

# Protección de Falla a Tierra

Programa Digital de Especificación

América Latina



# **Sistemas de protección de Falla a Tierra para equipo de Baja Tensión.**

## **I. Introducción**

En los sistemas eléctricos siempre existe la posibilidad de que se presente una interrupción en el suministro de energía debido a sobrecargas ó cortos circuitos ya sea por errores de operación, condiciones ambientales, falta de mantenimiento ó descargas atmosféricas.

En el caso del corto circuito, éste puede ser clasificado en los siguientes tipos:

### **1.- Corto circuito Sólido ó Franco.**

Se presenta cuando los conductores (línea, neutro ó tierra) están conectados sólidamente entre sí, presentándose una impedancia cero en dicha conexión por lo que se obtiene la condición de corriente máxima.

### **2.- Falla a Tierra**

Ésta sucede cuando una de las fases del sistema entra en contacto directo a tierra ó con alguna parte metálica que se encuentre aterrizada.

### **3.- Falla por Arco**

Sucede entre dos conductores cercanos pero que no entran en contacto directo.

Cualquiera de estas fallas es peligrosa tanto para el equipo como para las personas.

En éste documento analizaremos más a detalle la falla a tierra.

## **II. Porqué Protegernos contra una falla a Tierra.**

Las fallas a tierra pueden originarse de diferentes formas pero las más comunes son, reducción del aislamiento, daños físicos en el aislamiento de conductores ó una cantidad excesiva de transitorios que pueden dañar el aislamiento. Éstos problemas se pueden presentar debido a la humedad, contaminación ambiental, esfuerzos mecánicos, deterioro del aislamiento, etc. Aunque algunas de las situaciones anteriores pueden ser controladas con un buen programa de mantenimiento siempre existe el riesgo latente de una falla más comúnmente durante la instalación ó mantenimiento mayor de los equipos.

La magnitud de la corriente de falla a tierra varía de manera importante según el método de puesta a tierra que se esté empleando. Aunque la falla a tierra puede alcanzar valores de corriente de hasta miles de amperes, el NEC 2011 en el artículo 230.95 inciso (A) indica

que el ajuste máximo para la protección de falla a tierra deberá ser de 1200Amp y el tiempo máximo de retraso para corrientes de 3000Amp ó mas deberá ser de 1 segundo.

El decidir que ajuste en amperes seleccionar para cada dispositivo de protección depende básicamente de las características del circuito a ser protegido, por ejemplo si se alimentan cargas individuales los niveles de corriente pueden ser de 5Amp a 10Amp, pero por otro lado si el circuito alimenta múltiples cargas y cada carga cuenta con su protección individual, los ajustes de protección del alimentador deberán ser mayores a fin de permitir que las protecciones “aguas abajo” operen ante fallas de menor magnitud en sus respectivos circuitos.

Si el sistema no cuenta con un esquema de protección adecuado, los efectos de una falla a tierra pueden ser muy destructivos.

Las consecuencias de una falla a tierra pueden ir desde la interrupción del suministro de energía gracias a un adecuado sistema de protección hasta la destrucción completa de los equipos por explosión o incendio e incluso quemaduras ó electrocución de personal que se encuentre cerca del área de la falla. Las consecuencias de una falla a tierra van directamente ligadas al método de puesta a tierra que se esté utilizando.

### **III. Cuando se requiere protección de Falla a Tierra?.**

A pesar de que el NEC (NOM001 en México) ha sufrido diversos cambios a través de los años, los artículos correspondientes a la protección de falla a tierra no han cambiado.

