

Protección de Conductor Roto y Sobrecorriente de Secuencia Negativa



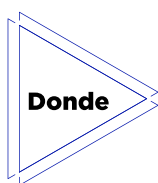
La presencia de un conductor roto en la red de media tensión representa uno de los peores escenarios para los ingenieros de distribución. La gran mayoría de los elementos de protección de red están diseñados para operar cuando hay una excesiva corriente de fase, pero en el caso de un conductor roto, lo que preocupa es la ausencia de ésta. Además de atenuar las luminarias o desconectar las cargas aguas abajo, los conductores rotos pueden provocar incendios al no ser detectados por las técnicas convencionales de protección contra sobrecorriente o falla a tierra. Afortunadamente, comprender la física del escenario de conductores rotos no es muy difícil y si bien las topologías de red de distribución de tres y cuatro hilos producen respuestas de red ligeramente diferentes, una comprensión sólida de estos conceptos ayudará a detectar y proteger contra este escenario de falla.

En primer lugar, vale la pena comprender la teoría de los componentes simétricos de Fortescue, que podemos emplear para mapear las corrientes de fase y los voltajes medidos a los componentes de secuencia positiva, negativa y cero. Este proceso de mapeo nos permite ignorar los desequilibrios entre fases durante las fallas; lo que facilita el proceso de análisis dichas de fallas. Fundamentalmente, la mayoría de las técnicas de protección de corriente alterna (CA) utilizan este proceso de transformación para detectar fallas.

$$I_{a1} = \frac{1}{3}(I_a + \alpha I_b + \alpha^2 I_c)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(I_a + \alpha^2 I_b + \alpha I_c)$$

$$I_{a0} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c)$$



I_{a1} = Fazor de corriente de secuencia Positiva

I_{a2} = Fazor de Corriente de Secuencia Negativa

I_{a0} = Fazor de Corriente de Secuencia Cero

I_a, I_b, I_c = Medicion de fasores de fase de corriente , a, b, c

$\alpha = 120^\circ$

Al ingresar los valores para cada **medición fasorial**, podemos derivar la magnitud y la fase de cada uno de los componentes de la secuencia. En un mundo ideal, en teoría, un alimentador de distribución saludable no debería presentar ningún desequilibrio y, por lo tanto, solo debería tener una corriente de secuencia positiva. Esto se podría confirmar al reemplazar un conjunto de fasores de corriente equilibrados en las ecuaciones y ver que el resultado es cero (0) para cada ecuación, excepto para la de secuencia positiva.

En el mundo de la distribución eléctrica en corriente alterna (CA), los componentes simétricos no se limitan solo a la corriente. El voltaje y las impedancias también se pueden representar en formato de componentes de secuencia lo que simplifica enormemente el análisis de fallas. Un buen libro sobre el tema es "Protection Electrical Networks de Christophe Preve".

Pero cuando consideramos el caso de conductores rotos, es importante tener claro que:

- Las fuentes de voltaje están limitadas a los elementos de secuencia positiva.
- Hay una impedancia de secuencia positiva, negativa y cero equivalentes para una red de distribución.

Sistemas trifásicos de tres conductores

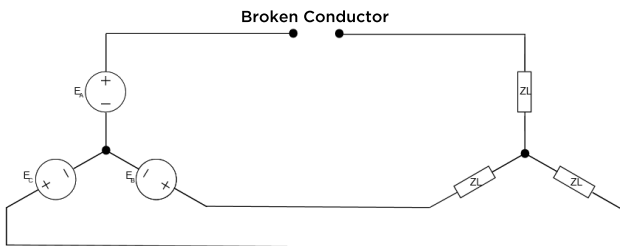


Figura 1 - Un sistema de tres cables con un conductor roto en la fase A

Al considerar el escenario de **conductor roto**, reflexionemos primero sobre lo que sucede en un sistema de tres conductores.

