

El neutro en las instalaciones eléctricas de baja tensión: interrumpir y proteger

Enrique Salazar Jaramillo

ensaja50@gmail.com

Citar: J. PAIME, 2025, 3, 47-55

1 junio de 2025

Resumen — Hay escrita una variada, pero, incompleta literatura técnica sobre cuándo seleccionar interruptores de tres o cuatro polos en las instalaciones con neutro corrido, con cargas monofásicas conectadas entre las fases y el neutro. Este trabajo pretende llenar ese vacío. La selección de los polos de un interruptor, está relacionada estrechamente con el sistema de puesta a tierra del neutro. Consideraremos para nuestro estudio, la clasificación dada en la norma IEC 60364, sobre instalaciones eléctricas de baja tensión (BT). Para tener los argumentos que justifiquen la selección adecuada de estos interruptores, se hará el análisis teniendo en cuenta que no haya riesgos para las personas y la instalación no se exponga a estrés fuera de sus límites. Se determinan las sobretensiones que pueden aparecer en los conductores neutros, las sobrecargas a las que pueden estar sometidos debido a cargas desequilibradas y debido a los armónicos y se grafican con ejemplos numéricos. Se describen los principales tipos de interruptores de 4 polos que ofrecen los fabricantes y las recomendaciones de la norma IEC al respecto. Este trabajo pretende dar los argumentos técnicos para una adecuada selección interruptores tetrapolares.

Abstract — A varied but incomplete technical literature exists on when to select three- or four-pole circuit breakers in installations with continuous neutral conductors, with single-phase loads connected between the phases and the neutral. This paper aims to fill this gap. The selection of a circuit breaker's poles is closely related to the neutral grounding system. For our study, we will consider the classification given in the IEC 60364 standard for low-voltage (LV) electrical installations. To provide arguments justifying the appropriate selection of these breakers, the analysis will be carried out taking into account that there are no risks to people and that the installation is not exposed to stress beyond its limits. The overvoltages that may appear on the neutral conductors, the overloads to which they may be subjected due to unbalanced loads and harmonics, are determined, and are graphed with numerical examples. The main types of four-pole circuit breakers offered by manufacturers and the IEC standard's recommendations in this regard are described. This work aims to provide the technical arguments for an adequate selection of four-pole switches

Términos clave: — sistemas de puesta a tierra, cortocircuito, a tierra, neutro, armónicos, sobrecargas.

Nomenclatura

I_1 corriente de secuencia positiva, A

I_2 corriente de secuencia negativa, A
 I_0 corriente de secuencia cero, A
 I_F corriente de falla a tierra, A
 R_N resistencia de puesta a tierra de la fuente, Ω
 R_G resistencia de puesta a tierra de la carga, Ω
 V_1 tensión de fase de secuencia positiva, V
 V_{fase} tensión de fase, V
 V_{NG} tensión del neutro a tierra, V
 Z_0 impedancia de secuencia cero, Ω
 Z_1 impedancia de secuencia positiva, Ω
 Z_2 impedancia de secuencia negativa, Ω
 Z_{sc} impedancia de c.c. del sistema, Ω
 Z_F impedancia de falla a tierra, Ω

I INTRODUCCIÓN

Como sabemos los conceptos de la puesta a tierra¹ y conductor neutro² son de vital importancia para aclarar muchos fenómenos eléctricos que se presentan en las instalaciones eléctricas de baja tensión (BT).

Las instalaciones eléctricas de BT actuales, utilizan sistemas 400/230 V, es decir, tres fases³ y neutro. Esto permite conectar cargas monofásicas entre las fases y el neutro y trifásicas de fuerza entre las fases. Se presenta, muchas veces, la disyuntiva de cuándo utilizar interruptores de 4 polos y cortar el neutro o utilizar interruptores de 3 polos y no hacerlo. En proyectos de instalaciones similares y para un mismo sistema de puesta a tierra se ven casos donde se utilizan solo interruptores tripolares o solo tetrapolares. Para formarnos un criterio enteramente técnico para tomar esta decisión, vamos a analizar los fenómenos al que es sometido el neutro en condiciones normales de operación y en condiciones de falla.

Se puede afirmar que la selección de un interruptor tetrapolar para un determinado sistema de puesta a tierra está influenciada por las tensiones y sobrecargas en el neutro que se originan por fallas a tierra monofásicas, fallas de fase-neutro, desbalance de carga, contenido de terceros armónicos y sus múltiplos impares y si hay fuentes de emergencia. En el presente artículo vamos a analizar cada uno de estos casos de tal modo que, en lo posible quede aclarado el uso de interruptores tetrapolares o tripolares en sistemas con neutro corrido (4 hilos).

Recordemos que el conductor neutro (N) tiene como función conducir las corrientes ocasionadas por las cargas desbalanceadas y el conductor de protección (PE)⁴, la de

¹ Según IEC 60050, **puesta a tierra**: hacer una conexión eléctrica entre una parte conductiva y una tierra (suelo) local.

² Según IEC 60050, **conductor neutro**: conductor de una línea polifásica conectado a un punto estrella de un elemento polifásico

³ Según IEC 60050, **fase**: designación de cualquier conductor, o conjunto de conductores, de una línea de CA polifásica que se pretende energizar en condiciones normales de uso.

⁴ Según IEC 60050, **conductor de protección**: conductor provisto para fines de seguridad eléctrica

conducir las corrientes de falla a tierra. En el conductor llamado PEN circulan tanto las corrientes de carga como las corrientes de falla a tierra y no es posible discriminarlas. Debe tenerse en cuenta, además, que, para reducir el riesgo por electrocución, el conductor de protección PE, *nunca* debe interrumpirse [9].

II FALLA A TIERRA MONOFÁSICA

Se sabe que en condiciones normales de funcionamiento el neutro del sistema prácticamente se encuentra al potencial de tierra (G), salvo que debido a cargas desbalanceadas se produzca el desplazamiento del mismo y adquiera un potencial a tierra. Sin embargo, cuando se producen fallas a tierra, el neutro puede adquirir tensiones peligrosas para las personas y cargas sensibles. Para analizar este problema utilizaremos un modelo simplificado para el circuito equivalente de una falla a tierra.