**NOM001-SEDE-2005** en México (NEC-2011 Edition)

**215-10.** *Protección de equipos contra fallas a tierra. Todos los alimentadores con una corriente eléctrica de desconexión de 1000 A o más, en un sistema conectado en estrella y sólidamente conectado a tierra con una tensión eléctrica a tierra de más de 150 V, pero que no supere 600 V entre fases, deben estar dotados de equipo de protección contra fallas a tierra de acuerdo con las disposiciones de la sección 230-95.*

**230-95.** *Protección de equipo contra fallas a tierra. Se debe proveer protección a los equipos contra fallas a tierra en las acometidas de sistemas en “Y” (estrella) sólidamente puestos a tierra con tensión eléctrica a tierra superior a 150 V, pero que no supere 600 V entre fases para cada dispositivo de desconexión de la acometida de 1 000 A nominales o más.*

**240-13.** *Protección de los equipos por falla a tierra. Se debe proteger a los equipos contra fallas a tierra de acuerdo con lo establecido en 230-95 para instalaciones eléctricas sólidamente conectadas a tierra y en estrella, de más de 150 V a tierra pero que no superen 600 V entre fases, para cada dispositivo individual utilizado como medio de desconexión a la red del edificio o estructura que sea de 1 000 A nominales o más.*

Resumiendo los artículos anteriores de las normativas mencionadas podríamos enumerar las características con las que debe contar un sistema eléctrico para que se requiera la utilización de protección de falla a tierra de la manera siguiente:

1. Cuando se tengan sistemas sólidamente puestos a tierra.
2. Que el sistema tenga un voltaje de línea a línea de entre 260 y 600Volts inclusive.
3. Que el sistema cuente con un dispositivo de desconexión de 1000A ó más.
4. Que la carga alimentada no sean Bombas contra Incendio.

Las 4 características anteriores aplican para la NOM001 en México y para el NEC- 2011, sin embargo, existen algunas características adicionales mencionadas en el NEC-2011

1. El ajuste máximo de la protección de falla a tierra deberá ser de 1200A y el tiempo máximo de retraso para corrientes de 3000Amp ó más deberá ser de 1 segundo.(NEC 230.95A)
2. El sistema completo de protección de falla a tierra y no solamente la unidad de disparo individual, deberá ser probado en la instalación inicial.(NEC 230.95C)

#### **IV. Tipos de Puesta a Tierra.**

Actualmente ha aumentado el interés en el uso de sistemas de protección de Falla a Tierra debido a que éste tipo de protección es requerida por el NEC (NOM en México) y la NFPA en ciertos equipos y alimentadores , además del interés de los usuarios en cuanto a mejorar la protección de los operadores.

La intención de conectar a tierra los sistemas es el poder controlar el voltaje con respecto a tierra y proveer un camino a la corriente que nos permita detectar la conexión no deseada entre conductores de línea y tierra y al detectar ésta corriente iniciar la operación de los dispositivos de protección para retirar el voltaje de éstos conductores.

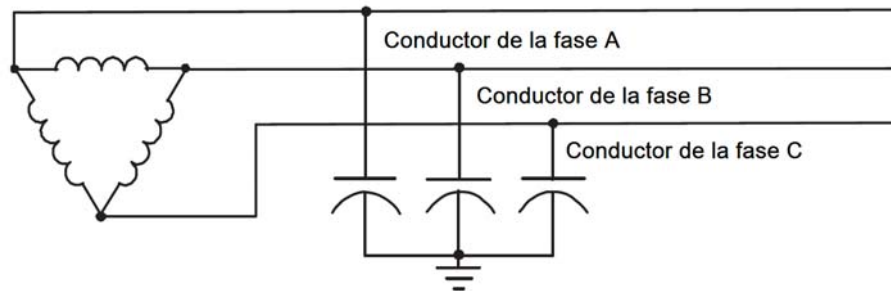
Existen diversos dispositivos de protección de Falla a Tierra en el mercado y éstos tienen su uso dependiendo del tipo de puesta a tierra con el que se cuente en nuestro sistema.

Siempre que se trabaja en el diseño de un sistema eléctrico surge la duda de cómo se debe aterrizar el sistema. El aterrizar los sistemas eléctricos es generalmente recomendado, sin embargo existen algunas excepciones. Existen diversos métodos y criterios para la puesta a tierra de sistemas y cada uno de ellos tiene su propio propósito.

