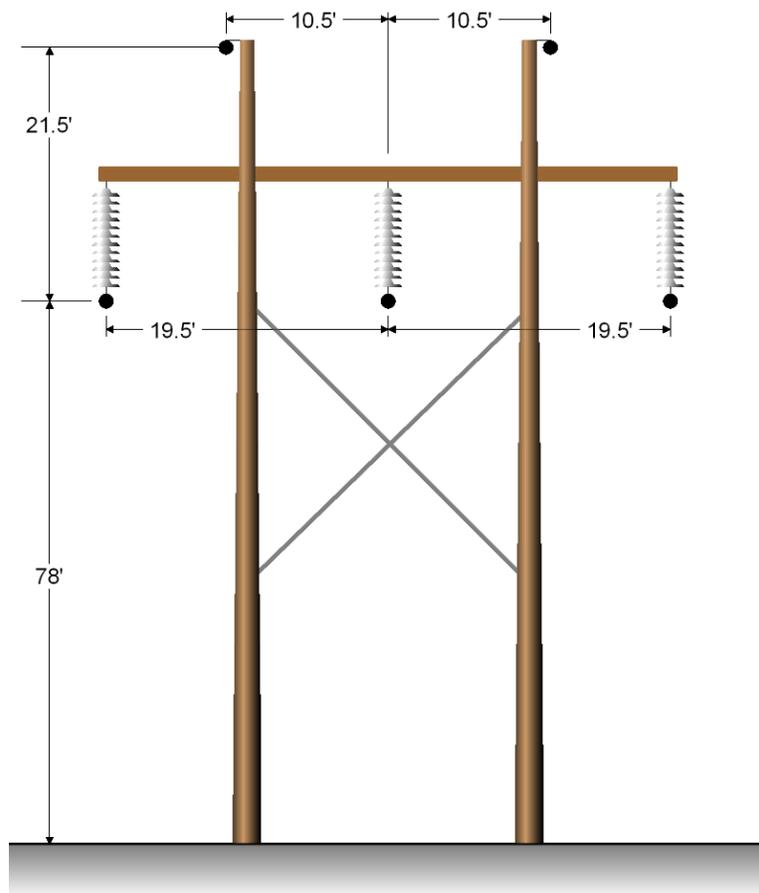
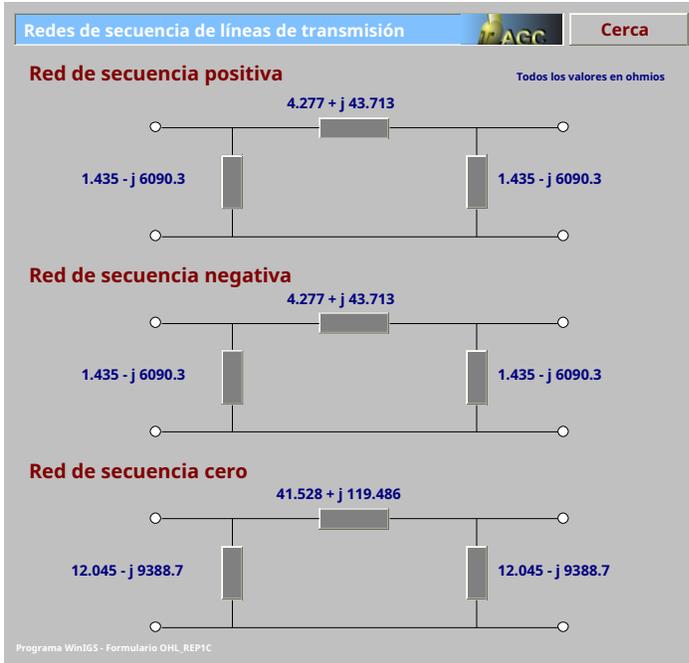
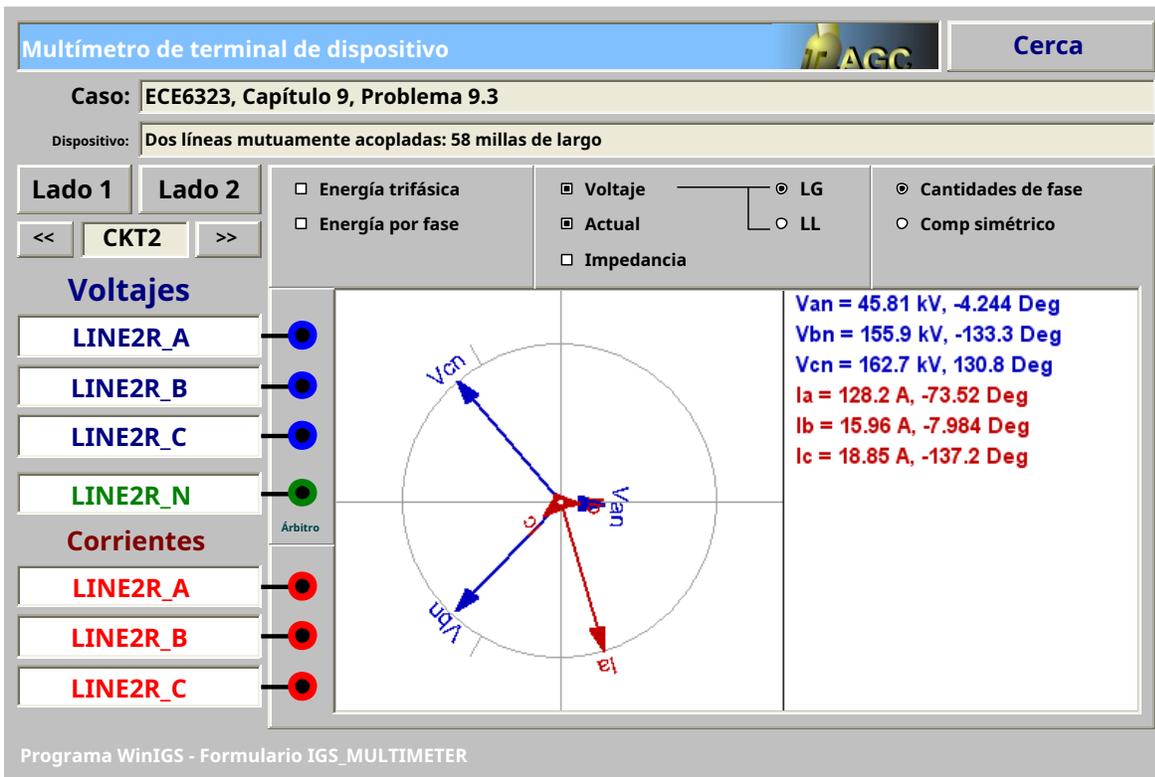
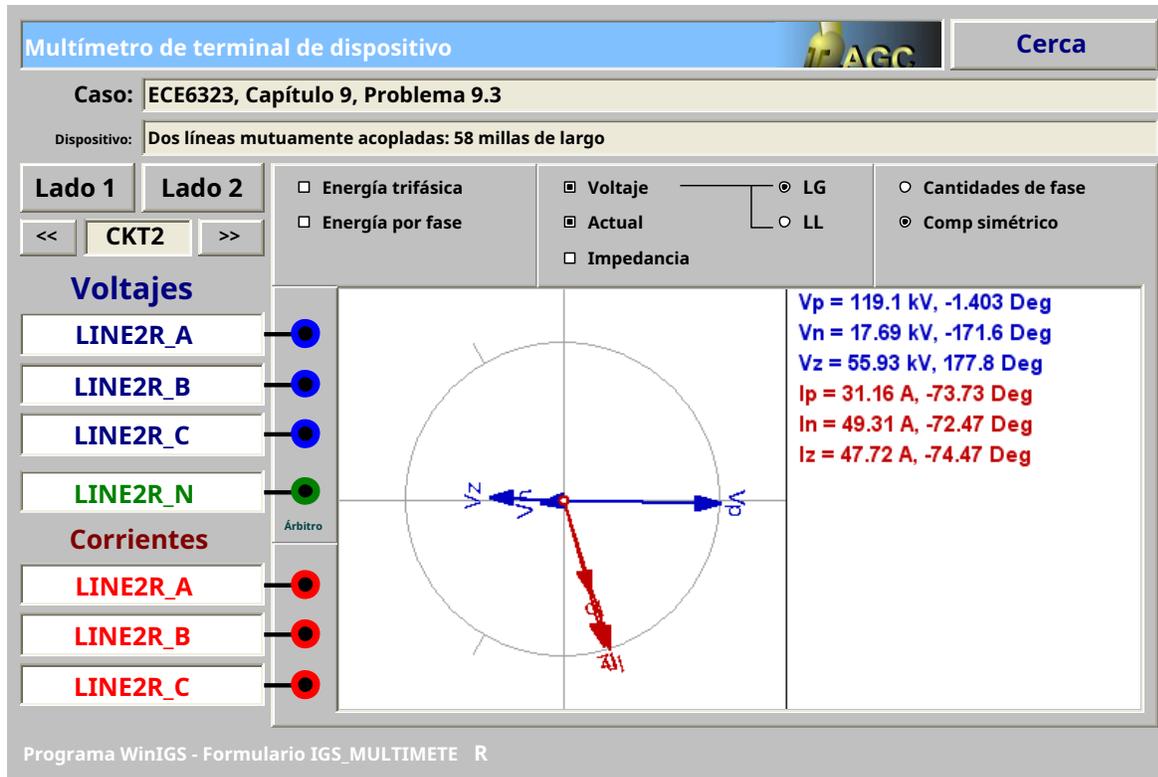


Figura P1b



Voltajes y corrientes en la ubicación del relé para una falla a 45 millas del relé.





(a)

$$Z_{relé} = \frac{V_R}{I_R} = \frac{V_L V}{I_K I} = 0.3407 Z_{Línea}$$

$$Z_{1, LineTotal} = 4.277 + j43.713 = 43.921 \text{ mi}^{j84.412^\circ}$$

$$\underset{\text{metro}}{Z_0} = \frac{Z_0}{Z_1} = 1.922 \text{ mi}^{j20.59^\circ}$$

Zona 1: seleccione 80%, redondeo a ohmios y grados

$$Z = 12 \text{ mi}^{j85^\circ} \underset{\text{metro}}{2.0}, \text{ instantáneo}$$

Zona 2: seleccione 125%, redondeo a ohmios y grados

$$Z = 19 \text{ mi}^{j85^\circ} \underset{\text{metro}}{2.0}, \text{ retardo de tiempo} = 12 \text{ ciclos}$$

Zona 3: seleccione 100% + 125% de la siguiente línea más corta

$$Z = 37 \text{ mi}^{j85^\circ} \underset{\text{metro}}{2.0}, \text{ retardo de tiempo} = 30 \text{ ciclos}$$

(b) Falla SLG a 45 millas. Consulte los resultados de WinIGS. El relé verá:

$$Z = \frac{45.800 \text{ mi } j^{4.2440}}{128,2 \text{ mi } j^{73,520} (2,0) 47,72 \text{ mi } j^{74,470}} (0.3407) 69,78 \text{ mi } j^{78.24850}$$

El relé no verá la falla

(c) En este caso, el relé verá:

$$Z = \frac{(0,92) (230 \text{ kV}) \sqrt{3}}{1,6 \text{ kA}} (0.3407) \text{ mi } j 26.01 \text{ mi } j$$

Es posible que el relé se dispare en la zona 3 por un factor de potencia específico.