Modelo simplificado

Vamos a derivar el modelo simplificado, partiendo del circuito utilizado en los sistemas de potencia obtenido por componentes simétricas para fallas monofásicas a tierra. En la Fig. 1 podemos apreciar la representación física de una falla a tierra de la fase *a* y su circuito equivalente de secuencias.

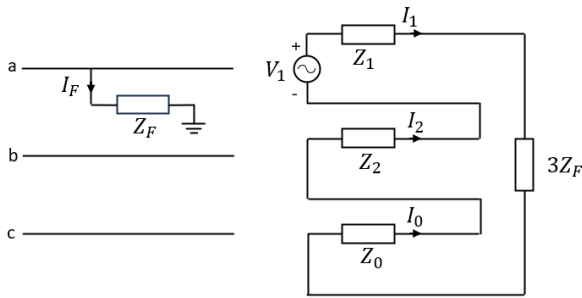


Figura 1. Representación física de una falla monofásica a tierra y su circuito de secuencias

Vemos que las corrientes en cada secuencia son iguales, podemos concluir que

$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{V_1}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_F} = \frac{I_F}{3} \quad (1)$$

La naturaleza simétrica de los cables, líneas y transformadores (elementos que no sean máquinas rotativas) hace que sus impedancias de secuencia negativa Z_2 sean iguales a las impedancias de secuencia positiva Z_1 . En baja tensión la impedancia de secuencia cero de los cables es aproximadamente igual a la impedancia de secuencia positiva, y en caso de los transformadores para las conexiones Delta-Estrella con neutro puesto sólidamente a tierra y Estrella-Estrella con ambos neutros sólidamente puestos a tierra, se puede aproximar también la impedancia de secuencia cero a la de secuencia positiva, por lo tanto, en circuitos de baja tensión podemos considerar, sin afectar significativamente los resultados, que

$$Z_1 = Z_2 = Z_0 = Z \quad (2)$$

Por lo tanto, de (1) y (2), la corriente de falla a tierra para redes en BT se puede expresar como

$$I_F = \frac{3V_1}{3Z + 3Z_F} \quad (3)$$

En (3), la tensión de secuencia positiva V_1 es la tensión de fase del sistema V_{fase} y Z es la suma de la impedancia de cortocircuito del sistema Z_{sc} (hasta las barras de BT) y las impedancias de los cables de fase Z_{fase} . El valor de Z_F dependerá del sistema de puesta a tierra, y se analizará más adelante, por lo tanto, podemos expresar (3) como.

$$I_F = \frac{3V_{fase}}{3(Z_{sc} + Z_{fase}) + 3Z_F} = \frac{V_{fase}}{Z_{sc} + Z_{fase} + Z_F} \quad (4)$$

En la Fig. 2 se muestra el circuito equivalente correspondiente a la ecuación (4)

Sistema de puesta a tierra TN

En los sistemas de puesta a tierra TN, se pueden presentar tres casos, el sistema TN-S (cable N, separado del cable PE), sistema TN-C (cable N y PE es una solo, PEN) y el sistema TN-C-S (un tramo es TN-C y sigue uno TN-S). En la Figura 3 se muestra un sistema TN-S, donde la fase *a* se ha puesto a tierra al hacer contacto con la envolvente del Tablero de Distribución y G representa la tierra profunda que está a un potencial cero.

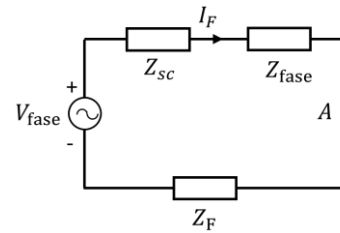


Figura 2. Circuito equivalente de la ecuación (4)

En este caso, como se ve en el circuito equivalente de la Figura 4, la impedancia Z_F será la impedancia del cable de protección Z_{PE} . La corriente de falla circula por el cable de fase y el cable de protección, y no pasa por la resistencia de puesta a tierra R_N y por lo tanto, no habrá caída de tensión en ella; esto es, la tensión del neutro será $V_{NG} = 0$. Para el caso de un sistema TN-C, y TN-C-S igualmente el neutro estará a un potencial cero.

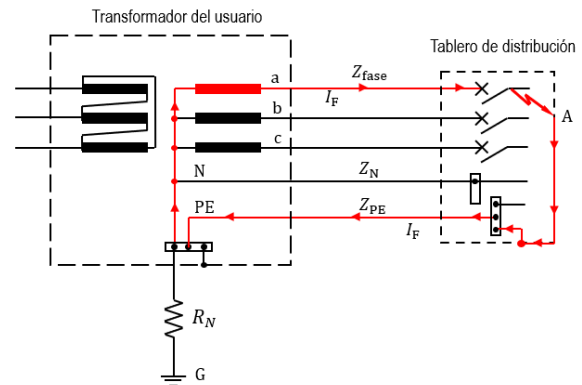


Figura 3. Representación de un sistema TN-S, con la fase a puesta a tierra y la ruta que sigue la corriente de falla I_F

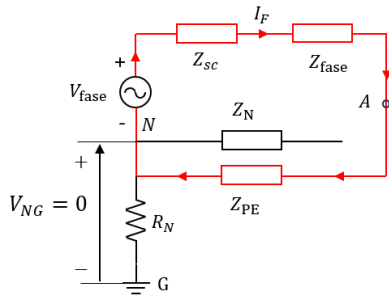


Figura 4. Circuito equivalente correspondiente a la representación de la figura 3

Esto significa que en caso de una falla a tierra en un sistema TN, el neutro no representa ningún peligro, además, los dispositivos de protección de sobrecorriente (DPSC) despejarán la falla en brevísimo tiempo.

Sistema de puesta a tierra TT

En los sistemas TT, la tierra de la fuente se encuentra separada de la de carga, como se muestra en la Figura 5. En dicha figura la fase *a* se ha puesto a tierra al hacer contacto con la envolvente del Tablero de Distribución.