A continuación se enlistan algunos de los métodos existentes y cuáles son sus ventajas y desventajas:

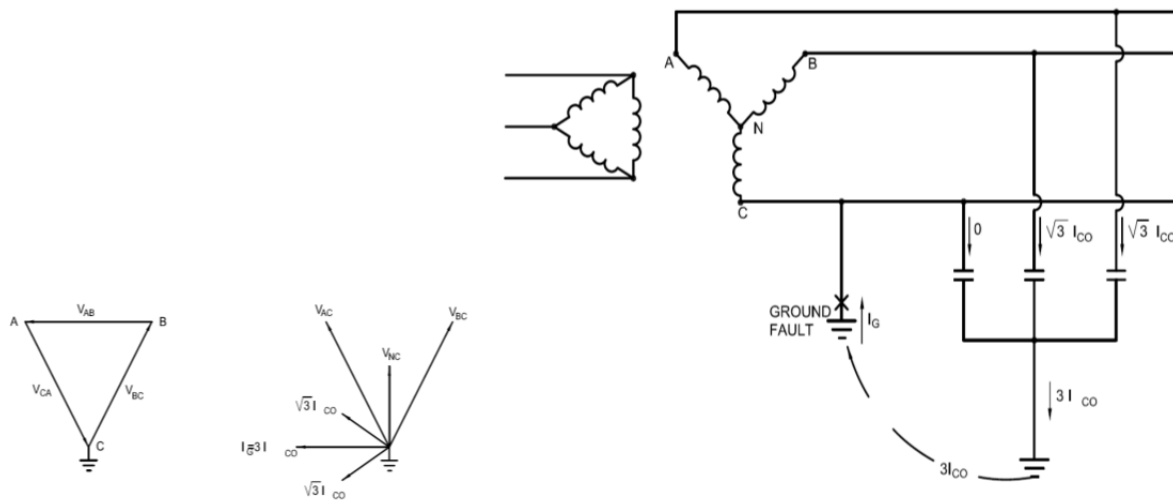
## -Sistema Flotante

Este sistema se define como aquel que no cuenta con una conexión intencional a tierra. Sin embargo siempre existe un acoplamiento capacitivo entre los conductores de línea del sistema y también entre conductores de línea y tierra. A este sistema también se le conoce como Sistema aterrizado por Capacitancia.



Cuando el sistema se encuentra operando de manera normal las corrientes capacitivas y los voltajes a tierra por fase son iguales y desplazados  $120^\circ$  uno del otro por lo que se tiene un sistema vectorial totalmente balanceado.

Si alguna de las fases entra en contacto con tierra, el flujo de corriente a través de esta fase a tierra se detendrá debido a que ya no habrá diferencia de potencial entre conductores. Al mismo tiempo en las fases restantes el flujo de corriente se incrementará por raíz de 3 y estarán desplazadas solamente  $60^\circ$  una de la otra. Por lo tanto, la suma vectorial de estas corrientes se incrementa en 3 veces la corriente  $I_{CO}$ .



Cada que se presenta una falla en esta configuración se genera un sobre voltaje que puede ser muchas veces mayor en magnitud que el nominal (6 a 8 veces) el cual es resultado de la resonancia entre la reactancia inductiva del sistema y la capacitancia distribuida a tierra. Estos sobre voltajes pueden causar fallas en el aislamiento del sistema.

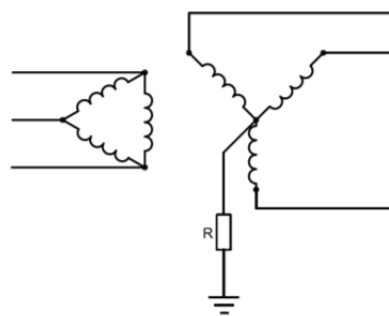
## **-Puesta a Tierra Mediante Resistencia**

Un sistema puesto a tierra mediante resistencia se define como aquel en el cual el neutro de un transformador ó generador es conectado a tierra a través de una resistencia.