Problema P9.x: Se utiliza un relé de distancia para proteger la línea de transmisión de 500 kV de 235 millas de largo que se ilustra en la Figura P9.x. Los parámetros del conductor se encuentran en la base de datos del programa WinIGS. Los parámetros de secuencia de la línea se proporcionan en la Figura P9.xa. La línea está conectada a una fuente trifásica con los siguientes parámetros:

Potencia nominal: 100 MVA, Tensión nominal: 500 kV,
 $Z_1 j0,006 pu$, $Z_2 j0,006 pu$ $Z_0 j0,004 pu$

Impedancia de tierra = 1,0 ohmios La

relación CT de la impedancia el relé es 3000: 5 y la relación PT es 298 kV: 115 V. La

El factor de compensación se selecciona para que sea:

$$\text{metro } \frac{Z_0 Z_1}{Z_1} \frac{(91.162 - j373.977) (7.545 j130.219)}{7.545 j130.219} 1.9027 j0.5319 1.9756 \text{ mi } j^{15.6180}$$

El ingeniero de relés decide configurar el relé de impedancia de la siguiente manera:

- (a) zona 1: $z = 24$ ohmios, $m = 1.975$, ángulo = -15.62 grados, instantáneo
- (b) zona 2: $z = 38$ ohmios, $m = 1.975$, ángulo = -15.62 grados, retardo de 12 ciclos
- (c) zona 3: $z = 75$ ohmios, $m = 1.975$, ángulo = -15,62 grados, retraso de 30 ciclos.

(a) Una falla monofásica a tierra a una distancia de 180 millas a lo largo de la línea desde la ubicación del relé produce la corriente de falla indicada en la figura P9.xb. Los voltajes y corrientes en la ubicación del relé se proporcionan en la Figura P9.xc. Determine qué "verá" el relé, si se disparará y si se disparará en qué zona.

(b) Suponga una condición de operación en la cual los conductores de fase llevan una corriente eléctrica igual al 115% de la ampacidad de los conductores de fase (obtenga la ampacidad del conductor de la base de datos en el programa WinIGS), el voltaje en la ubicación del el relé de distancia es del 93% y el factor de potencia es de 0,9 con retraso actual. Determine si se disparará el relé de distancia.

Se recomienda el uso de programWinIGS para resolver este problema.

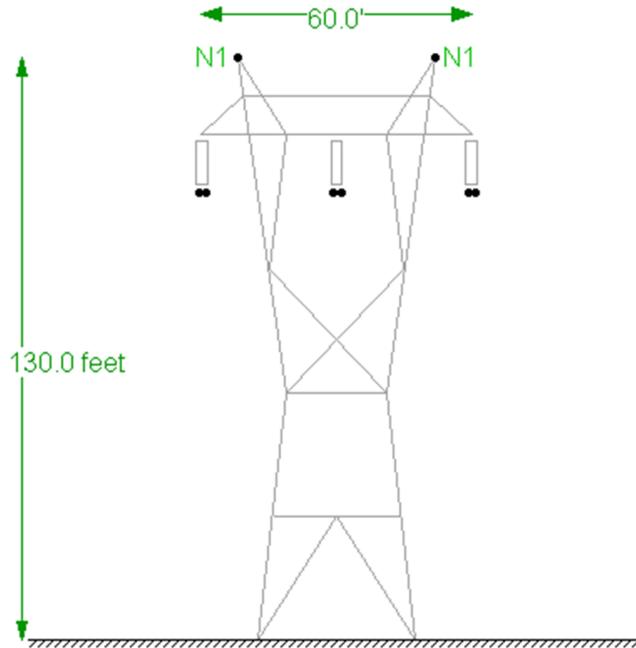
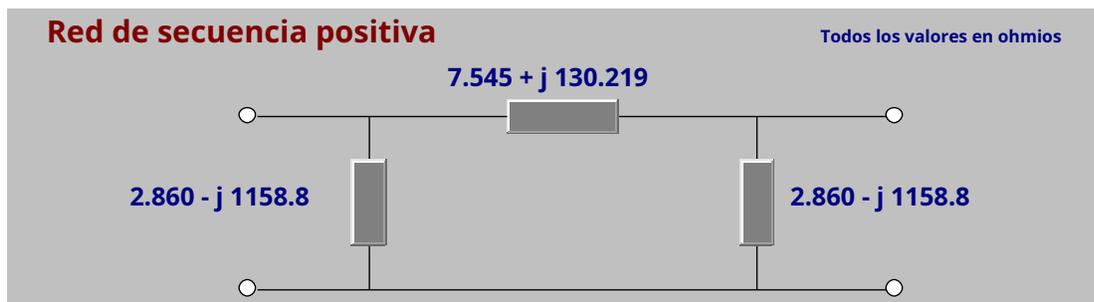


Figura P9.x

(Torre: AGC-T-500B, Conductores de fase: Paquete ACSR, BITTERN, dos subconductores por fase, separación de 18 pulgadas, Alambres de protección: HS, 5/8, resistencia de tierra de la torre = 25 ohmios, resistividad del suelo = 175 ohm. Metros, Lapso longitud = 0.12 millas)



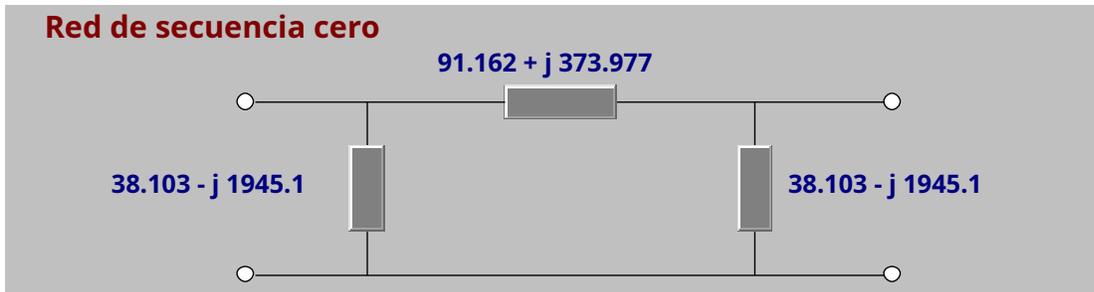
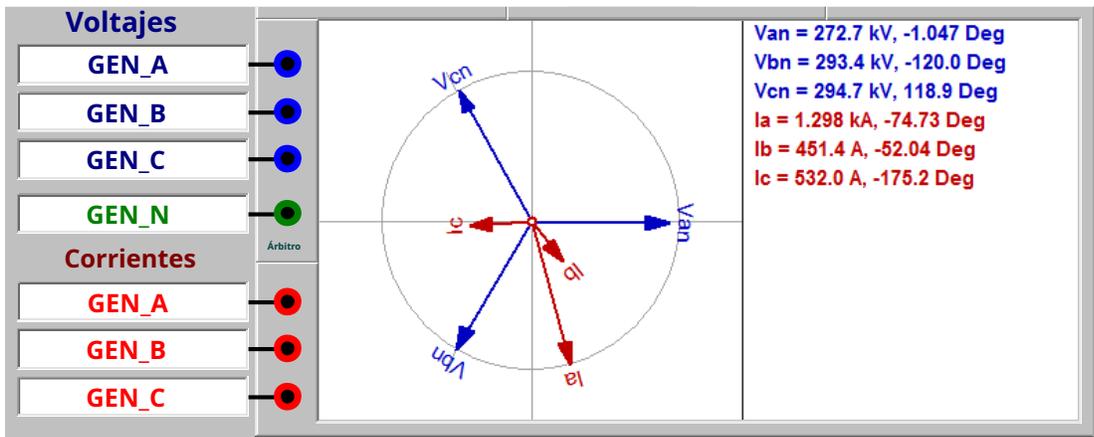


Figura P9.xa

Corriente de falla	Magnitud (kA)	Fase (grados)
FAULTBUS_A	1.5410	104.0058
Relación X / R	3.2500	Diagrama
Frecuencia (Hz)	60.0000	Cerca

Figura P9.xb



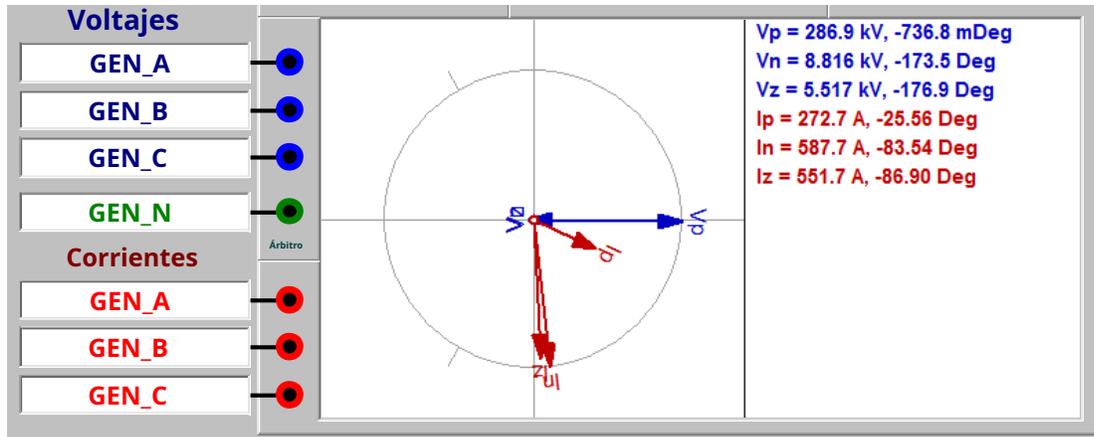


Figura P9.xc

Solución: (a) Utilizando los datos proporcionados, se calcula lo siguiente.

La impedancia en la ubicación del relé es

$$Z = \frac{\tilde{V}_a}{\tilde{I}_a} = \frac{272,7 \text{ mi}_{j1,047} \text{ kV}}{1,298 \text{ mi}_{j74,73} (1,9027 \text{ j}0,5319) 0,5517 \text{ mi}_{j86,9} \text{ kA}} = 7,5025 \text{ j}117,37 \text{ 117,6095 mi}_{j86,3425}$$

La impedancia en el lado del relé es

$$Z_{\text{relé}} = Z \frac{PT_1}{\text{Connecticut}_1} = 117,6095 \text{ mi}_{j86,3425} \frac{115/298 \text{ k}}{5/3000} = 27,2317 \text{ mi}_{j86,34}^{25}$$

Por lo tanto, el relé se disparará en la zona 2.

(b) La ampacidad de la línea de transmisión es 1155 UNA.