Como primer paso en el análisis, vale la pena entender lo que significa el conductor roto para cada una de las corrientes de fase. Con una discontinuidad en la fase A, como se muestra en la figura 1, eliminamos efectivamente el flujo de corriente a través de esta fase. A pesar de los esfuerzos de los generadores trifásicos para impulsar la corriente a través de las líneas, podemos suponer que no fluye corriente, dejándonos con un claro desequilibrio.



Podemos representar el **circuito** de la siguiente manera:

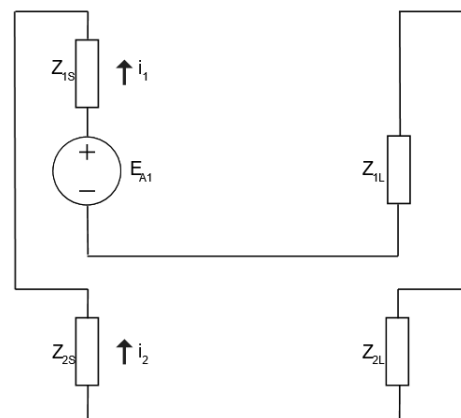


Figura 2 - Un circuito de tres cables con un conductor roto en la fase A

Para un ingeniero de protecciones experimentado, la figura 2 describe el análisis de fallas de una “falla fase-fase”. En dicha falla, la fase sinfalla parecería tener una impedancia infinita comparándola a una falla entre los otros dos conductores. La única diferencia es que en una falla fase-fase sólo consideramos la impedancia de línea, mientras que con un escenario de conductor roto consideramos la impedancia de carga. Según las fallas fase-fase para el escenario de conductor roto en una línea trifásica, nuestro circuito equivalente se convierte en:

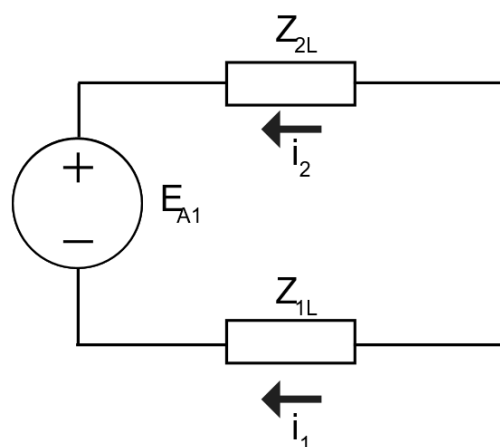


Figura 3 - Circuito Equivalente, Red de tres cables con un conductor roto

Lo anterior nos permite realizar las siguientes observaciones claves.

1. Bajo un escenario de conductor roto, la corriente de secuencia positiva es la misma que la corriente de secuencia negativa. Cuando el conductor no está roto es 100% de secuencia positiva y 0% de secuencia negativa.
2. Las corrientes de secuencia positiva y negativa se calculan utilizando la misma impedancia.
3. La carga aún puede ser lo suficientemente alta como para que I_1 no supere el nivel de detección de sobrecorriente, lo que es peligroso.

Los relés de protección digital modernos a menudo ofrecen protección de secuencia de fase negativa NPS (Negative Phase Sequence) y protección de sobrecorriente. Para el caso de tres conductores, podemos ver que en el escenario de conductor roto el componente de secuencia de fase negativa esperada depende de la impedancia de la carga. Por lo tanto, la corriente real de secuencia negativa resultante depende de la topología de carga en el momento de la falla. Para efectos prácticos, podríamos considerar que, en teoría, una red debería exhibir una corriente de secuencia negativa muy baja en un estado sin fallas, por lo que podríamos usar esto como una razón para establecer el punto de operación para NPS bastante bajo.

Lo anterior puede funcionar en escenarios simples, pero cuando la segregación de las protecciones entre múltiples dispositivos presenta limitaciones, una falla fase a fase aguas abajo, en la siguiente zona puede aparecer como una falla NPS en la zona aguas arriba, lo que lleva a una condición de conflicto entre NPS demasiado sensible en el dispositivo aguas arriba y la función de sobrecorriente convencional en el equipo de protección más cercano a la falla.