Las razones para limitar la corriente utilizando una resistencia son las siguientes:

1. Reducir los daños durante una falla de equipo eléctrico, como tableros, transformadores, motores, cable , etc..
2. Reducir los esfuerzos mecánicos en circuitos y aparatos que conducen corrientes de falla.
3. Reducir el riesgo de electrocución para el personal.
4. Reducir el riesgo de arco eléctrico para el personal que pudiera causar una falla accidentalmente ó que se encuentre cerca de una de estas fallas.
5. Reducir la caída voltaje momentánea al ocurrir y liberar una falla a tierra.
6. Asegurar voltajes transitorios mientras que al mismo tiempo se evita el paro de un circuito con falla en la primera aparición de una falla a tierra( Aterrizamiento por alta Impedancia).

La puesta a tierra mediante resistencia puede ser de 2 tipos Alta Resistencia ó Baja Resistencia los cuales se distinguen por la cantidad de corriente que permiten que circule a tierra.



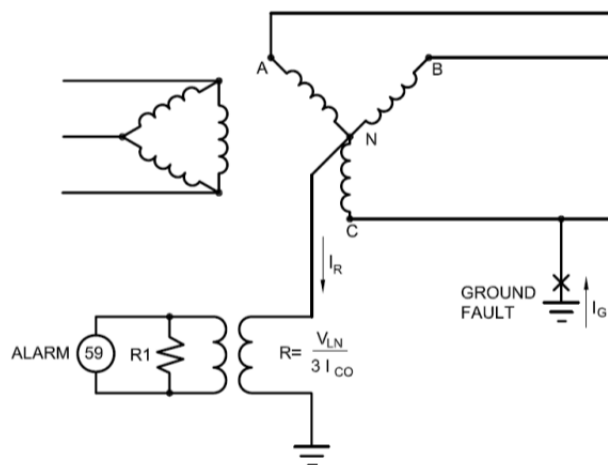
Sistema Puesto a Tierra  
Mediante Resistencia

## **-Puesta a Tierra por Alta Resistencia**

Para éste método se utiliza una resistencia de neutro de alto valor óhmico. La resistencia es utilizada para limitar la corriente de falla a tierra ( $I_g$ ) y típicamente se limita a 10A ó menos.

Cuando se tiene un sistema como éste, no se requiere una liberación inmediata de la falla ya que la corriente está limitada a un nivel muy bajo. Los dispositivos de protección asociados a un sistema de Alta Resistencia permiten al sistema seguir trabajando con la presencia de una falla a tierra y envían una alarma en lugar de disparar y abrir la protección asociada.

Un arreglo típico para detectar una falla a tierra en un sistema de Alta resistencia se muestra en la figura siguiente, en donde bajo operación normal el punto de neutro del transformador se encuentra con un potencial de cero, pero cuando una fase falla a tierra el voltaje en el neutro se eleva a casi el valor de línea a neutro y éste voltaje es detectado por un relevador para éste fin, el cual puede estar relacionado a una alarma visual y/o auditiva para que el personal de mantenimiento atienda, ubique y repare la falla.



Esquema simple de detección de falla a tierra en un sistema de Alta Resistencia

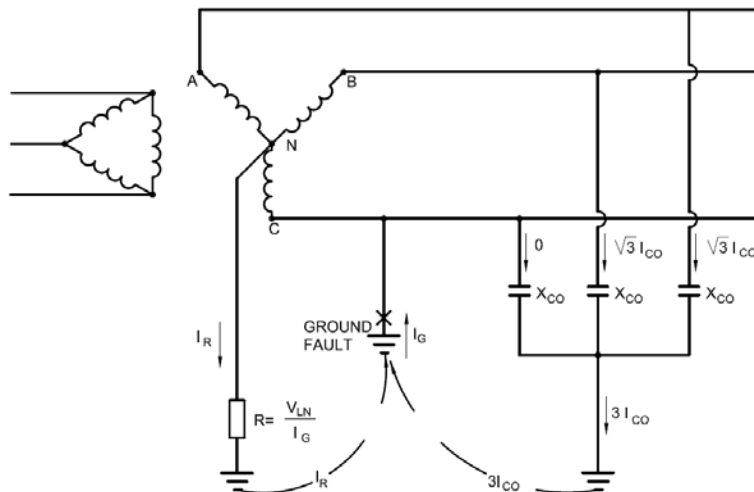
Las ventajas de utilizar éste sistema podrían ser las siguientes:

1. Continuidad del Servicio. La primera falla a tierra no requiere interrumpir el servicio.
2. Se reducen sobre-voltajes transitorios debidos a fallas recurrentes.
3. Un trazador de señal ó sistema de pulsos facilita la ubicación de la falla.
4. Se elimina la necesidad de un sistema coordinado de relevadores de falla a tierra.

Típicamente éste sistema puede ser utilizado en sistemas de Baja Tensión en donde no se tienen cargas monofásicas, en Media Tensión donde se requiere la continuidad del servicio y la corriente capacitiva no es muy alta y en retrofits en donde se tenía previamente un sistema no aterrizado.

## -Puesta a tierra por Baja Resistencia

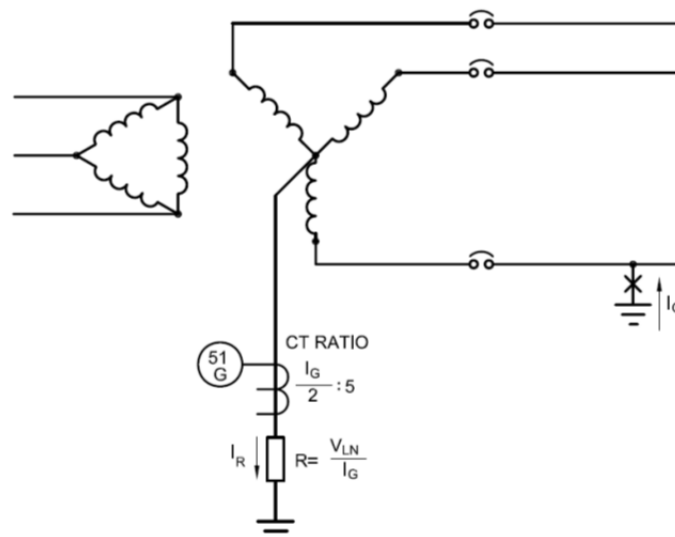
En éste sistema se limita la corriente de falla a tierra a un valor entre 100A y 1000A, siendo el valor más común de 400A. El valor de ésta resistencia se calcula como  $R = V_{LN}/I_g$ , donde  $V_{LN}$  es el voltaje de línea a neutro del sistema y  $I_g$  corriente de falla a tierra deseada.



Sistema de Baja Resistencia

Éste sistema tiene la ventaja de que facilita la liberación inmediata y de forma selectiva de la falla a tierra. El método utilizado para detectar ésta falla es el utilizar un relevador de sobre corriente 51G. Al presentarse una falla el voltaje en el neutro se eleva casi al voltaje de línea a neutro y comienza a fluir una corriente a través de la resistencia. Una vez que el relevador detecta la falla envía la señal de apertura al interruptor en baja tensión asociado.

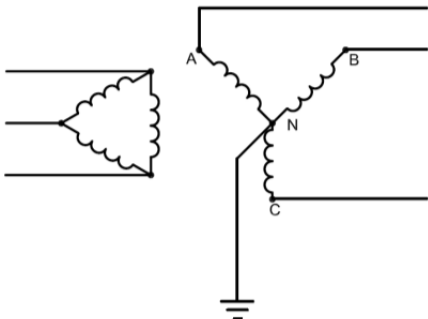
El aterrizamiento a través de Baja Resistencia se utiliza en sistemas de media tensión de 15KV y menores, particularmente en donde se utilizan grandes máquinas rotativas y donde se busca reducir la falla a tierra a cientos de amperes en lugar de miles de amperes.