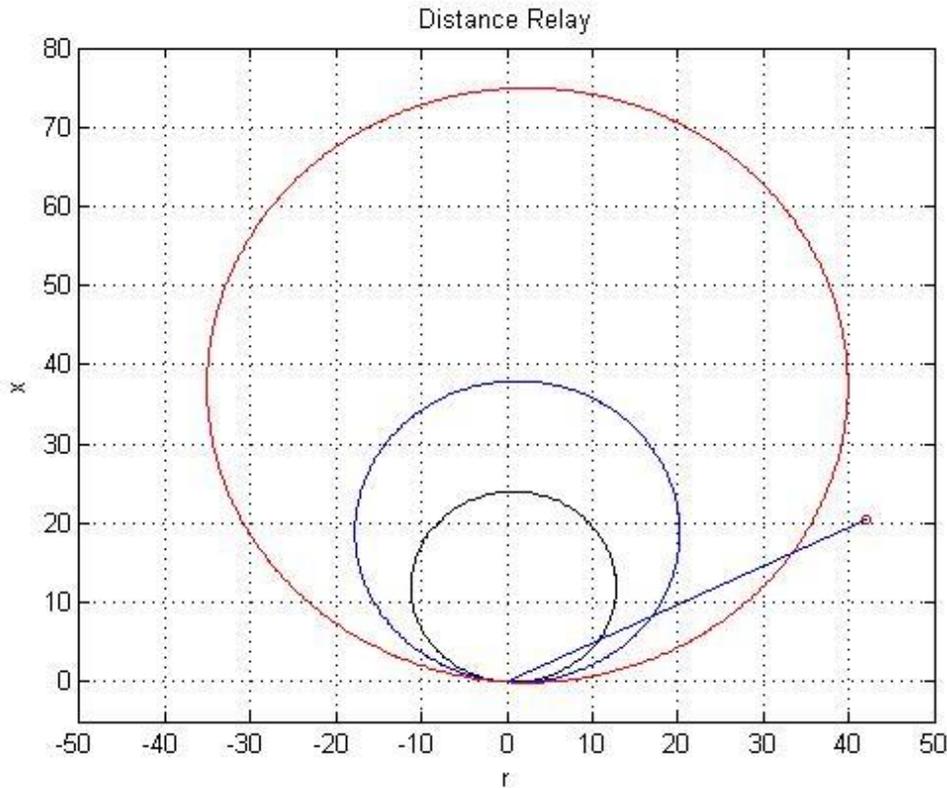
La impedancia en la ubicación del relé es

$$Z = \frac{\tilde{V}_a}{\tilde{I}_a} = \frac{0,93500 \text{ mi}_{j0} \text{ 13 kV}}{115\% \text{ 1,155 mi}_{j \arccos 0,9} \text{ kA}} = 202,1215 \text{ mi}_{j25,8419}$$

La impedancia en el lado del relé es

$$Z_{\text{relé}} = Z \frac{PT_1}{\text{Connecticut}_1} = 202,1215 \text{ mi}_{j25,8419} \frac{115/298 \text{ k}}{5/3000} = 46,7999 \text{ mi}_{j25,8419}$$

La relación de la zona de protección y la impedancia es la siguiente,



Por lo tanto, el relé no se disparará.

Problema P9.x: Para problemas de estabilidad y capacidad de transferencia de energía de líneas de transmisión aéreas largas, muchas veces la línea se compensa con condensadores en serie. El valor de los condensadores en serie se expresa normalmente como compensación porcentual. Una línea compensada al 30% significa que el valor absoluto de la impedancia del condensador en serie es el 30% del valor absoluto de la impedancia de la línea (secuencia positiva).

Considere una línea aérea de 500 kV con una longitud total de 120 millas y una compensación del 35%. Suponga que la línea tiene relés de distancia en las dos terminales. Describa y comente el funcionamiento de la retransmisión a distancia para esta línea y los problemas que pueden existir.

Problema P9.x: Se aplica un esquema diferencial de línea a una línea de transmisión de 72 millas que utiliza comunicaciones de fibra óptica. Los relés en los dos extremos digitalizan las medidas de corriente y transmiten los datos a través de la fibra óptica. Cada relé realiza la función diferencial de línea. Determine la configuración de la función diferencial de línea.

Datos dados: (1) tiempo de latencia debido al procesamiento de datos por relé: 0.1 ms, (2) tiempo de transmisión por fibra: 1.6 ms, y (3) el voltaje de operación de la línea es de 230 kV y el diseño se muestra en la figura debajo.

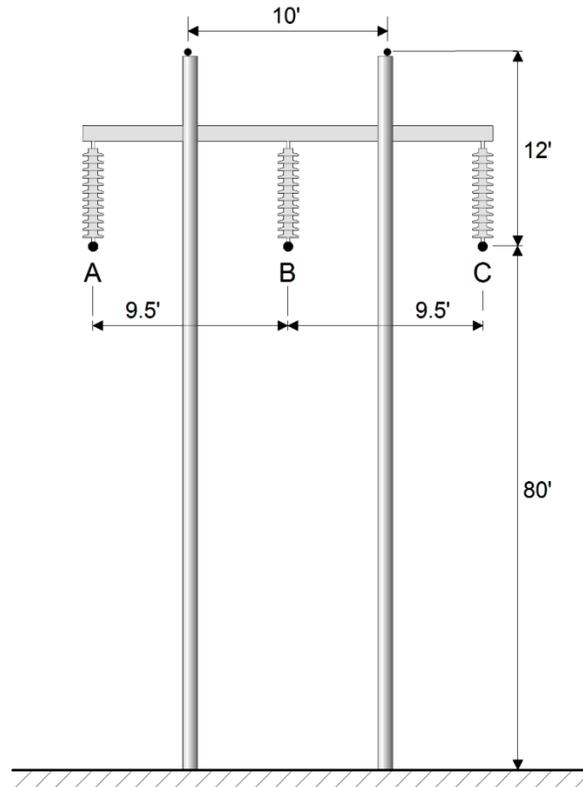


Figura P9.x

(Conductores de fase: ACSR, BITTERN, Alambres blindados: HS, 5/16, resistencia de tierra de la torre = $0.25x$ resistividad del suelo, Longitud del tramo = 0.075 millas)

Problema P9.x: Considere la línea trifásica de 500 kV, línea compensada en serie como se ilustra en la Figura P9.x. Se utiliza un relé de distancia de dos zonas para proteger esta línea en el lado A indicado de la línea. Se desea configurar la zona 1 del relé para que se dispare instantáneamente por fallas a lo largo de la línea, pero no para que dispare por fallas en el punto B o más allá. También se desea configurar la zona 2 del relé para que se dispare por cualquier falla en cualquier lugar de la línea y al menos un 20% más allá del punto B.

La relación CT del relé de impedancia es 3000: 5 y la relación PT es 300 kV: 115 V.

(a) Seleccione la configuración para las dos zonas. Deben determinarse los siguientes ajustes (en lado del relé):

(1) zona 1: $z =$ ____ ohmios, ángulo de fase = ____ grados, $m =$ ____, instantáneo,

(2) zona 2: $z =$ ____ ohmios, ángulo de fase = ____ grados, $m =$ ____, retardo de 12 ciclos.

(b) Suponga una falla de fase A a neutro en la barra B. Calcule la impedancia "vista" por el relé. Proporcione un esquema de las características del relé (con sus selecciones en (a)) y superponga la impedancia "vista" por el relé para esta falla. La fuente en A tiene los siguientes parámetros: voltaje: 500 kV, LL, impedancia de secuencia negativa y pos. = $j12$ ohmios, impedancia de secuencia cero = $j16$ ohmios.

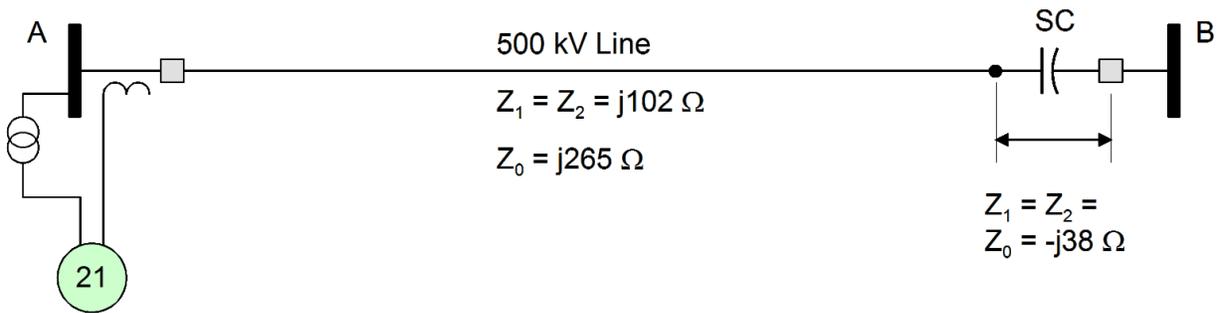


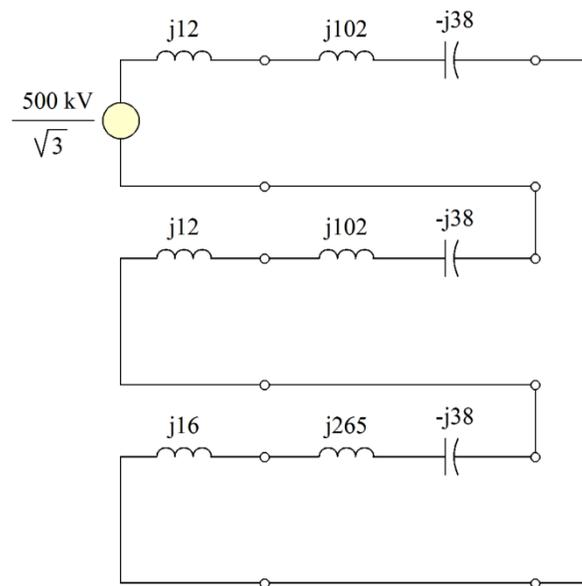
Figura P9.x

Solución: Parte a:

Para evitar disparos instantáneos por fallas cerca del bus B, configuramos la zona 1 para que alcance una distancia de $(102-38)/102 \times 100 = 62.75\%$. La Zona 2 se configurará para detectar fallas en cualquier lugar de la línea y en al menos un 20% más allá del punto B. Entonces la configuración será:

- (1) zona 1: $z = 14,72$ ohmios, ángulo de fase = 90 grados, $m = 1,598$, instantáneo,
- (2) zona 2: $z = 23,46$ ohmios, ángulo de fase = 90 grados, $m = 2,547$, retardo de 12 ciclos.

Parte B:



$$\tilde{I}_1 \quad \tilde{I}_2 \quad \tilde{I}_0 \quad \sim \quad \frac{500/\sqrt{3} \text{ kV}}{j395} \quad 0,7308 \text{ kA}$$

$$\tilde{I}_a = j2.1925 \text{ kA}, y_{0B} \tilde{I}_c = 0$$

En la fuente (ubicación del relé):

$$\tilde{V}_1 = \frac{500 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = j12 \tilde{I}_1 = 279.9055 \text{ kV}$$

$$\tilde{V}_2 = j12 \tilde{I}_2 = 8.7696 \text{ kV } V_0 = j$$

$$\tilde{V}_0 = 11.6928 \text{ kV}$$

$$\tilde{V}_a V_1 \tilde{V}_2 V_0 = \frac{500 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = j40 (j0.7308) = 259.44 \text{ kV}$$

Relé:

$$Z_{\text{Línea}} = \frac{V_a}{I_a} = \frac{259.44 \text{ kV}}{j2.1925 (2.547) (j0.7308)} = 63.99 \text{ mi } j90 \text{ ohmios}$$

$$Z_{\text{Reponer}} = 0.23 Z_{\text{Línea}} = 14.71 \text{ mi } j90 \text{ ohmios}$$

Problema P9.x: Se utiliza un relé de distancia para proteger una determinada línea de transmisión de 230 kV. La impedancia de secuencia positiva de longitud por unidad de la línea es:

$$z_1 = 0.0378 - j0.5673 \text{ ohmios / milla}$$

La relación CT del relé de impedancia es 3000: 5 y la relación PT es 200kV: 115V.

El ingeniero de relés decide configurar el relé de impedancia de la siguiente manera (impedancias en el lado del relé):

- (a) zona 1: $z = 14.8$ ohmios, ángulo de fase = 86 grados, $m = 1.9$, instantáneo,
- (b) zona 2: $z = 23.0$ ohmios, ángulo de fase = 86 grados, $m = 1.9$, retardo de 12 ciclos,
- (c) zona 3: $z = 42.0$ ohmios, ángulo de fase = 86 grados, $m = 1.9$, retardo de 30 ciclos.

Durante un evento de falla, la línea experimentó una falla de línea a tierra única inicialmente que luego evolucionó a una falla de línea a línea. Las corrientes y voltajes de línea durante este evento y para las dos condiciones de falla se muestran en las Figuras P9.5a y P9.5b.