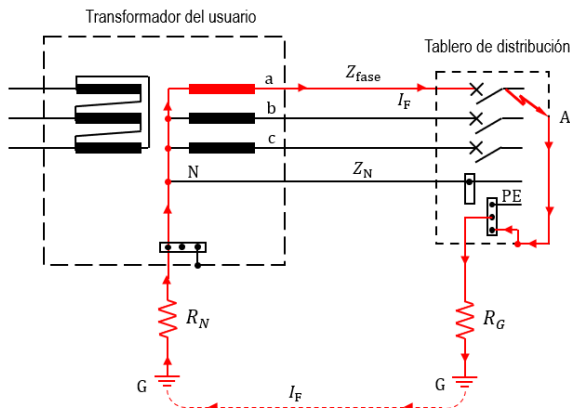


Figura 5. Representación de un sistema TT, con la fase *a* puesta a tierra y la ruta de la corriente de falla I_F

En este caso, como se ve en el circuito equivalente de la Figura 6, la impedancia Z_F en (4) será la suma de las resistencias de puesta a tierra de la fuente R_N y de la carga R_G . La corriente de falla circula por el cable de fase y ambas tierras. La tensión del neutro en este caso ya no será cero, sino $V_{NG} = I_F R_N$.

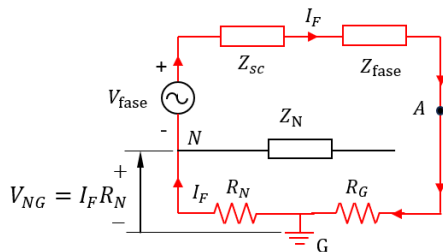


Figura 6. Circuito equivalente de una falla a tierra de la fase *a* en un sistema TT. Corresponde al esquema de la figura 5.

Por la ecuación (4), la corriente de falla será

$$I_F = \frac{V_{fase}}{Z_{sc} + Z_{fase} + R_N + R_G} \quad (5)$$

Esta ecuación se puede simplificar más, considerando que $Z_{sc} + Z_{fase} \ll R_N + R_G$, obteniendo la expresión muy simplificada

$$I_F = \frac{V_{fase}}{R_N + R_G} \quad (6)$$

y por lo tanto, la tensión en el neutro respecto de tierra será

$$V_{NG} = \frac{R_N}{R_N + R_G} V_{fase} \quad (7)$$

Si a modo de ejemplo consideramos una resistencia de la fuente $R_N = 15 \Omega$ y de carga $R_G = 5 \Omega$, para una tensión de fase de 230 V, en neutro adquiere una tensión $V_{NG} = 172.5$ V, es una tensión peligrosa. Normalmente se exigen resistencias de puesta a tierra mayores en la fuente que en la carga, para reducir las tensiones de contacto (en este caso sería de 57.5V).

Entonces en caso de una de una falla a tierra en un sistema TT, el neutro puede adquirir tensiones peligrosas. Si bien es cierto que las fallas a tierra serán despejadas por los dispositivos de protección (RCDs), debido a que se pueden presentar tensiones más altas que las tensiones de contacto, los tiempos permitidos de permanencia de la falla tienen que ser menores.

Sistema de puesta a tierra IT

En los sistemas IT, el neutro de la fuente no se encuentra conectado a tierra o lo hace a través de una alta resistencia y las carcassas de las cargas sí deben conectarse a tierra, sea individualmente o unidas a un mismo cable de protección. En la Figura 7 se representa un sistema IT y se muestra una falla a tierra de la *a* al hacer contacto con la envolvente del Tablero de Distribución. Esta falla a tierra hace que la capacitancia del sistema se convierta en una carga desequilibrada, por lo tanto, las impedancias de las tres ramas *a*, *b* y *c* ya no son iguales. La resistencia de puesta a tierra R_G , de hecho, estará en paralelo a la capacitancia de la fase fallada, en este caso la fase *a*. El circuito equivalente se muestra en la Figura 8.

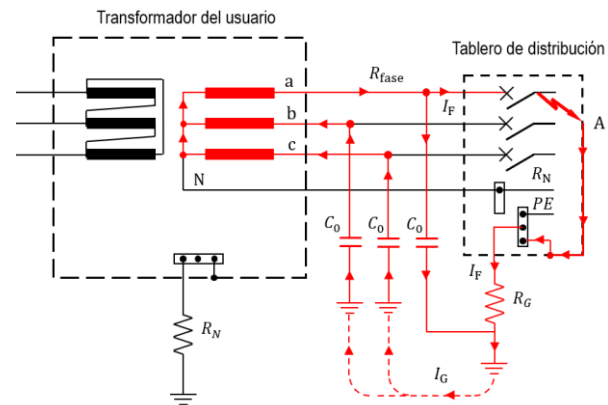


Figura 7. Representación de un sistema IT, con la fase *a* puesta a tierra y la ruta de la corriente de falla I_F

Para facilitar el cálculo de la tensión del neutro respecto a tierra V_{NG} , utilizando el circuito de la figura 8, podemos establecer las siguientes ecuaciones

$$\begin{aligned} V_{aG} &= V_{aN} + V_{NG} \\ V_{bG} &= V_{bN} + V_{NG} \\ V_{cG} &= V_{cN} + V_{NG} \end{aligned} \quad (8)$$

Ahora calculamos V_{NG} aplicando el teorema de Millman ^{[5],[7]} y algunas simplificaciones obtenemos

$$V_{NG} = \frac{V_{aN}}{1 + j3\omega C_0 R_G} \quad (9)$$

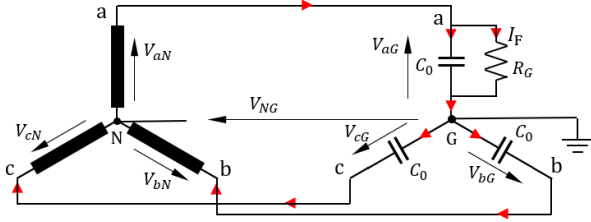


Figura 8. Circuito equivalente al producirse una falla tierra de la fase a en un sistema IT

En este caso $V_{aN} = V_{fase}$. Si hacemos $R_G \approx 0$, $V_{NG} \approx V_{fase}$. Entonces en caso de una de una primera falla a tierra en un sistema IT, el neutro alcanza prácticamente la tensión de fase, esto es, en el caso de un sistema 400/230 $V_{NG} = 230$ V.