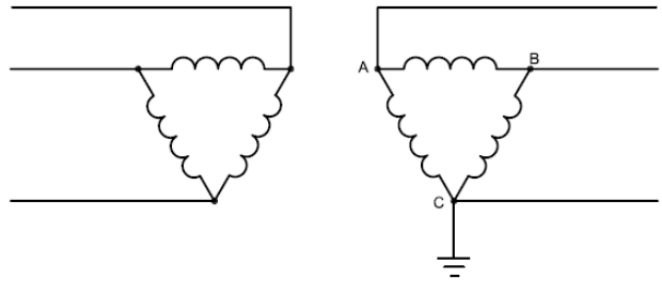


## -Sólidamente puesto a Tierra

Sólidamente Puesto a Tierra se refiere a la conexión del neutro directamente a tierra.



Estrella Aterrizada



Delta Aterrizada

Ésta configuración puede ser convenientemente protegida contra sobre voltajes y fallas a tierra. Éste sistema permite flexibilidad ya que se pueden conectar cargas de línea a neutro.

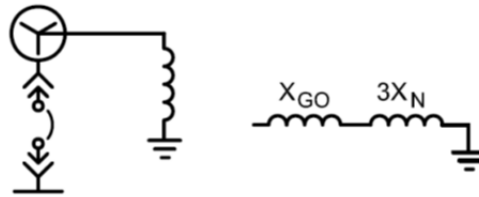
Cuando se utiliza ésta configuración en sistemas de 600V ó más se tienen que utilizar relevadores de protección residuales ó de secuencia cero. Los interruptores normalmente cuentan con transformadores de corriente que proveen la señal de cada una de las fases para el relevador de sobre corriente y el relevador de falla a tierra toma la señal de la estrella que se forma con los transformadores de corriente para incrementar la sensibilidad de fallas a tierra. Los métodos de detección como secuencia cero y residual serán analizados más adelante.

Una de las desventajas del sistema sólidamente puesto a tierra es que las magnitudes de falla a tierra que se alcanzan pudieran ser tan grandes que podrían destruir los equipos por completo. Sin embargo, si éstas fallas se liberan rápidamente los daños a los equipos estarían dentro de niveles "aceptables".

## -Puesta a Tierra mediante Reactancia

En esta configuración se instala un reactor entre el neutro y la tierra. Los niveles de corriente de falla a tierra al aterrizar a través de un reactor son considerablemente mayores a los niveles deseables en sistemas aterrizados por medio de resistencia, es por lo anterior que el aterrizar a través de un reactor comúnmente no se utiliza como una alternativa de puesta a tierra mediante baja resistencia.

El aterrizar a través de un reactor es una buena opción cuando lo que se busca es limitar la falla a tierra a niveles cercanos a la magnitud de fallas trifásicas. Normalmente ésta opción es más económica que el utilizar resistencias para la puesta a tierra.



### -Puesta a Tierra Resonante

A ésta configuración también se le conoce como neutralizador de falla a tierra y básicamente consiste en el aterrizar el sistema a través de un reactor "sintonizado" ( $X_L$ ) de tal manera que entre en resonancia con la capacitancia distribuida del sistema ( $X_{C0}$ ) de lo cual resulta una corriente de falla a tierra resistiva y de baja magnitud.

Ésta configuración no se utiliza comúnmente, pero puede ser aplicada a sistemas de transmisión de alta tensión ó para generadores en subestaciones centrales. Si el sistema cambia de características, es decir, si se tienen frecuentes cambios de circuitos ó reconfiguraciones el aterrizamiento resonante no es una opción ya que se tendría que re-sintonizar el reactor cada que exista una reconfiguración.