Cuando la información de impedancia es difícil de recopilar, podemos confiar en la relación " $I_1 = I_2$ " en un sistema trifásico durante una falla de conductor roto. Cuando se presenta un conductor roto, en un modelo teórico perfecto:

$$I_1 = I_2$$

$$\frac{I_2}{I_1} = 1$$

o expresado
en porcentaje:

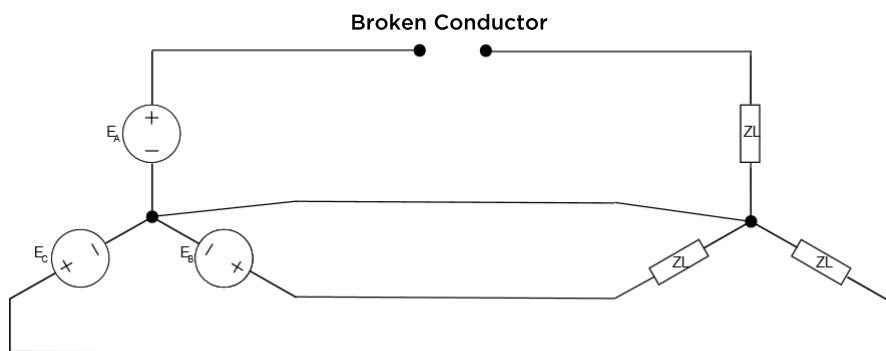


$$\frac{I_2}{I_1} = 100 \%$$

El código de protección ANSI asignado es 46BC (Conductor Roto), esta relación de secuencia negativa sobre positiva elimina la dependencia a la impedancia en el cálculo. De esta manera, independientemente de la carga, tenemos sensibilidad a la condición de falla del conductor roto. Para detectar eficazmente la discontinuidad debido a la interrupción de un conductor en una red trifásica normal. Sería inusual que en cualquier escenario, la relación de la corriente de secuencia negativa y la de secuencia positiva supere el 20%. Con frecuencia este es el punto de inicio de la configuración de esta característica en campo para que en combinación con los elementos de sobrecorriente contemplen casos de discontinuidad de fase y proporcionen la coordinación.

Sistemas trifásicos de cuatro conductores

Son populares en las topologías de red de América del Norte y la red de distribución de baja tensión (BT) en Australia, un sistema trifásico de cuatro conductores ofrece un resultado ligeramente diferente cuando se consideran los efectos de una discontinuidad en una fase.



Al agregar el conductor neutro introducimos una complicación en el cálculo, porque el neutro se convierte en un conductor de corriente durante condiciones desequilibradas. A menudo esta es una consideración de diseño que permite mantener continuidad del servicio a dos tercios de los clientes en el caso de BT (cuando una sola fase se encuentre en falla). No obstante, al agregar el cuarto conductor reducimos nuestra relación de I2 sobre I1 en el escenario de conductor roto. Con un conductor neutro en juego introducimos el efecto de la impedancia de secuencia cero:

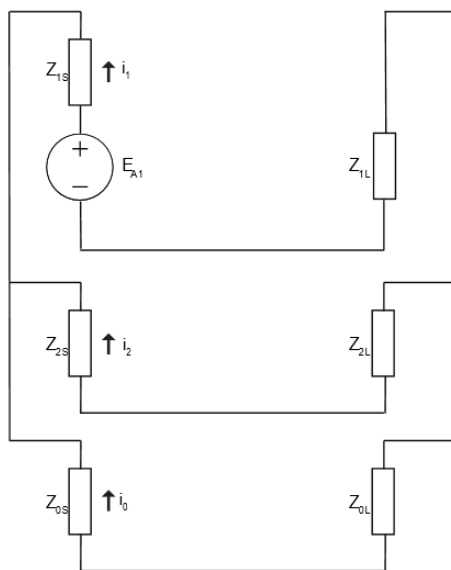
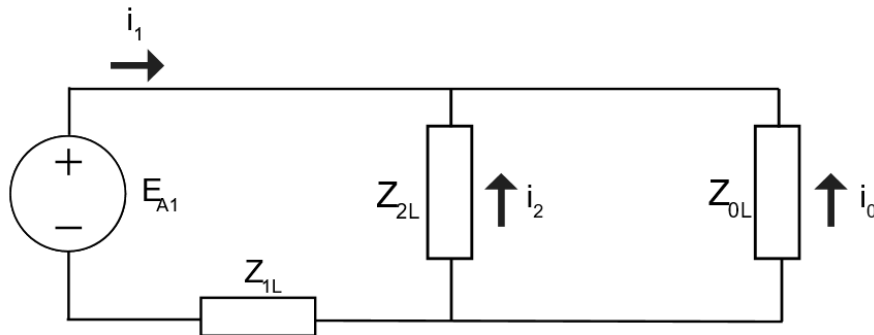