Por lo tanto, en el caso de la primera falla a tierra de un sistema IT, el neutro adquiere tensiones peligrosas. En este caso la situación se agrava debido a que no se despeja la falla, no es vista por ningún elemento de protección y esta tensión permanecerá durante un tiempo relativamente grande. En caso de mantenimiento el neutro puede ser tocado, aun cuando se corten las fases.

En general, una falla a tierra en una determinada ubicación de la instalación, produce una elevación de la tensión del neutro respecto a tierra, en toda la instalación; es decir, las barras neutras de todos los tableros y los cables neutros estarán a esa tensión.

En la Tabla 1 se resumen los resultados obtenidos, para las tensiones en el neutro, para fallas a tierra monofásicas, donde se califica el riesgo de hacer contacto con él.

Tabla 1. Puesta a tierra monofásica

Esquema	Riesgo al tocar el neutro	Protección
TN	Bajo	Protecciones eliminan la falla
TT	Medio-Alto	Protecciones eliminan la falla
IT	Alto	Protecciones no actúan*

* Primera falla a tierra

III CORTOCIRCUITO FASE-NEUTRO

Un cortocircuito de fase-neutro es similar a una falla a tierra monofásica en un sistema TN-S, con la diferencia de que la corriente de falla pasará por los cables de fase y el cable neutro N y no por el cable de protección PE, como se puede ver en la fig. 9. En este caso las corrientes en cualquier sistema de puesta a tierra con neutro corrido, serán similares y de un elevado valor, debido a que las impedancias de la ruta (impedancias de los cables de fase y del cable neutro) que sigue dicha corriente son pequeñas.

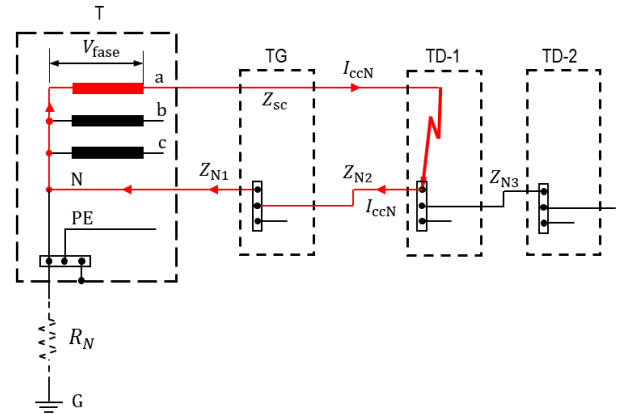


Figura 9. Esquema simplificado de una falla de la fase a con neutro en el tablero TD-1

En la Fig. 9, se muestra una falla de la fase a con el neutro en el tablero de distribución TD-1. Los cables tanto del neutro como de fases normalmente corresponden a cables de diferente sección y longitud por tramo. Para simplificar el análisis solo estamos diferenciando los cables del neutro cuyas impedancias se representan por Z_{N1} , Z_{N2} y Z_{N3} , como se muestra en la Fig. 10 y podemos llegar a la siguiente relación

$$I_{ccN} = \frac{V_{fase}}{Z_{sc} + Z_{fase} + Z_{N1} + Z_{N2}} \quad (10)$$

La tensión del neutro del Tablero TD1 respecto a tierra, será

$$V_{NG2} = (Z_{N1} + Z_{N2}) I_{ccN}$$

$$V_{NG2} = \frac{Z_{N1} + Z_{N2}}{Z_{sc} + Z_{fase} + Z_{N1} + Z_{N2}} V_{fase} \quad (11)$$

La tensión del neutro del Tablero TG, respecto a tierra será

$$V_{NG1} = \frac{Z_{N1}}{Z_{sc} + Z_{fase} + Z_{N1} + Z_{N2}} V_{fase} \quad (12)$$

Evidentemente, $V_{NG1} < V_{NG2}$; sin embargo, la tensión a tierra del neutro V_{NG3} del tablero TD-2, será igual a la del neutro del tablero TD-1, $V_{NG3} = V_{NG2}$, ya que no hay caída de tensión en la impedancia Z_{N3} .

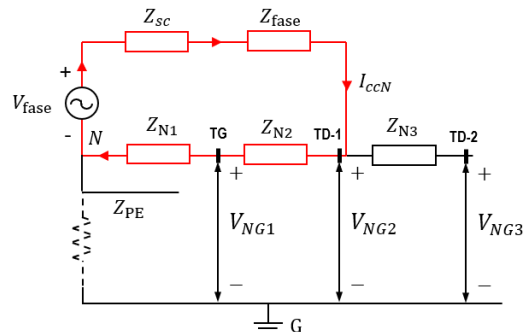


Figura 10. Circuito equivalente de una falla de fase a neutro. Corresponde al esquema de la figura 5

Se debe tener en cuenta que todas las barras neutras (y los cables) de los tableros aguas debajo de TD-1, tendrán la tensión

V_{NG2} . Los neutros de los tableros aguas debajo de TG en otros circuitos derivados diferentes al que corresponde a TD1 (en este caso) estarán a la tensión V_{NG1} .

En todos los sistemas de puesta a tierra, los cortocircuitos fase-neutro serán despejadas rápidamente por los dispositivos de protección de sobrecorriente (DPSC).

Para tener una idea de los valores de tensión que se producen durante una falla fase-neutro, consideremos que se alimenta un transformador de 1600 kVA, 22.9/0.400-0.23 V desde un sistema de 400 MVA de potencia de cortocircuito. Consideremos que los cables de fase y de neutro son de la misma sección. Del transformador al TG se alimenta con 5 ternas de 240 mm², recorrido de 30 m. Del TG al TD-1 con un cable de 95 mm², recorrido 50 m y del TD1 al TD-2 con un cable de 35 mm², recorrido 100 m.