Las ventajas y desventajas de cada uno de los sistemas de aterrizamiento mencionados anteriormente son resumidos por la IEEE como se muestra a continuación:

	Ungrounded	Solid grounding	Reactance grounding		Ground-fault neutralizer	Resistance grounding	
			Low value reactor	High value reactor		Low resistance	High resistance
Current for phase-to-ground fault in percent of three-phase fault current	Less than 1%	Varies, may be 100% or greater	Usually designed to produce 25% to 100%	5% to 25%	Nearly zero fault current	20% and downward to 100 A to 1000 A	Less than 1% but not less than system charging current, $3I_{CO}$
Transient over-voltages	Very high	Not excessive	Not excessive	Not excessive	Not excessive	Not excessive	Not excessive
Surge arresters	Ungrounded-neutral type	Grounded-neutral type	Grounded-neutral type if current 60% or greater	Ungrounded-neutral type	Ungrounded-neutral type	Ungrounded-neutral type	Ungrounded-neutral type
Remarks	Not recommended due to overvoltages and non-segregation of fault	Generally used on systems (1) 600 V and below and (2) over 15 kV		Not used due to excessive overvoltages	Best suited for application in most medium-voltage industrial and commercial systems that are isolated from their electric utility system by transformers. <sup>a</sup>	Generally used on systems of 2.4 kV to 15 kV particularly where large rotating machines are connected.	Used on systems 600 V and below where service continuity is desired. <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Caution should be applied in using this form of grounding with industrial generation (see IEEE Std 367™). Best suited for application in most medium-voltage industrial and commercial systems that are isolated from their electric utility system by transformers. Ideal for use on medium-voltage generators. Also occasionally found on mission-critical 2.4 kV or 4.16 kV industrial or commercial distribution systems.

## V. Métodos de Detección de Falla a Tierra.

El flujo de corriente de falla a tierra puede ser monitoreado de diferentes formas ya sea para monitorear la corriente que sale de la falla ó la corriente que regresa al neutro de la fuente, ya sea un transformador ó un generador. Cuando se monitorea la corriente que proviene de la falla todas las líneas del sistema son monitoreadas individualmente y cuando se monitorea el regreso de la falla a tierra solamente se monitorea el neutro.

Para realizar éste monitoreo se utilizan transformadores de corriente ya sea en todas las líneas ó en el neutro dependiendo del método que se esté empleando. Los dispositivos de protección que reciben las señales provenientes de los transformadores de corriente deben tener la capacidad de ajustar los valores de "pick-up" ó disparo así como la capacidad de ajustar los retrasos de tiempo.

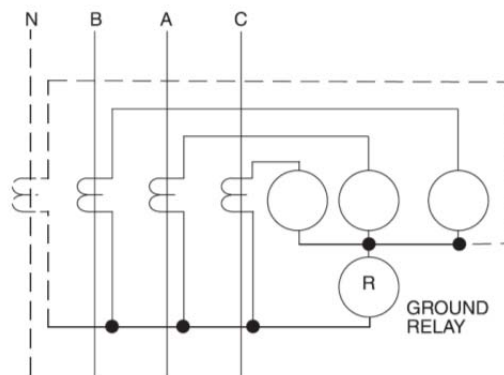
Existen diversos métodos de detección de falla a tierra para sistemas sólidamente puesto a tierra los cuales pueden ser analizados en el siguiente enlace:

<http://www.geindustrial.com/publibrary/checkout/GET-6533A?TNR=Application%20and%20Technical|GET-6533A|PDF>

A continuación se analizan 3 de métodos de monitoreo más comunes.

### -Protección Residual

La protección residual es comúnmente utilizada en sistemas de media tensión. Éste sistema consiste de la utilización de 3 transformadores de corriente interconectados los cuales envían una señal proporcional de la corriente de falla a tierra al relevador ó dispositivo de protección para que actúe. Éste sistema no es utilizado a menudo en equipos de baja tensión, sin embargo están disponibles sistemas de baja tensión con 3 transformadores de corriente conectados de manera residual.



En sistemas de 3 fases 3 hilos la resultante de la suma vectorial de las corrientes de fase es cero aún y cuando se presente una falla entre fases. Cuando una de las fases entra en

contacto con tierra la corriente de corto circuito circula a través de tierra y no por la línea fallada lo que produce un desbalance en el circuito generando una corriente residual que es detectada por el dispositivo de protección.