- (a) Determine qué distancia en millas "verá" el relé durante la falla monofásica a tierra. Determine si se disparará y si se dispara en qué zona.
- (b) Determine qué distancia en millas "verá" el relé durante la falla de línea a línea. Determinar si se disparará y si se dispara en qué zona.
- (c) Calcule la diferencia en la distancia de falla entre los casos (a) y (b).

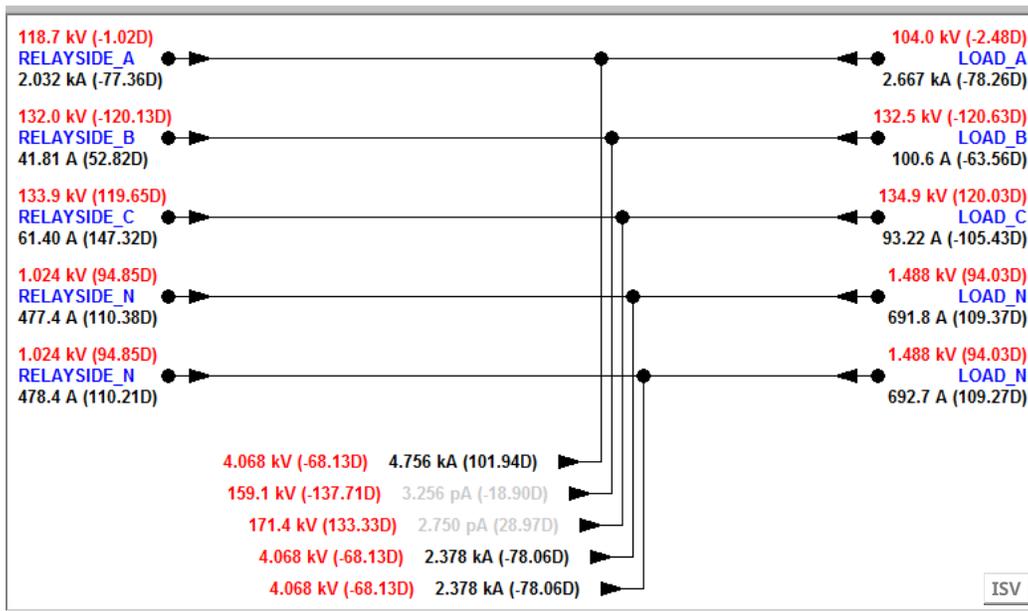


Figura P9.5a: El relé está ubicado en el bus RELAYSIDE

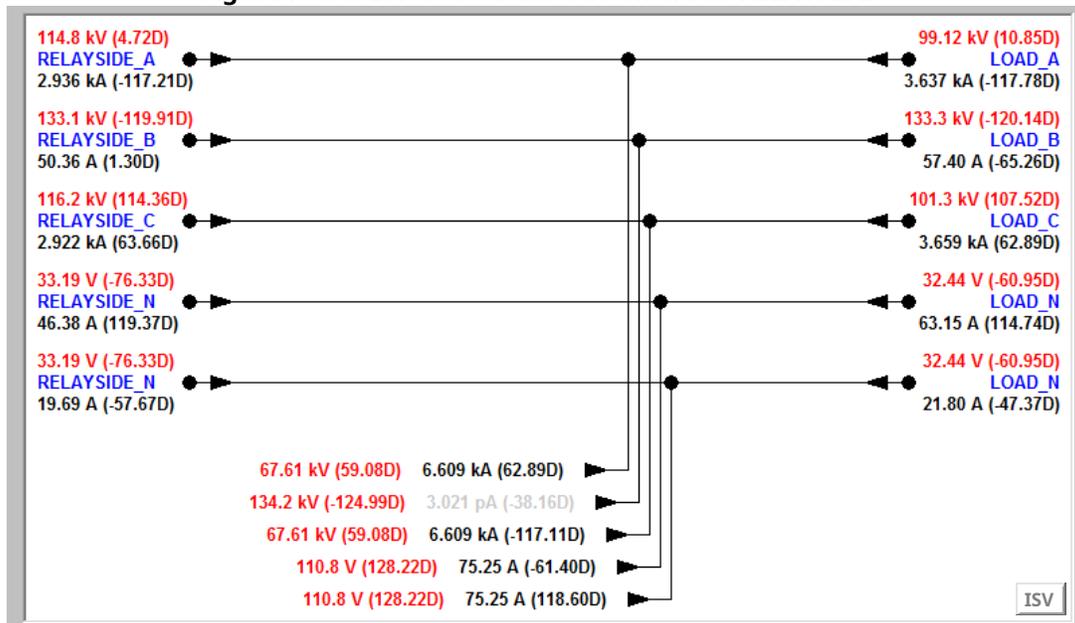


Figura P9.5b: El relé está ubicado en el bus RELAYSIDE

Solución:

$$\begin{aligned}
 a) \quad \tilde{V}_{an} &= 118.7 \text{ kV } e^{-j1.02^\circ} & \leftrightarrow & 68.2525 e^{-j1.02^\circ} \\
 \tilde{I}_a &= 2.032 \text{ kA } e^{j77.36^\circ} & \leftrightarrow & 3.3867 e^{-j77.36^\circ} \\
 \tilde{I}_o &= \tilde{I}_a / 3 & \leftrightarrow & \tilde{I}_a / 3 \\
 l_1 &= \frac{68.2525 e^{j1.02^\circ}}{3.3867 e^{j77.36^\circ} (1 + \frac{1.9}{3})} = 62.905 e^{-j9.8^\circ} \text{ mi}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 b) \quad \tilde{V}_{an} &= 114.8 \text{ kV } e^{j4.72^\circ} & \leftrightarrow & 66.01 e^{j4.72^\circ} \\
 \tilde{V}_{cn} &= 116.2 \text{ kV } e^{j114.36^\circ} & \leftrightarrow & 66.815 e^{j114.36^\circ} \\
 \tilde{I}_a &= 2.936 \text{ kA } e^{-j117.21^\circ} & \leftrightarrow & 4.8 e^{-j117.21^\circ} \\
 \tilde{I}_c &= 2.922 \text{ kA } e^{j63.66^\circ} & \leftrightarrow & 4.87 e^{j63.66^\circ} \\
 l_2 &= \frac{66.01 e^{j4.72^\circ} - 66.815 e^{j114.36^\circ}}{(4.8 e^{-j117.21^\circ} - 4.87 e^{j63.66^\circ})(0.0378 + j0.5673)} = 56.69 e^{-j0.11^\circ}
 \end{aligned}$$

$$c) \quad |l_1 - l_2| = 6.21 \text{ mi}^8$$

Problema P9.3: Una línea de transmisión trifásica de 115 kV y 42 millas de largo conecta dos sistemas de energía eléctrica como en la Figura P9.3. Cada uno de los sistemas de potencia se representa como una fuente equivalente con las siguientes impedancias de secuencia:

$$Z_1 \text{ } j0,1 \text{ pu @100MVA}, Z_2 \text{ } j0,1 \text{ pu @100MVA}, Z_0 \text{ } j0,06 \text{ pu @100MVA}$$

Las fuentes de voltaje detrás de las impedancias equivalentes están en fase. Los parámetros de la línea de transmisión son

$$z_1 \text{ } z_2 \text{ } j0,8 \text{ ohmios / mi}, z_0 \text{ } j2,1 \text{ ohmios / mi}$$

(a) Calcule la corriente de falla para una sola falla de línea a tierra en el medio de la línea. Suponga que un relé de distancia a tierra con un factor de compensación de $m = 1.6$ está ubicado en el terminal izquierdo de la línea. ¿Cuál es la impedancia "vista" por este relé? (El relé de tierra "ve" lo siguiente

$$\text{impedancia: } z_{\text{grando}} = \frac{\tilde{V}}{I_a \text{ mio}}$$

(b) Calcule la corriente de falla para una falla de línea a línea en el medio de la línea. Suponga que una línea El relé de distancia se encuentra en el terminal izquierdo de la línea. ¿Cuál es la impedancia "vista" por este

$$\text{relé? (El relé de línea "ve" la siguiente impedancia: } z_{\text{norte}} = \frac{\tilde{V}_1 \tilde{V}_2}{I_1 I_2}$$

(c) Calcule el voltaje de las fases sin falla en la ubicación de la falla y para las condiciones en (a) y (b).

(d) Si la falla se interrumpe en 6 ciclos después del inicio de la falla, ¿cuál será el valor rms máximo de la corriente de falla en los interruptores indicados para los casos (a) y (b)?

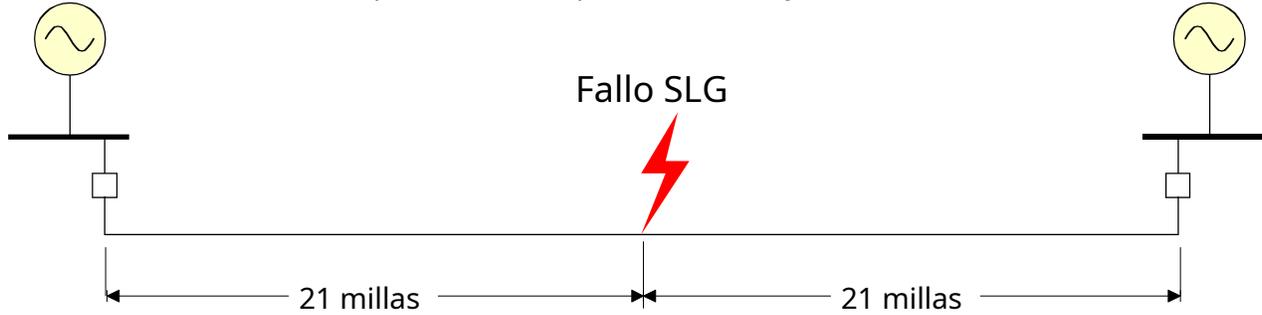
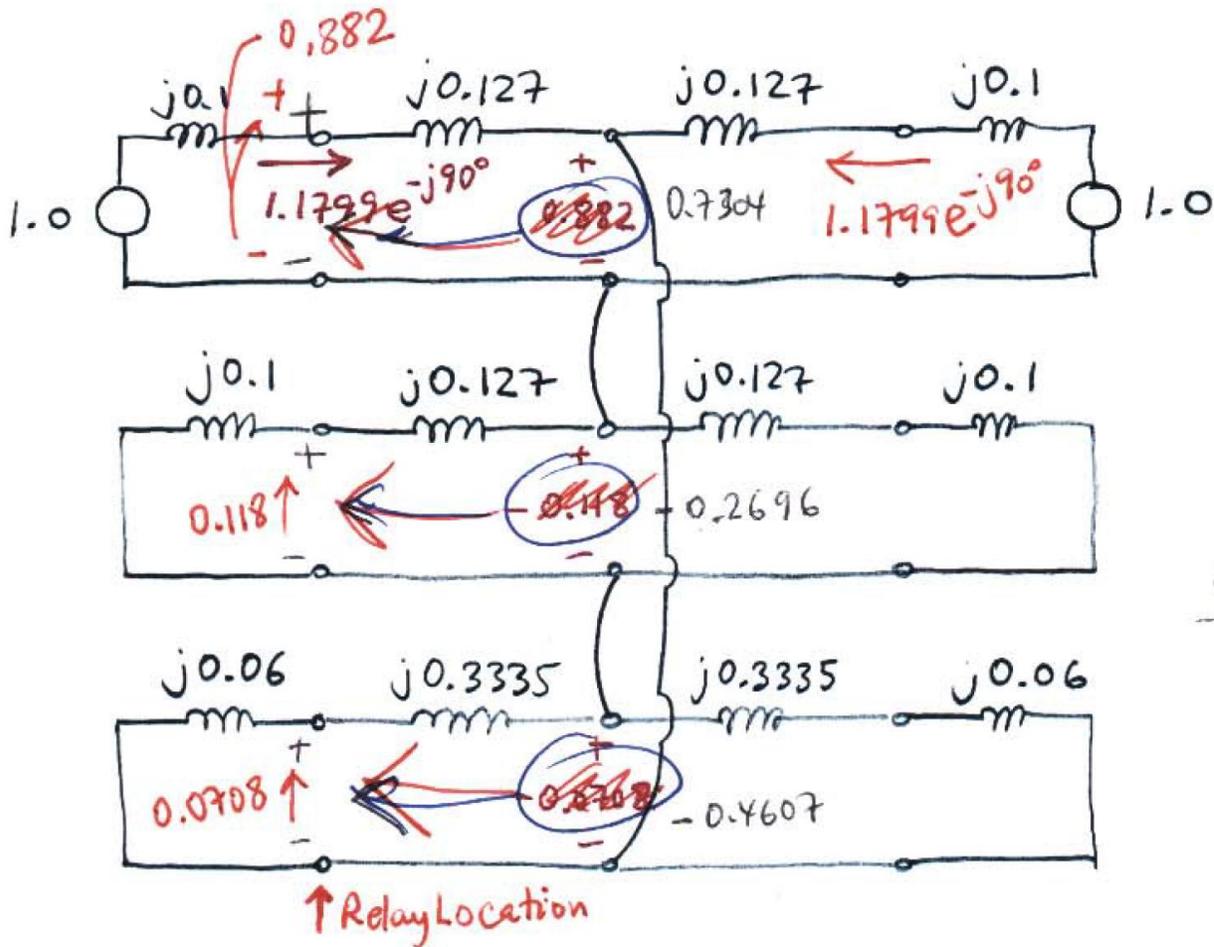