Con estos datos obtenemos (en mΩ): $Z_{sc} = 1.302 + j6.374$, $Z_{5 \times 240} = Z_{N1} = 0.844 + j0.675$, $Z_{1 \times 95} = Z_{N2} = 14.2 + 4.5$. No es necesario calcular la impedancia Z_{N3} . Así obtenemos

$$I_{ccN} = \frac{230}{35.57} = 6466 \text{ A}$$

La tensión del neutro de TD-1 (también de TD-2) será

$$V_{NG2} = V_{NG3} = \frac{15.91}{35.57} \cdot 230 = 102.9 \text{ V}$$

La tensión del neutro de TG será

$$V_{NG1} = \frac{1.08}{35.57} \cdot 230 = 7.0 \text{ V}$$

Si las secciones de los cables neutros fueran menores que la sección de los cables de fase, las tensiones de los neutros aumentan.

Por lo tanto, en el caso de un cortocircuito fase neutro, si bien es cierto que aparecen tensiones peligrosas, estas serán despejadas en un tiempo muy corto, por la actuación de los DPSC. Se puede considerar que el riesgo al tocar en neutro es bajo-medio.

ACLARACIÓN: A diferencia de los *contactos indirectos*, que se producen al tocar una parte conductiva expuesta, al adquirir un potencial a tierra por una falla a tierra, los conductores neutros se consideran con tensión y tienen el mismo tratamiento que los conductores de fase, pero la norma IEC 60364 no los considera como un contacto directo por lo tanto podemos considerarlo como un *riesgo eléctrico potencial*.

El riesgo de tocar un conductor neutro que ha adquirido un potencial peligroso a tierra, se puede dar mayormente cuando por razones de mantenimiento se entra en contacto con él en un equipo intervenido donde se ha cortado la alimentación (3 fases), pero no el neutro. Dentro de una instalación, la falla que origina la elevación del potencial del neutro puedes estar muy alejada del equipo intervenido para mantenimiento.

IV CORRIENTES EN EL NEUTRO DEBIDO A CARGAS LINEALES Y NO LINEALES

Otro de los fenómenos que producen un aumento en la tensión del neutro son las caídas de tensión que se producen en los conductores neutros debido a las corrientes que circulan por ellos debido a cargas desbalanceadas lineales o cargas no lineales.

Cargas lineales

El desbalance más extremo que puede darse, es que solamente quede conectada una carga monofásica entre una fase y el neutro. En un caso extremo, si se consideran secciones de cable de fase y neutro iguales, la máxima tensión que puede adquirir el neutro respecto a tierra no puede superar la caída de tensión permitida (digamos 5%), esto es, en un sistema 400/230 V, 20V. Normalmente las corrientes que circularan por el neutro hasta el transformador serán pequeñas comparadas con la corriente total de diseño y por lo tanto las tensiones que adquirirá en neutro serán menores de 20V y no representan ningún peligro para las personas si entraran en contacto con él, por ejemplo, en el caso de mantenimiento.

Veamos que puede ocurrir con la instalación (cables), si un circuito derivado trifásico, está alimentando una carga monofásica sobrecargada, la corriente que pasa por la fase será igual a la del neutro. Si la sección de los cables de fase es igual a la sección del neutro, el dispositivo de protección de sobrecarga de fases protegerá tanto los cables de fase como el neutro y, por lo tanto, no es necesario una protección adicional para el conductor neutro. Si los conductores de fase tienen una sección mayor que los del neutro, éste, puede sobrecargarse aún si los cables de fase no lo están y por lo tanto no estará protegido el neutro. En estos casos se requiere proteger el neutro con un dispositivo de umbral de sobrecarga menor que el de las fases.

Cargas no lineales

Las cargas no lineales generan corrientes armónicas y estas a su vez, producen un calentamiento adicional en los cables. Los armónicos que afectan más al neutro, que a las fases son los terceros armónicos y sus múltiplos impares (9, 15, 21, ...), pero, son los terceros armónicos los que tiene una mayor amplitud y por lo tanto, lo afectan más.

Base teórica

Se pueden distinguir 3 grupos de armónicos ^[3]: de primer orden ($h = 6k + 1$) en el cual las corrientes de fase forman un sistema directo (secuencia positiva), los armónicos de tercer orden ($h = 6k + 3$) forman un sistema homopolar (secuencia cero) y los armónicos de quinto orden ($h = 6k + 5$) un sistema inverso (secuencia negativa), donde h es el orden armónico y $k = 0, 1, 2, \dots$.

El valor eficaz ^[4] de una corriente con contenido armónico esta dado por

$$I_{ef} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (11)$$

$$I_{ef} = \sqrt{\sum (I_{6k+1})^2 + \sum (I_{6k+3})^2 + \sum (I_{6k+5})^2} \quad (12)$$

Escenarios de análisis

Consideramos una red de alimentación equilibrada y balanceada. Se analizan tres escenarios y se calcula la relación de la corriente eficaz en el neutro respecto a la corriente eficaz del conductor de fase:

- Cargas balanceadas, carga en las tres fases
- Cargas desbalanceadas, cargada en dos fases
- Cargas desbalanceadas, cargada en una fase

a. Cargas balanceadas

En el neutro siempre se sumarán las corrientes de las 3 fases, obteniendo como resultado que solo circularán los armónicos de tercer orden y sus múltiplos impares. La suma de las corrientes armónicas de primer y quinto orden de las 3 fases se cancelarán. Por lo tanto, obtenemos

$$\frac{I_{N,3}}{I} = \frac{\sqrt{\sum (3I_{6k+3})^2}}{\sqrt{\sum (I_{6k+1})^2 + \sum (I_{6k+3})^2 + \sum (I_{6k+5})^2}} \quad (13)$$

b. Cargas en dos fases

Igualmente, en el neutro se sumarán todas las corrientes. Los armónicos de tercer orden se duplicarán y la suma de las corrientes armónicas de primer y quinto orden, al sumarse vectorialmente será iguales a las de fase. Así, obtenemos

$$\frac{I_{N,2}}{I} = \frac{\sqrt{\sum (I_{6k+1})^2 + \sum (2I_{6k+3})^2 + \sum (I_{6k+5})^2}}{\sqrt{\sum (I_{6k+1})^2 + \sum (I_{6k+3})^2 + \sum (I_{6k+5})^2}} \quad (14)$$

c. Cargas en una fase

En este caso, las corrientes en el neutro y en la fase serán iguales

Datos de carga

El efecto de las corrientes con contenido armónico sobre el conductor neutro, lo analizamos considerando las cargas mostradas en la Tabla 2.