Figura 4 - Circuito Equivalente para un conductor Roto en una red trifásica de cuatro conductores

Nuevamente, nos enfrentamos a una red equivalente que es muy similar a la falla de Doble Línea a Tierra, excepto que estamos considerando las impedancias de carga en lugar de las impedancias de línea. Supongamos que las impedancias de la fuente son insignificantes en comparación con la carga, por lo que al simplificar tenemos:



La diferencia clave entre los sistemas de cuatro y tres cables es la inclusión de la secuencia cero en el cálculo resultante. Calculando para I1:

$$i_1 = \frac{E_{A1}}{(Z_{1L} + \frac{Z_{2L}Z_{0L}}{Z_{2L} + Z_{0L}})}$$



Además, asumiendo que I2 es negativo y reconociendo la topología como un divisor de corriente:

$$-i_2 = \frac{i_1 Z_{0L}}{(Z_{2L} + Z_{0L})}$$

$$\left| \frac{i_2}{i_1} \right| = \frac{Z_{0L}}{(Z_{2L} + Z_{0L})}$$

Para calcular la relación mínima del conductor roto en un sistema de cuatro conductores, necesitamos conocer la secuencia negativa y cero de la impedancia de la carga. Como regla general, hay más impedancia de secuencia cero que impedancia de secuencia negativa, **haciendo la relación $|I_2 / I_1|$ diferente de cero**. No obstante, si no tenemos información de la impedancia de carga es conveniente evaluarla empíricamente mediante datos en campo antes de aplicar la funcionalidad 46BC. Antes de poner en práctica la evaluación empírica y teniendo en cuenta factores de sensibilidad se sugiere que la relación $|I_2 / I_1|$ sea configurada al **20%** en redes de cuatro hilos. Sin embargo, esta configuración no hace la red inmune a disparos no deseados en redes altamente desbalanceadas.



"Si bien la metodología empleada para la aplicación de conductor roto es un tema complejo de comprender, **esta funcionalidad en el equipo NOJA es simple de configurar** y solo requiere que se programe la relación entre las secuencias positiva y negativa," declara El Director Ejecutivo del grupo NOJA Power, Neil O'Sullivan, "**generalmente recomendamos 20%**. Incluso puede configurarse como alarma en lugar de disparo para poner a prueba el concepto en su red."

Acerca de NOJA POWER

Es una empresa de "carácter global" que opera con estándares internacionales de fabricación y tecnología de ingeniería eléctrica. La adhesión y la contribución a estos estándares garantizan que NOJA Power pueda continuar operando y creciendo en cualquier país del mundo, aplicando su tecnología innovadora para mejorar la confiabilidad de la electricidad y la rentabilidad de las compañías de servicio eléctrico en todo el mundo.

Acerca de PTI

Somos una empresa especializada en poner al alcance de todos los actores presentes en la cadena de valor de la energía eléctrica las herramientas y soluciones necesarias para el desarrollo exitoso y eficiente de sus proyectos, de modo que podamos contar con energía de la mejor calidad. Con 20 años de experiencia diseñamos soluciones integrales de ingeniería en infraestructura eléctrica en las áreas de telecontrol, automatización y protección, análisis de sistemas de potencia y soluciones en tiempo real, potencia, instrumentación y calidad de energía, proyectos eléctricos, pruebas y servicios, I+D+I y nuevas tecnologías