Figura P9.3

Solución: Debido a la simetría, se puede considerar solo la mitad del sistema para el análisis de fallas.



(a) Al convertir los parámetros de la línea a por unidad, las corrientes de falla son:

$$\tilde{I}_1 \quad \tilde{I}_2 \quad \tilde{I}_0 \quad \frac{1}{j0.8475} \quad 1,1799 \text{ mi}_{\beta 00} \text{ pu}$$

La corriente de la fase A es:

$$\tilde{I}_a \quad \tilde{I}_1 \quad \tilde{I}_2 \quad \tilde{I}_0 \quad 3.5397 \text{ mi}_{\beta 00} \text{ pu}$$

El voltaje en la ubicación del relé es:

$$\tilde{V}_1 \quad 1.0 \quad (j0,1) \tilde{I}_1 \quad 0.8820 \text{ pu}$$

$$\tilde{V}_2 \quad (j0,1) \tilde{I}_2 \quad 0,1180 \text{ pu}$$

$$\tilde{V}_0 \quad (j0,06) \tilde{I}_0 \quad 0.0708 \text{ pu}$$

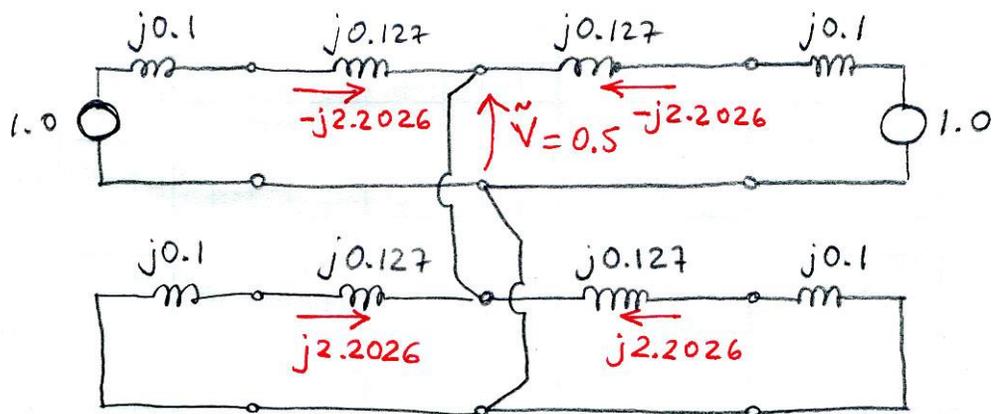
El voltaje de las fases no falladas es:

$$\tilde{V}_a \quad \tilde{V}_1 \quad \tilde{V}_2 \quad V_0 \quad 0,6932 \text{ pu}$$

La impedancia vista por el relé (en el lado de la línea) es:

$$Z_{\text{relé (línea)}} \sim \frac{\tilde{V}_{un-}}{I_a \text{ mi}_0} = \frac{0,6932}{j3.5397 \cdot 1,6 (j1,1799)} = j0.1277 \text{ pu OR } j16.8908 \text{ ohmios}$$

(b) El circuito equivalente para la falla de línea a línea se da a continuación. La solución también está indicada en el dibujo.



Los voltajes y corrientes en la ubicación del relé son:

$$\tilde{I}_1 \quad j2.2026 \text{ pu} \quad \tilde{I}_2 \quad j2.2026 \text{ pu}$$

$$\tilde{V}_1 \quad 1.0 \quad (j0,1) (j2.2026) \quad 0,77974 \text{ pu} \quad \tilde{V}_2 \quad (j0,1) (j2.2026) \quad 0.22026 \text{ pu}$$

Por lo tanto:

$$Z_{línea} = \frac{\tilde{V}_1 \tilde{V}_2}{\tilde{I}_1 \tilde{I}_2} = \frac{0,77974 \ 0,22026}{j2,2026 \ j2,2026} = j0,127 \ pu \quad j16,79 \ ohmios$$

(c) Los voltajes son:

$$\begin{aligned} \tilde{V}_a &= \tilde{V}_1 \tilde{V}_2 \tilde{V}_0 = 0,0 \ j0,0 \\ \tilde{V}_B &= a^2 \tilde{V}_1 + a \tilde{V}_2 + \tilde{V}_0 = 0,7304 \ mi \quad j^{120} \ 0,2696 \ mi / j^{120} \ 0,4607 \ 0,6911 \ j0,8660 \ 1,1080 \ mi \quad j \\ \tilde{V}_C &= a \tilde{V}_1 + \tilde{V}_2 + \tilde{V}_0 = 0,7304 \ mi \quad j^{120} \ 0,2696 \ mi / j^{120} \ 0,4607 \ 0,6911 \ 0,8660 \ 1j \quad .1080 \ mi_j \end{aligned}$$

(d) El circuito equivalente de Thevenin en el lugar de la falla es:

$z = j0,4238 \ R \quad jL, R = 0, L = 0,00112$. El valor rms máximo de la corriente de falla estarán:

$$I_{f, rms(t)} = 3 \sqrt{I^2 2 \quad \frac{2R}{L} t} = 6,1309 \ pu$$

Problema P9.13: Considere el sistema de energía eléctrica de la figura P9.13. Los parámetros de los distintos componentes del sistema se muestran en la figura. Considere una falla línea a línea 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, potencia nominal y factor de potencia unitario.

- (a) Calcule la corriente de secuencia negativa en el generador durante esta falla.
- (b) Calcule la impedancia de línea "vista" en los terminales del generador por una distancia de línea

relé, es decir, calcular la relación: $z = \frac{\tilde{V}_1 \tilde{V}_2}{\tilde{I}_1 \tilde{I}_2}$

Las impedancias de secuencia positiva, negativa y cero de cada línea son: $Z_1 = Z_2 = j45,5 \ ohmios$ y $Z_0 = j106,4 \ ohmios$. La impedancia mutua entre las dos líneas (solo secuencia cero) es:

$Z_{0metro} = j24,5 \ ohmios$.

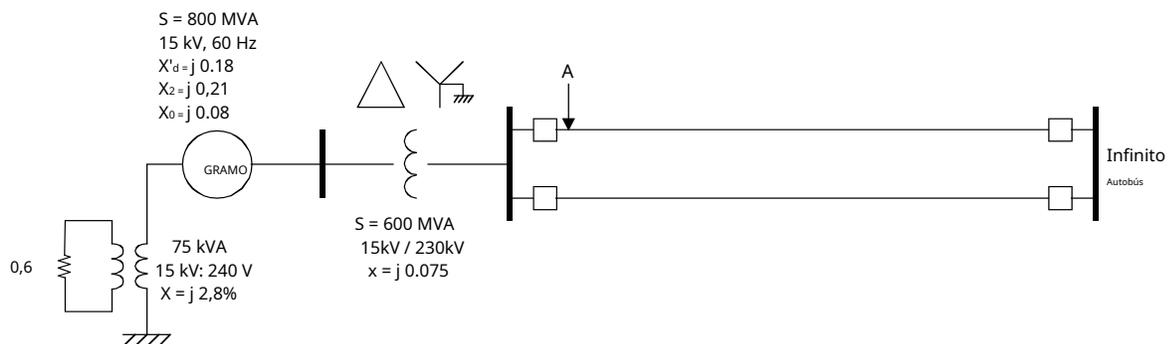
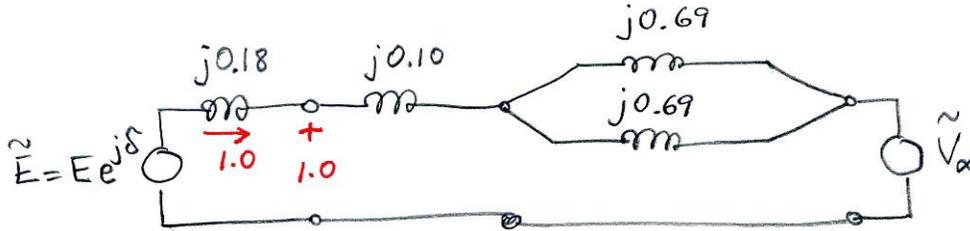


Figura P9.13

Solución: Primero calculamos las condiciones de operación antes de la falla. El circuito a continuación es la red de secuencia positiva antes de la falla (todas las impedancias se han referido a un 800 MVA base).

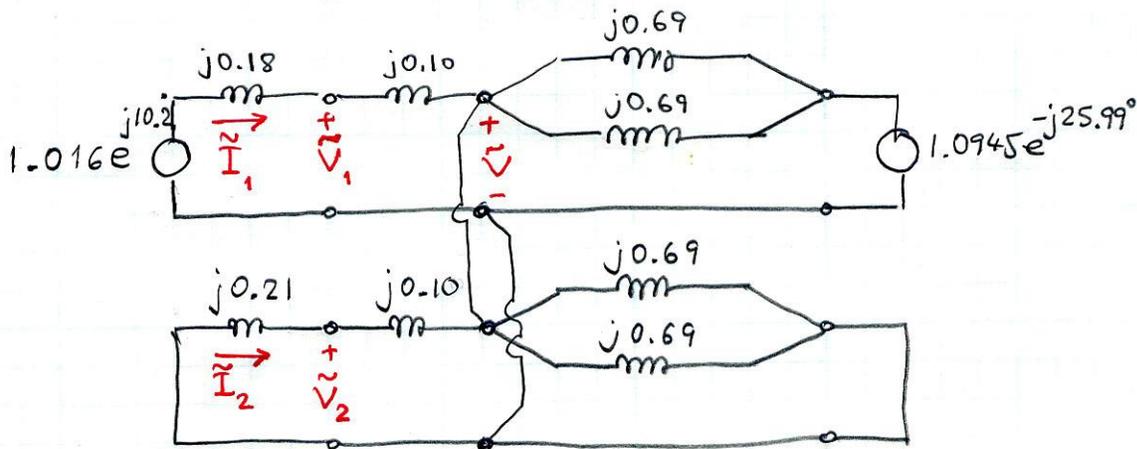


Los voltajes del generador y del bus infinito son:

$$E_e = 1.0 \angle 0,18 \text{ pu}$$

$$\tilde{V} = 1.0 \angle 0,10 \text{ pu}$$

(a) Dado que solo tenemos una falla de línea a línea, solo las redes de secuencia positiva y negativa estarán involucradas. La siguiente figura ilustra las conexiones para una falla de línea a línea.