Tabla 2. Espectro armónico de cargas no lineales

Orden armónico (h)	Espectro armónico (%)
1	100.0
3	75.0
5	43.2
7	20.0
9	18.9
11	14.1
13	10.8

En la Tabla 3 se dan los resultados de los cálculos para cada escenario, utilizando las ecuaciones (12), (13) y (14). Se considera que todas las cargas son no lineales.

Tabla 3. Intensidades de corriente (%)

Escenario de análisis	I_{fase}	I_{neutro}
Cargas balanceadas	100	170.3
Cargas en dos fases	100	140.2
Carga monofásica	100	100.0

En la figura 11 se ha graficado la carga en el neutro de un circuito con cargas balanceadas y con cargas conectadas en 2 fases, en función del contenido de cargas no lineales. Podemos ver, por ejemplo, que para el 100% de cargas no lineales los resultados son los de la Tabla 3.

Podemos ver que no siempre las sobrecargas por cargas balanceadas son mayores de con cargas conectadas en 2 fases. En este caso, el cambio ocurre con un 60% de cargas no lineales.

Normalmente los circuitos finales son los que tienen una mayor carga no lineal.

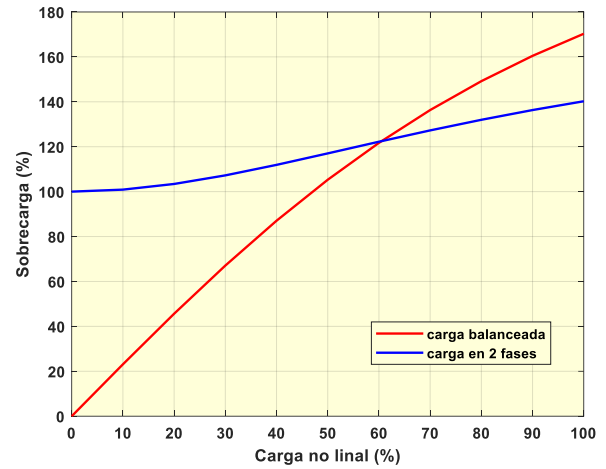


Figura 11. Se muestra la variación de la carga (sobrecarga) en el neutro en función del porcentaje de la carga no lineal. Se asume que las cargas monofásicas son iguales. Sean lineales o no lineales.

Los resultados de las sobrecargas en los cables de fase y de neutro son aproximados ya que no se está considerando el efecto de los armónicos en las resistencias de los cables que tenderá a reducir aún más la capacidad de conducción de los mismos, que no es materia del presente artículo. Para mayor detalle sobre este efecto ver las referencias [4] y [6]. Sin embargo, para ilustrar efectos de los armónicos en el neutro es suficiente esta forma aproximada.

V. SISTEMAS CON FUENTES DE ALTERNATIVAS

En los sistemas TN-S, al considerar la inclusión de fuentes alternativas (grupos de emergencia u otra fuente) las puestas a tierra deben disponerse de forma que no se produzcan corrientes parásitas para las corrientes del neutro, y las corrientes de falla a tierra fluyan por rutas predecibles de baja impedancia, para garantizar el correcto funcionamiento de las protecciones de falla a tierra, si estas se instalan.^{[1],[8]}

Corrientes parásitas de neutro. Alimentación red normal

En la figura 10 se muestra un arreglo con suministro normal (N) y de emergencia (E), que utiliza un dispositivo de transferencia de tres polos (TT), esto es, no se interrumpe el neutro. La carcasa del suministro normal (N) y del alternativo (E) están puestos a tierra independientemente. Las barras neutras y las barras de tierra de cada tablero (TGN y TGE) están unidos y en el TGN se une la barra neutra con la barra a tierra. Se ha instalado un dispositivo de protección contra fallas a tierra el circuito normal. En este caso no se considera ninguna falla a tierra, pero sí, una corriente circulando por el neutro debido al desbalance de cargas.

Vemos que se presenta una ruta adicional para la corriente del neutro I_N , por la que circula una corriente parásita I_{NP} que no pasa por el sensor de falla a tierra. Ya que la circulación de corrientes en el neutro es normal en instalaciones de BT (las cargas no están perfectamente balanceadas) por el sensor de falla a tierra la suma de corrientes debe ser cero, en este caso se ve que la corriente que pasa por el sensor no lo es, detectando una corriente diferencial de $\Delta I = I_{NP} \neq 0$, que podría provocar

un disparo indeseado. Por lo tanto, esta disposición no es adecuada.

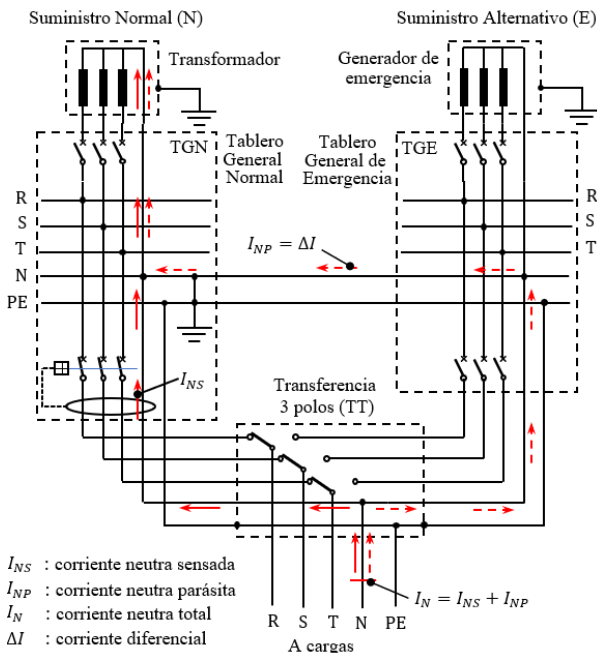


Figura 10. Corrientes neutras parásitas. La figura muestra dos suministros (normal y emergencia), alimentan la carga en forma alternativa mediante una transferencia de tres polos, sin interrupción del neutro. Parte de la corriente del neutro (I_{NP}) sigue otra ruta y no pasa por el toroide. Toda la corriente de neutro debería pasar por el toroide.