Cuando se tienen sistemas de 3 fases 4 hilos en donde se alimentan cargas monofásicas, se debe agregar un cuarto transformador de corriente para monitorear la corriente consumida por dichas cargas monofásicas así como las corrientes armónicas de secuencia cero producidas por cargas no lineales monofásicas como iluminación fluorescente. Si no se colocara dicho transformador de corriente el dispositivo de protección interpretaría el desbalance entre fases como una falla a tierra y abriría el circuito.

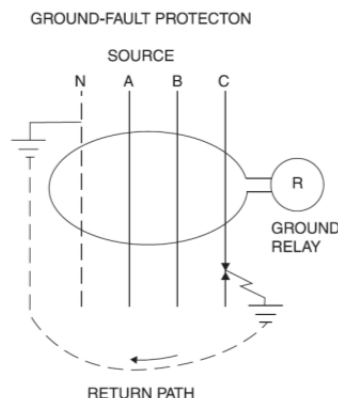
La selectividad del esquema de protección residual depende de la relación de transformación de los TCs el cual debe ser de la capacidad suficiente para las cargas normales del circuito. En este sistema no se utilizan disparos instantáneos debido a que durante el arranque de algunas cargas como motores se puede generar algún desbalance "normal" entre fases el cual generaría un disparo del dispositivo de protección.

Si se requiera mayor selectividad se debe utilizar el esquema de Núcleo Balanceado.

### **-Protección Núcleo Balanceado ( Sensor de Secuencia Cero).**

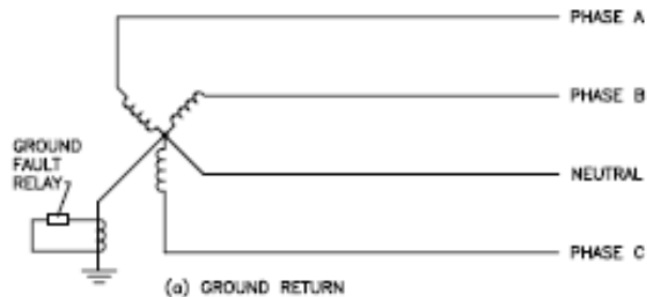
El método de Núcleo balanceado se basa en la sumatoria vectorial de flujos. En éste método se utiliza solamente un transformador de corriente el cual monitorea las tres fases del sistema ( y el neutro si existe ) al mismo tiempo. A diferencia del método residual el transformador de corriente es de menor capacidad de amperaje ya solamente monitorea un posible desbalance y no la corriente de carga de cada línea esto ayuda a que se puede tener una mejor selectividad.

En condiciones de operación normal (balanceado, desbalanceado, cargas monofásicas ó cortos circuitos entre fases) la suma vectorial de las corrientes que circulan a través del TC es cero. Cuando se presenta una falla a tierra la corriente circula a través de conductor de tierra y genera un desbalance en la salida del TC lo que genera la operación del dispositivo de protección.



## -Protección de Regreso a Tierra.

El colocar un transformador de corriente en el neutro aterrizado con un relevador de protección asociado, provee un método de detección de bajo costo. Debido a que solamente se monitoreara la corriente de falla a tierra el ajuste puede ser colocado a valores de corriente muy bajos.



En sistemas aterrizados por baja resistencia en 5 y 15KV se utiliza frecuentemente éste método donde las corrientes de falla a tierra son relativamente bajas.

También se utiliza en sistemas sólidamente aterrizados de 480V , 3 fases 3 hilos ó 3 fases 4 hilos. Para proveer una protección adecuada, el relevador debe ser cableado para disparar el interruptor principal del secundario y establecer un retraso de tiempo para permitir que el interruptor dispare y si una vez que el interruptor abrió se mantiene la falla a tierra se debe enviar una señal para que la protección del lado primario opere.

## Referencias

IEEE Green Book IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems

IEEE Buff Book IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems

IEEE Red Book IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants

GROUND FAULT PROTECTION FOR SOLIDLY GROUNDED LV SYSTEMS

NOM001-SEDE-2005

NEC-2011