El análisis de circuitos produce: $\tilde{V} = 0.450 \angle 6,640 \text{ pu}$ y $I_2 = 2.250 \angle 96,640 \text{ pu}$

(b) De la solución del circuito obtenemos:

$$\tilde{I}_1 = 2.141 \angle 67,240 \text{ pu}$$

$$\tilde{V}_1 = (j0,1)I_1 = 0,6452 \angle 2,7370 \text{ pu}$$

$$\tilde{V}_2 = (j0,21)I_2 = 0,225 \angle 6,640 \text{ pu}$$

Por lo tanto, la impedancia "vista" por el relé es:

$$Z = \frac{\tilde{V}_1 - \tilde{V}_2}{I_1 - I_2}$$

Problema P9.16: Una línea de transmisión trifásica conecta dos sistemas de energía eléctrica como en la Figura P4.11. Cada uno de los sistemas de potencia se representa como una fuente equivalente con el siguientes impedancias de secuencia:

$$Z_1 = j0,08 \text{ pu}, Z_2 = j0,08 \text{ pu}, Z_0 = j0,06 \text{ pu en } 100 \text{ MVA}$$

Las fuentes de voltaje detrás de las impedancias equivalentes están en la línea fase. Los parámetros del de transmisión son

$$Z_1 = Z_2 = j0,8 \text{ ohmios / milla}, Z_0 = j2,1 \text{ ohmios / milla}$$

El voltaje de operación de la línea es de 115 kV línea a línea. La longitud total de la línea es de 40 millas.

(a) Considere una falla línea a línea en la línea de transmisión en la ubicación indicada (las fases involucradas son B y C). Suponga que un relé de impedancia está ubicado en la ubicación del disyuntor B1 de la línea. Calcule la impedancia aparente que "verá" el relé de la fase B.

(b) Considere una falla de línea a tierra en la línea de transmisión en la ubicación indicada (la fase involucrada es A). Calcule la corriente de secuencia negativa del generador G1 y la corriente negativa secuencia de corriente del generador G2 durante esta falla.

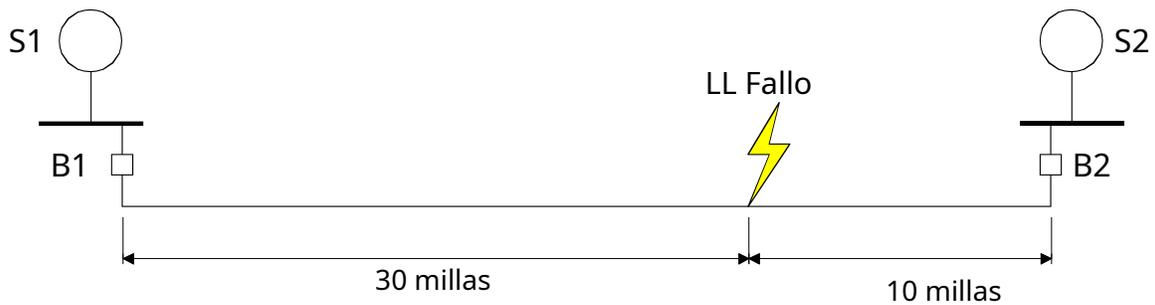
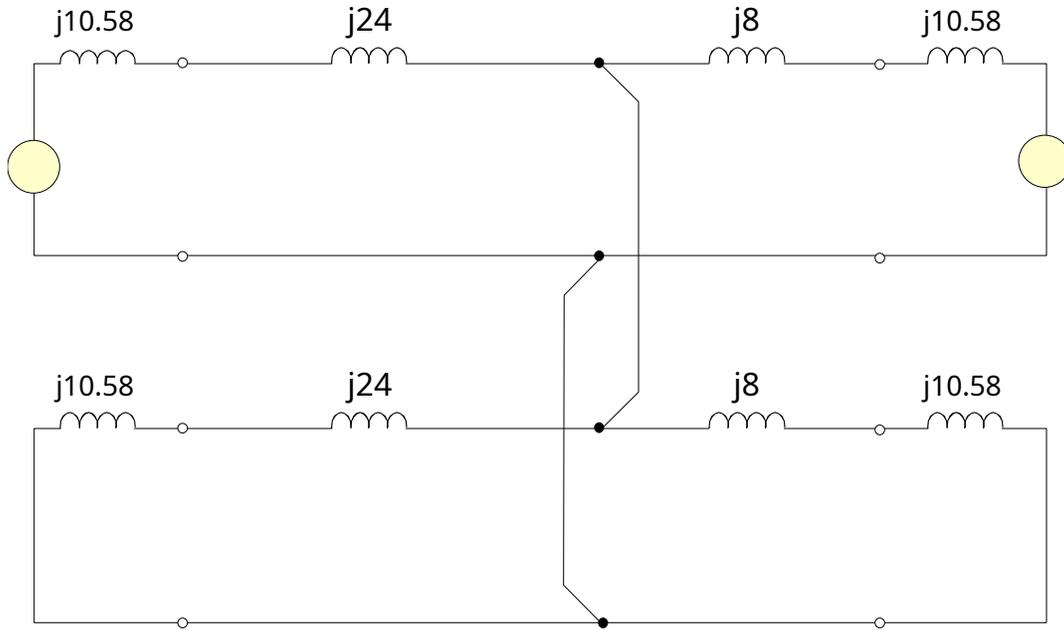
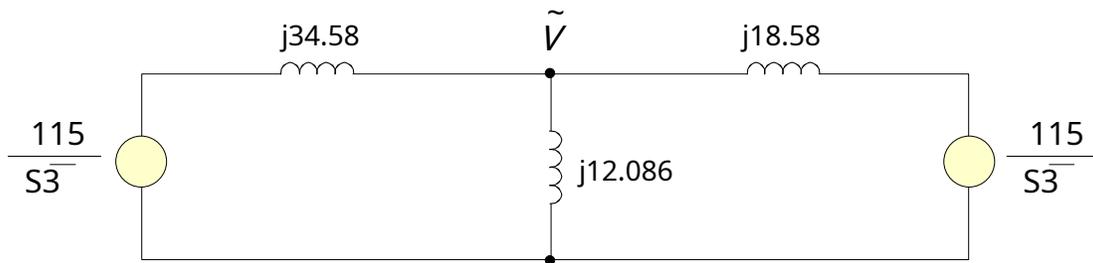


Figura P9.16

Solución: (a) Los circuitos equivalentes de secuencia positiva y negativa están conectados en paralelo en la ubicación de la falla, de la siguiente manera:



El circuito anterior se reduce a:



El análisis del circuito de este circuito rinde.

$$\frac{\tilde{V} \ 66.395}{j34.58} - \frac{\tilde{V}}{j12.086} + \frac{\tilde{V} \ 66.395}{j18.58} = 0$$

(b) Las redes de secuencia se muestran en la Figura P4.16b. La solución de la red rinde:

$$\tilde{I}_{2,S2} = 1.923 \text{ mi } \angle 90^\circ \text{ pu}$$

$$\tilde{I}_{2,S1} = 1.033 \text{ mi } \angle 90^\circ \text{ pu}$$

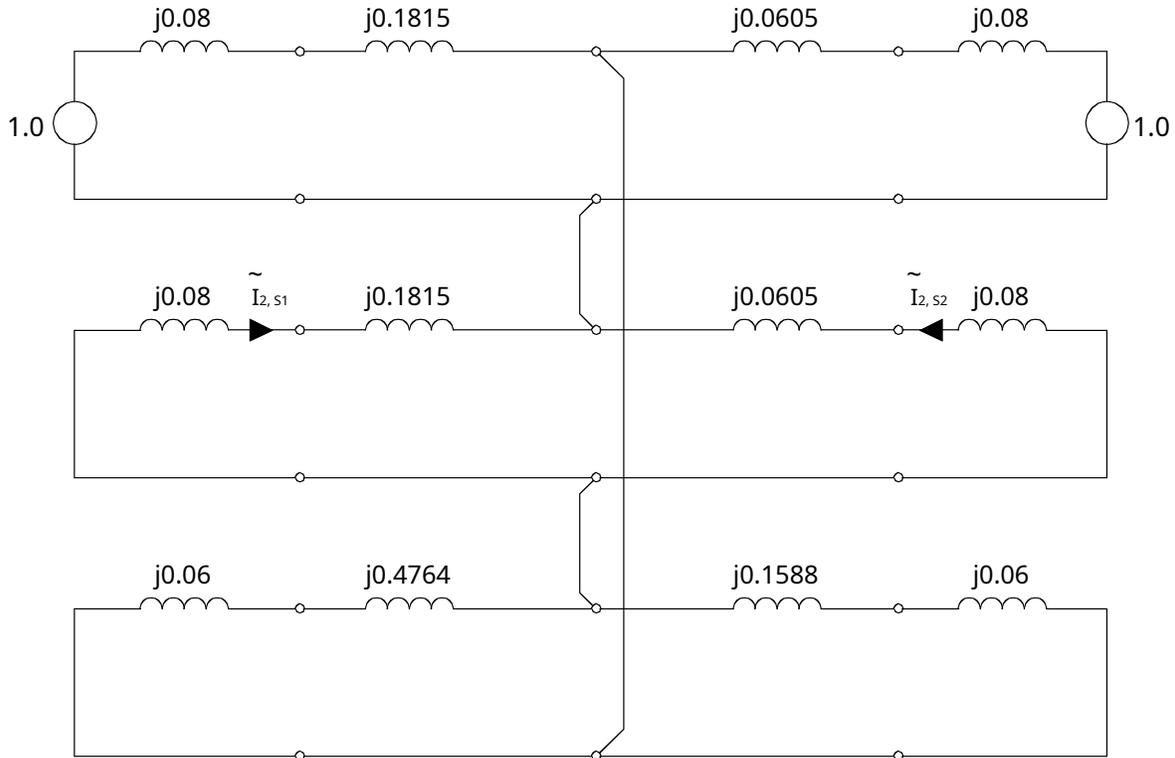


Figura P9.16b

Problema P9.17: Considere el sistema eléctrico de dos unidades, dos transformadores y dos líneas de transmisión de la figura P4.12a. Los siguientes datos se aplican a las unidades y transformadores. Unidad G1:

Potencia nominal: 300 MVA, Tensión nominal: 18 kV,

$Z_1 j0,18 pu$, $Z_2 j0,21 pu$, $Z_0 j0,09 pu$

Transformador T1

Potencia nominal: 300 MVA, Tensión nominal: 18 kV / 230 kV,

$Z_1 j0,08 pu$, $Z_2 j0,08 pu$, $Z_0 j0,08 pu$

Unidad G2:

Potencia nominal: 800 MVA, Tensión nominal: 18 kV,

$Z_1 j0,18 pu$, $Z_2 j0,21 pu$, $Z_0 j0,09 pu$

Potencia nominal: 800 MVA, Tensión nominal: 18 kV / 230 kV,

$Z_1 j0,08 pu$, $Z_2 j0,08 pu$, $Z_0 j0,08 pu$

Todos los valores de pu se refieren a la potencia y tensión nominal del dispositivo correspondiente.

Las dos líneas de transmisión tienen la configuración que se muestra en la Figura. Las dos líneas son paralelas en toda la longitud de la línea, que es de 56 millas. Los conductores de fase y los tamaños de cable blindado son:

Conductores de fase: ACSR, BLUEJAY

Alambres de protección: acero HS, 5/16.