Corrientes de falla a tierra fluyen por otras rutas. Alimentación red normal

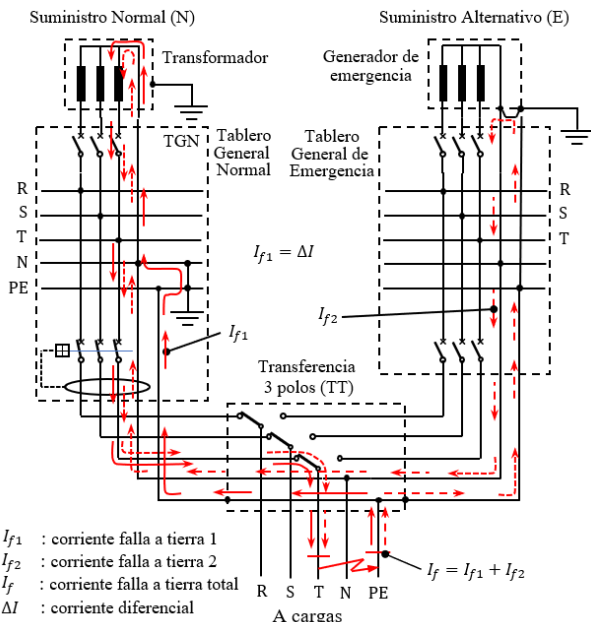


Figura 11. Corrientes de falla a tierra fluyen por otra ruta. La figura muestra dos suministros (normal y emergencia). La carga se alimenta desde la red normal mediante una transferencia de tres polos. Parte de la corriente de falla a tierra de retorno pasa por el sensor, no debiendo pasar ninguna corriente de falla a tierra de retorno por el sensor.

En la Figura 11 se muestra un arreglo en el cual la barra neutra y la barra de tierra de los tableros TGN y TGE no están unidas. Dentro del TGN se unen la barra neutra y la de tierra. El suministro alternativo tiene el neutro puesto a tierra en el lugar y se une con la barra a tierra del TGE (es lo mismo que hacer la unión en el TGE). Se produce una falla a tierra de la fase T.

Vemos que se presenta una ruta adicional y una parte de la corriente de falla (I_{f2}) circula por el conductor de protección PE y cierra por el conductor neutro N del circuito de emergencia. Esta corriente se anula en el sensor de falla a tierra y por lo tanto el sensor solo ve una corriente diferencial $\Delta I = I_{f1} < I_f$. Por lo tanto, podría no actuar. Este arreglo tampoco es adecuado.

Corrientes de falla a tierra fluyen por otras rutas. Alimentación red emergencia

En la figura 12 se muestra el mismo arreglo que el mostrado en la figura 11, pero la alimentación a la carga se realiza mediante el generador de emergencia. Se produce una falla a tierra de la fase T.

Vemos que se presenta una ruta adicional para la corriente de falla, una parte de la corriente de falla (I_{f2}) circula por el conductor de protección PE y cierra por el conductor neutro N del circuito normal que pasa por el sensor pudiendo provocar una actuación indeseada de la protección de falla a tierra. Al estar fuera de servicio el sistema normal no debería accionarse por ningún evento la protección de falla a tierra. Por lo tanto, este arreglo no es adecuado.

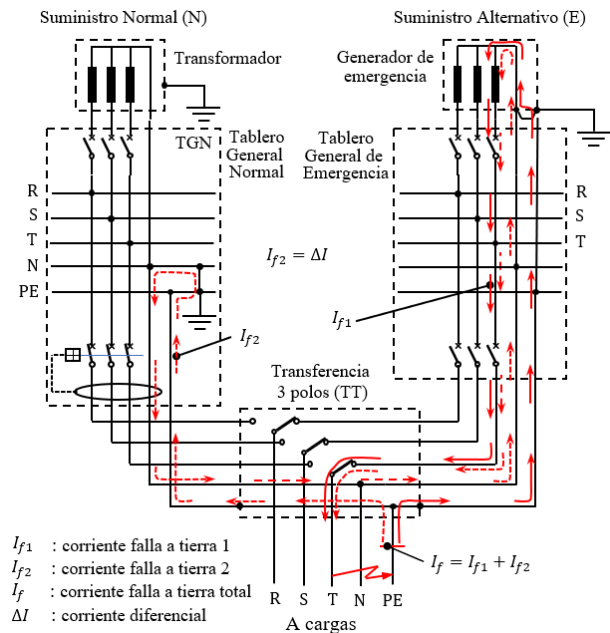


Figura 12. Corrientes de falla a tierra fluyen por otra ruta. La figura muestra dos suministros (normal y emergencia), la carga se alimenta desde la red de emergencia mediante una transferencia de tres polos. Parte de la corriente de falla a tierra de retorno pasa por el sensor, no debiendo pasar ninguna corriente de falla de retorno por el sensor.

Solución: Para los tres casos presentados se evita la posibilidad de un disparo no deseado si se coloca un dispositivo de transferencia de 4 polos. Esto hace que se corte el neutro y ya no se produzcan rutas no previstas.

Es necesario indicar, que un determinado arreglo de puesta a tierra del neutro, cuando se tiene un dispositivo de transferencia de 3 polos, la protección contra fallas a tierra puede funcionar

adecuadamente cuando se alimenta con red normal, pero cuando la carga se alimenta de la fuente de emergencia se puede producir una mala operación. Por eso, es necesario analizar todos los casos y lo más confiable es colocar transferencias de 4 polos en los sistemas TN-S y cuando se instala una protección de falla en el circuito.