Suponga una falla de línea a línea en la línea 1 a una distancia de 14.2 millas del transformador 2. Suponga también que hay un relé de falla a tierra por sobrecorriente en la línea 2 en la terminal del transformador 2. El relé se alimenta a través de un conjunto de TC con una relación de transformación de 1200: 5. El relé de tierra de sobrecorriente está configurado para dispararse a 0.2A. Determine si se disparará durante la falla de línea a línea especificada anteriormente.

Sugerencia: Realice el análisis de cortocircuito y determine la corriente de secuencia cero "vista" por el relé. Se recomienda el uso del programa WinIGS.

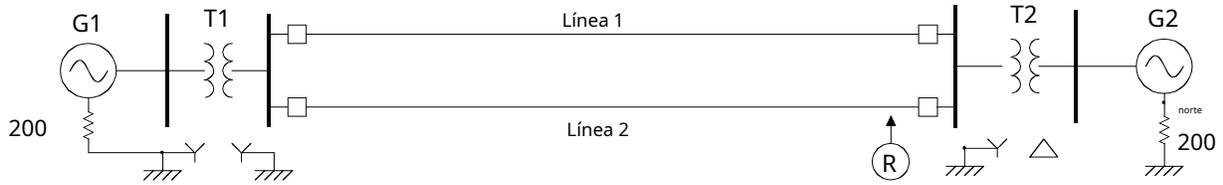


Figura P9.12a

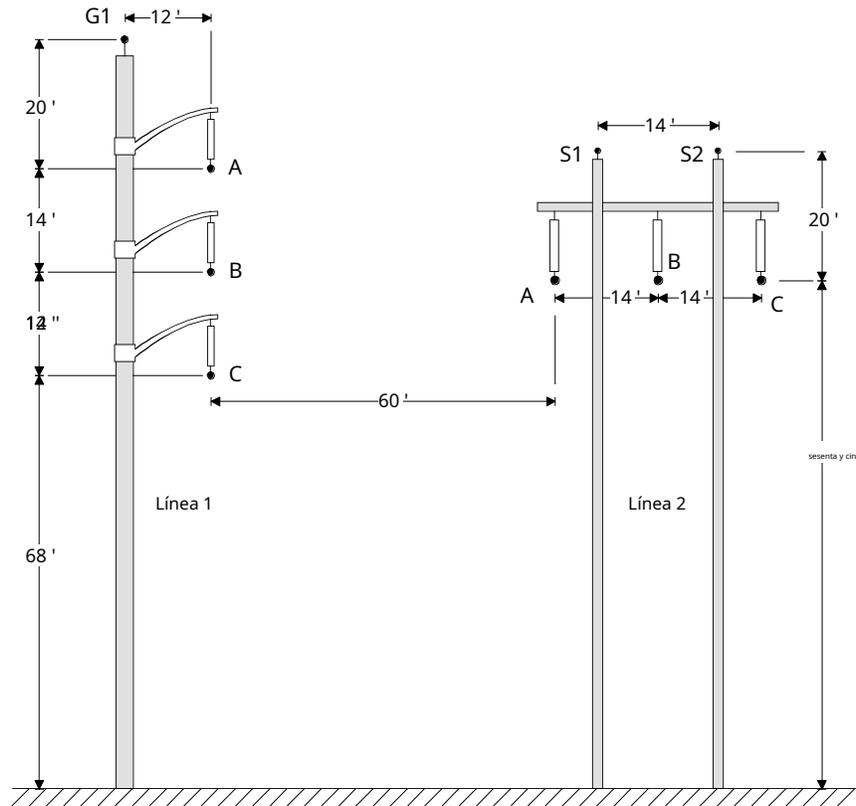
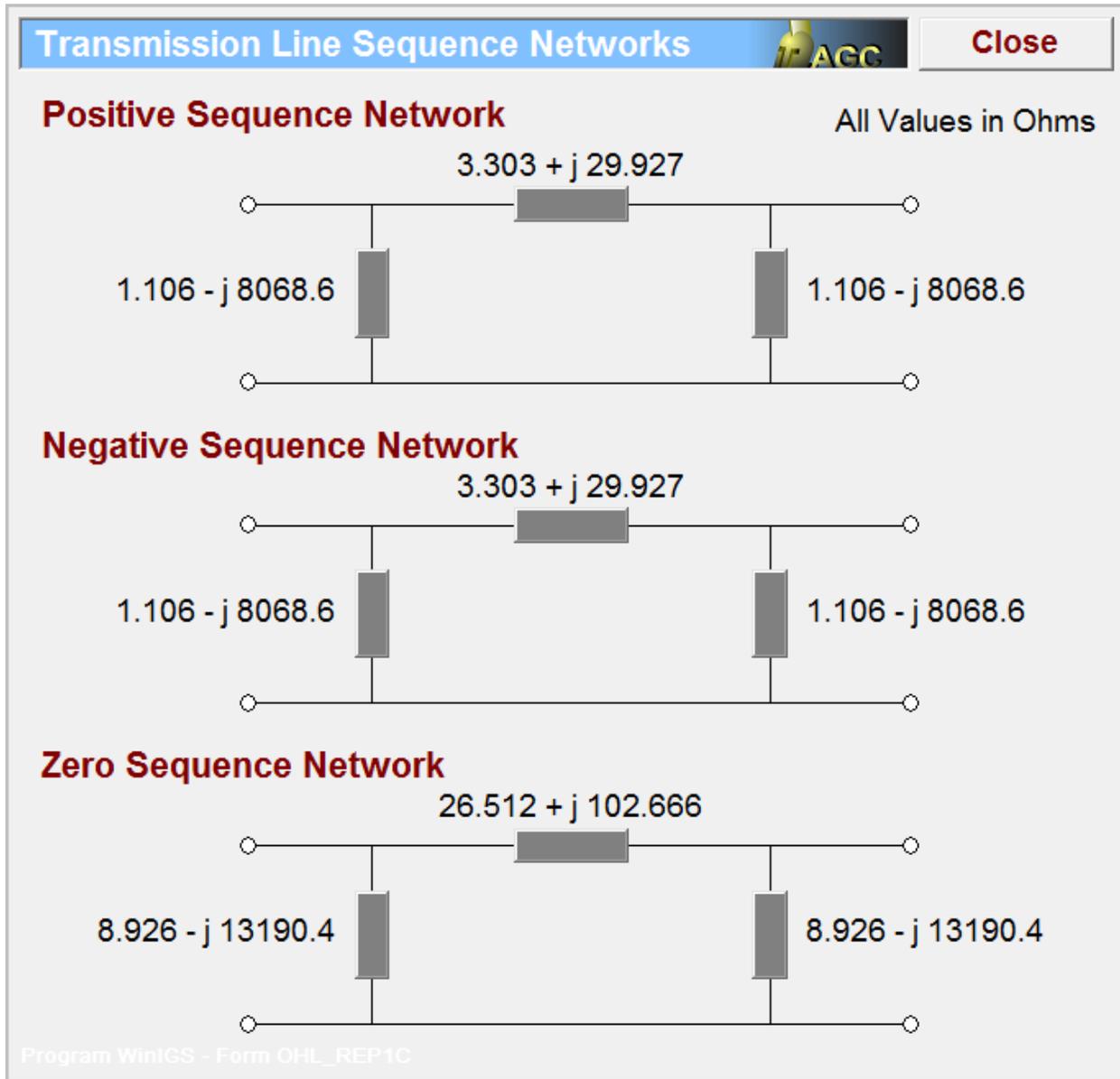


Figura P9.12b

Problema P9.x: Considere una línea de transmisión de 115 kV, 41.6 millas de largo. El modelo de secuencia positiva / negativa y cero de la línea se muestra en la figura.



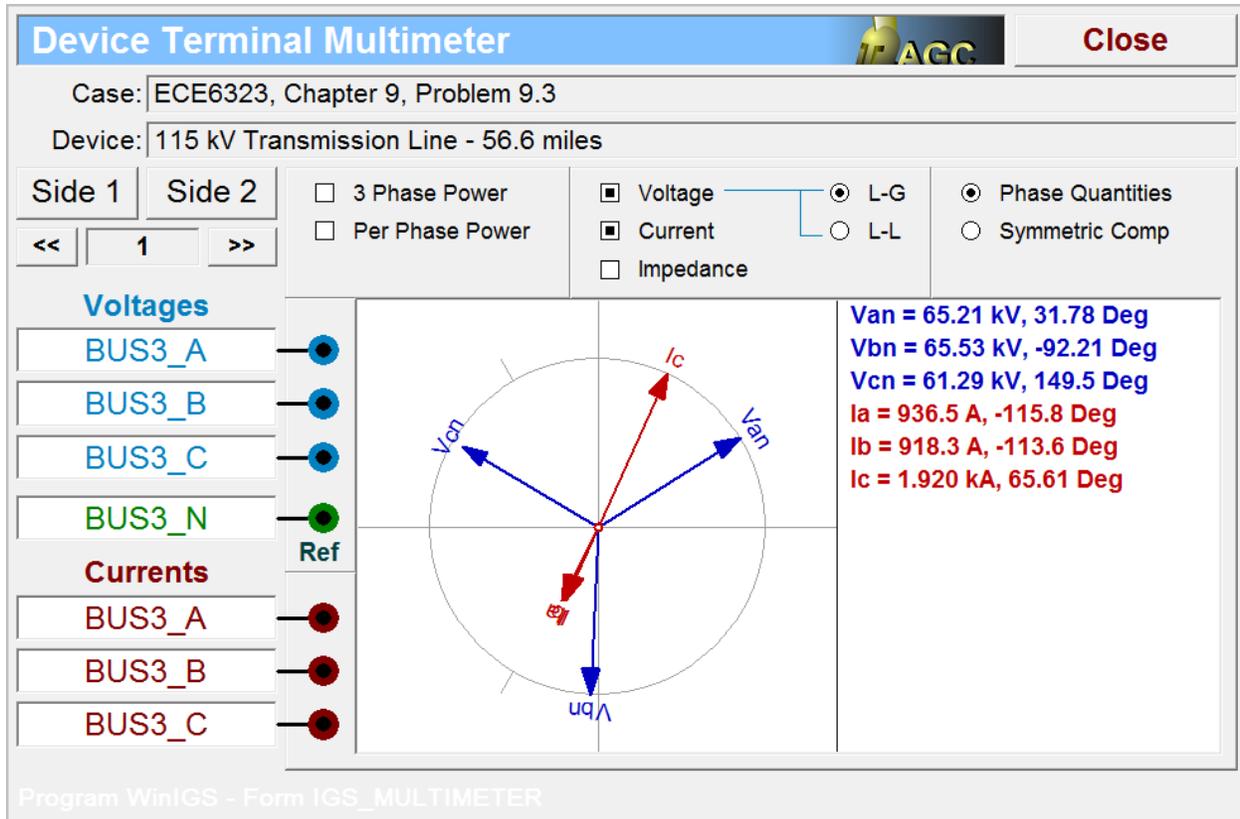
La línea está protegida con un relé de distancia en cada extremo. La relación CT es 1200A: 5A y la relación VT es 69kV: 69V.

Determine la configuración del relé para proteger la línea de la siguiente manera:

- Disparo instantáneo si la falla está dentro del 75% de la longitud de la línea (zona 1)
- Disparo retardado en 12 ciclos por cualquier falla hasta el 125% de la longitud de la línea (zona 2)
- Disparo retardado por 30 ciclos por cualquier falla hasta el 250% de la longitud de la línea (zona 3)

Calcule y grafique las características del relé en cantidades secundarias.

Durante una falla específica, el relé de distancia en uno de los extremos de la línea registró los siguientes valores:



Determine (a) el tipo de falla y (b) la ubicación de la falla.

Problema P5.24: Considere el sistema de energía eléctrica de la figura P5.18. Suponga que un relé de distancia está ubicado en la terminal izquierda de la Línea 1. La línea tiene 59.5 millas de largo. La relación CT del relé de distancia es 1800: 5 y la relación PT es 142 kV: 69 V.

La zona 1 del relé debe configurarse para alcanzar el 70% de la línea. La configuración del factor de compensación disponible (m) del relé está en el rango de 2.4 a 4.0 en incrementos de 0.1. Los ajustes de impedancia son: 5 ohmios a 30 ohmios en incrementos de 1 ohmio. Los parámetros de la línea son:
 $Z_1 = 2.222 - j39.134 \text{ ohmios}$, $Z_2 = 2.222 - j39.134 \text{ ohmios}$, $Z_0 = 24.564 + j158.775 \text{ ohmios}$

Pregunta 1: Determine la configuración de la zona 1 del relé. Especifique impedancia, ángulo, factor de compensación y retardo de tiempo. La impedancia debe estar en el lado del relé.

Pregunta 2: Durante una condición de falla, el relé mide los siguientes voltajes y corrientes.

$$\tilde{V}_{un} = 83.36 \text{ mi}_{\beta, 3890} \text{ kV}, \quad \tilde{V}_{bn} = 81.77 \text{ mi}_{\beta, 3970} \text{ kV}, \quad \tilde{V}_{norte} = 137.4 \text{ mi}_{\beta, 150, 10} \text{ kV}$$

$$\tilde{I}_a = 1.858 \text{ mi}_{\beta, 27, 230} \text{ kA}, \quad \tilde{I}_B = 1.857 \text{ mi}_{\beta, 151, 60} \text{ kA}, \quad \tilde{I}_C = 0.03798 \text{ mi}_{\beta, 8, 590} \text{ kA}$$

Determine la respuesta del relé, es decir, determine si el relé verá la falla dentro de la zona 1 o fuera.

Pregunta 3: Durante otra condición de falla, el relé mide los siguientes voltajes y corrientes.

$$\tilde{V}_{un} 85,44 \text{ mi}^{25,190} \text{ kV}, \quad \tilde{V}_{bn} 124,9 \text{ mi}_j^{82,560} \text{ kV}, \quad \tilde{V}_{cn} 130,9 \text{ mi}^{141,60} \text{ kV}$$

$$\tilde{I}_a 1.708 \text{ mi}^{49,97^0} \text{ kA}, \quad \tilde{I}_B 0.1138 \text{ mi}_j^{113,00} \text{ kA}, \quad \tilde{I}_C 0.1163 \text{ mi}_{147,00} \text{ kA}$$

Determinar la respuesta del relé, es decir, determinar si la zona relé verá la falla en el interior 1 o exterior.

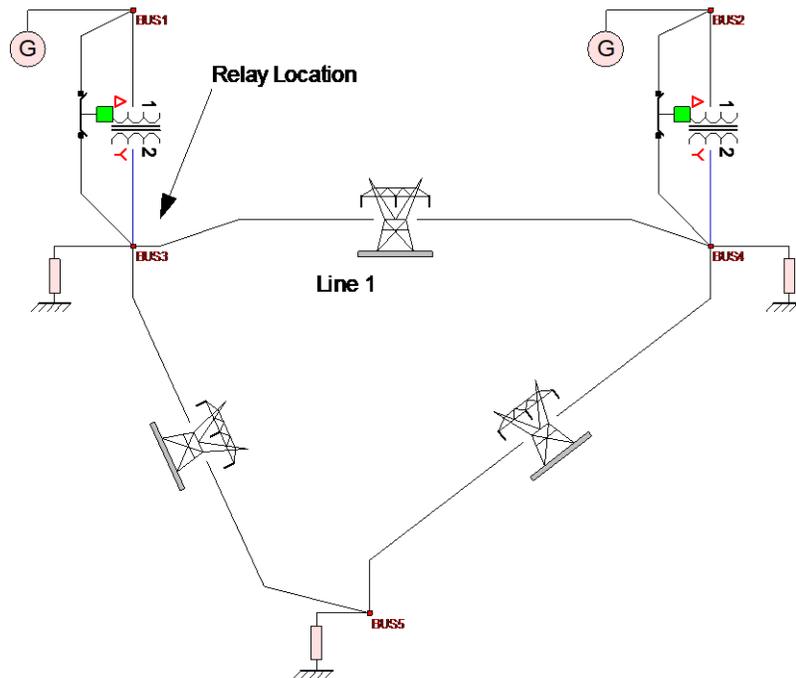


Figura P5.18

Usando la configuración seleccionada para este relé, calcule la distancia "vista" por este relé para las siguientes fallas en la línea:

- una falla línea a línea (fase A a fase B) a una distancia de 38.5 millas de la ubicación del relé.
- una falla de línea a línea (fase A a fase C) a una distancia de 38.5 millas de la ubicación del relé.
- una línea a la falla neutral (fase A) a una distancia de 38.5 millas de la ubicación del relé.
- una línea a la falla neutral (fase B) a una distancia de 38.5 millas de la ubicación del relé.

¿Cuáles son sus observaciones sobre la precisión del relé?

Solución: El análisis de cortocircuito se realiza con el programa WinIGS. Primero seleccionamos la configuración del relé. Para ello calculamos los parámetros de secuencia del circuito a proteger. Usando el programa WinIGS los parámetros de secuencia son:

$$Z_1 2.222 \text{ j}39.134 \text{ ohmios}, \quad Z_2 2.222 \text{ j}39.134 \text{ ohmios} \quad Z_0 24.564 \text{ j}158.775 \text{ ohmios}$$

$$Z_1' = 0,750 \angle 5.144,6 \text{ ohmios} \quad Z_2' = 0,750 \angle 5.144,6 \text{ ohmios} \quad Z_0' = 8.331 \angle 10.527,3 \text{ ohmios}$$

El factor de compensación es:

$$\frac{Z_0}{Z_1} = 3.0989e, \text{ Seleccione } metro = 3.0.$$

La impedancia debe establecerse igual al 80% de la impedancia de secuencia positiva de la línea. Esto medio:

$$(0,8)Z_1 \sim \frac{\tilde{V}}{I} = \frac{139.000 \tilde{V}_R}{\frac{115}{2000} \tilde{I}_R} \cdot \frac{5}{5}. \text{ Tras la solución de la impedancia en el lado del relé:}$$

$$\frac{\tilde{V}_R}{\tilde{I}_R} = 10.3773 \text{ ohmios Seleccione } Z_{zona1} = 10.0 \text{ ohmios y fase} = 85 \text{ grados}$$

(a) Las corrientes y tensiones de falla en la ubicación del relé para una falla de línea a línea (fases A y B), calculadas con el programa WinIGS, son:

$$\tilde{V}_{un} = 83,36 \text{ mi}_{\beta,3890} \text{ kV}, \quad \tilde{V}_{bn} = 81,77 \text{ mi}_{\beta,3890} \text{ kV}, \quad \tilde{V}_{cn} = 137,4 \text{ mi}_{\beta,3890} \text{ kV}$$

$$\tilde{I}_a = 1.858 \text{ mi}_{\beta,27,2} \text{ kA}, \quad \tilde{I}_B = 1.7 \text{ mi}_{\beta,1,60} \text{ kA}, \quad \tilde{I}_C = 0.03798 \text{ mi}_{\beta,8,590} \text{ kA}$$

La distancia de la falla se calcula a partir de la ecuación:

$$\left| \frac{1 \tilde{V}_a \tilde{V}_B}{Z_1 \tilde{I}_a \tilde{I}_B} \right| = 37.4211 \text{ millas}$$

(b) Las corrientes y tensiones de falla en la ubicación del relé para una falla de línea a línea (fases A y C), calculadas con el programa WinIGS, son:

$$\tilde{V}_{un} = 84.11 \text{ mi}_{\beta,4,050} \text{ kV}, \quad \tilde{V}_{bn} = 1378 \text{ mi}_{\beta,0,070} \text{ kV}, \quad \tilde{V}_{cn} = 85,33 \text{ mi}_{\beta,125,20} \text{ kV}$$

$$\tilde{I}_a = 1.767 \text{ mi}_{\beta,88,6} \text{ kA}, \quad \tilde{I}_B = 0.04276 \text{ mi}_{\beta,7,40} \text{ kA}, \quad \tilde{I}_C = 1.768 \text{ mi}_{\beta,2,7,40} \text{ kA}$$

La distancia de la falla se calcula a partir de la ecuación:

$$\left| \frac{1 \tilde{V}_a \tilde{V}_C}{Z_1 \tilde{I}_a \tilde{I}_C} \right| = 42.333 \text{ millas}$$

(c) Las corrientes y voltajes de falla en la ubicación del relé para una falla de línea a tierra (fase A a tierra), calculados con el programa WinIGS, son:

$$\begin{aligned} \tilde{V}_{un} & 85,44 \text{ mi}_j^{25.190} \text{ kV}, & \tilde{V}_{bn} & 124,9 \text{ mi}_j^{82.560} \text{ kV}, & \tilde{V}_{cn} & 130,9 \text{ mi}_j^{141.60} \text{ kV} \\ \tilde{I}_a & 1.708 \text{ mi}_j^{49.970} \text{ kA}, & \tilde{I}_B & 0.1138 \text{ mi}_j^{113.00} \text{ kA}, & \tilde{I}_c & 0.1163 \text{ mi}_j^{147.00} \text{ kA} \end{aligned}$$

Las corrientes de fase, transformadas en componentes simétricas, son:

$$\tilde{I}_1 0.5866 \text{ mi}_j^{49.890} \text{ kA}, \quad \tilde{I}_2 0,6255 \text{ mi}_j^{50.030} \text{ kA}, \quad \tilde{I}_0 0,496 \text{ mi}_j^{50,00} \text{ kA}$$

La distancia de la falla se calcula a partir de la ecuación:

$$\left| \frac{1}{z_1 \tilde{I}_a} \frac{\tilde{V}_a}{\tilde{m}_0} \right| 40.579 \text{ millas}$$

(d) Las corrientes y voltajes de falla en la ubicación del relé para una falla de línea a tierra (fase B a tierra), calculados con el programa WinIGS, son:

$$\begin{aligned} \tilde{V}_{a_{falta}} & 130.5 \text{ mi}_j^{21.510} \text{ kV}, & \tilde{V}_{bn} & 85.20 \text{ mi}_j^{94.870} \text{ kV}, & \tilde{V}_{cn} & 124,5 \text{ mi}_j^{157.400} \text{ kV} \\ \tilde{I}_a & 0,1261 \text{ mi}_j^{24.810} \text{ kA}, & \tilde{I}_B & 1.713 \text{ mi}_j^{170.20} \text{ kA}, & \tilde{I}_c & 0,1151 \text{ mi}_j^{3,540} \text{ kA} \end{aligned}$$

Las corrientes de fase, transformadas en componentes simétricas, son:

$$\tilde{I}_1 0.593 \text{ mi}_j^{49.810} \text{ kA}, \quad \tilde{I}_2 0,6272 \text{ mi}_j^{69.650} \text{ kA}, \quad \tilde{I}_0 0.3249 \text{ mi}_j^{170,40} \text{ kA}$$

La distancia de la falla se calcula a partir de la ecuación:

$$\left| \frac{1}{z_1 \tilde{I}_B} \frac{\tilde{V}_B}{\tilde{m}_0} \right| 40.5081 \text{ millas}$$

La precisión del relé (sobre la base de los cuatro casos anteriores) es:

$$\text{Error} = \frac{\text{Diferencia máxima}}{\text{Distancia de falla}} = \frac{4.9119}{38,5} = 0.1276 \text{ pu}$$