En los sistemas TT e IT también deben utilizarse transferencias de 4 polos para evitar retornos de corriente y lazos de tierra. Solo en los sistemas TN-C el neutro no debe conmutarse.

VI INTERRUPTORES DE 4 POLOS

Los interruptores tetrapolares existen porque en algunos casos como hemos visto, sí es necesario o conveniente interrumpir el neutro, sin embargo, hay diferentes los fabricantes de interruptores ofrecen varias alternativas para uso según la aplicación:

- a) *Interruptor 3P+N* (Neutro sin protección, solo apertura/cierre)

El neutro solo se abre y cierra, pero no tiene protección contra sobrecorrientes. Se usa en sistemas donde el neutro no suele transportar corriente significativa y se necesita garantizar su interrupción junto con las fases (ejemplo: ciertos sistemas con cargas equilibradas o con requerimientos específicos de desconexión). No protege contra sobrecargas en el neutro, pero permite garantizar una desconexión total del circuito.

- b) *Interruptor 4P con protección del neutro al 50%*

En algunos sistemas, el neutro puede transportar corriente significativa por desbalance. Sin embargo, normalmente la corriente en el neutro es menor que en las fases. Se protege el neutro con un disparo al 50% de la corriente nominal de fase, lo que permite detectar sobrecargas moderadas sin sobredimensionar el interruptor. Usos comunes: Instalaciones con cargas desbalanceadas, pero sin fuertes componentes armónicos.

- c) *Interruptor 4P con protección del neutro al 100%*

En sistemas donde el neutro puede llevar corrientes elevadas, como en redes con cargas no lineales (armónicos) o con fuertes desbalances, se protege el neutro igual que las fases. Usos comunes: Sistemas con muchas cargas electrónicas (UPS, variadores de velocidad, iluminación LED, etc.), donde la corriente en el neutro puede incluso ser mayor que en las fases debido a la distorsión armónica.

VII NORMAS IEC SOBRE EL CONDUCTOR NEUTRO

La norma IEC 60364 es una serie de recomendación de la IEC sobre instalaciones eléctricas. Acá se presenta un extracto de lo que recomiendan para el caso de la interrupción y protección del neutro

Protección del conductor neutro ^[9]

Sistemas TT o TN cuando la sección transversal del conductor neutro sea al menos equivalente a la de los conductores de fase y se espera que la corriente en el neutro no supere el valor en los conductores de fase no es necesario prever una detección de sobrecorriente para ese conductor ni un dispositivo de

desconexión para ese conductor. Si la sección transversal del neutro es menor que los de fase es necesario proporcionar una detección de sobrecorriente del neutro, esta detección debe causar la desconexión de los conductores de fase, pero no necesariamente del neutro.

Sistemas IT cuando el conductor neutro esté distribuido, es necesario proporcionar una detección de sobrecorriente para el conductor neutro de cada circuito. La desconexión incluye el neutro.

Corrientes armónicas. Se deberá proporcionar detección de sobrecarga para el conductor neutro en un circuito multifásico donde el contenido armónico de las corrientes de fase sea tal que se espera que la corriente en el conductor neutro exceda la capacidad de transporte de corriente de ese conductor. La detección de sobrecarga será compatible con la naturaleza de la corriente a través del neutro y provocará la desconexión de los conductores de línea, pero no necesariamente del conductor neutro.

Cuando se requiera la desconexión del conductor neutro, la desconexión y reconexión serán tales que el conductor neutro no se desconecte antes que los conductores de línea y se vuelva a conectar al mismo tiempo que los conductores de línea o antes que ellos.

Fuentes alternativas. En sistemas TN, la transferencia de una alimentación a una alternativa se realizará mediante un dispositivo de conmutación que conmuta los conductores de fase y el neutro, si lo hay.^[10]

CONCLUSIONES

La elección entre interruptores tripolares o tetrapolares depende del sistema de puesta a tierra, las tensiones y sobrecargas en el neutro, y las características de las cargas conectadas. Los interruptores tetrapolares son necesarios en ciertos casos para garantizar la seguridad y el correcto funcionamiento de las instalaciones.

En sistemas TN, el riesgo de tocar el neutro es bajo, ya que las protecciones eliminan rápidamente las fallas. En sistemas TT, el neutro puede adquirir tensiones peligrosas, especialmente en fallas a tierra, lo que requiere tiempos de despeje más cortos. En sistemas IT, el neutro puede alcanzar tensiones peligrosas y las protecciones no actúan en la primera falla a tierra, lo que representa un riesgo alto.

Las corrientes en el neutro pueden ser causadas por desbalances de carga o por armónicos generados por cargas no lineales. Los armónicos de tercer orden y sus múltiplos impares afectan significativamente al neutro, pudiendo generar sobrecargas. En sistemas con cargas no lineales, el neutro puede transportar corrientes mayores que las fases, lo que requiere protección adecuada.

En sistemas con fuentes alternativas, el uso de dispositivos de transferencia de 4 polos es esencial para evitar rutas no previstas de corrientes parásitas o de falla a tierra, que podrían provocar disparos indeseados de las protecciones.

La norma IEC 60364 establece que la protección del neutro depende de su sección transversal y de las corrientes esperadas. Si el neutro tiene menor sección que las fases o se espera que transporte corrientes significativas, debe protegerse contra sobrecargas. En sistemas con contenido armónico elevado, es

necesario prever protección para el neutro. La desconexión del neutro debe realizarse de manera que no se desconecte antes que las fases y se reconecte simultáneamente o antes que ellas.

Se fabrican los siguientes tipos de interruptores de 4 polos: Interruptores 3P+N, neutro sin protección, solo apertura/cierre. Interruptores 4P con protección al 50%, para sistemas con desbalances moderados. Interruptores 4P con protección al 100%, para sistemas con cargas no lineales o fuertes desbalances.

REFERENCIAS

- [1] Catenschiold, Rene. Ground-Fault Protection of Electrical Systems with Emergency or Standby Power. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. IA-13, No 6, Nov/Dec 1977
- [2] Chang, Gary W. K. Harmonic Theory. Siemens Power Transmission & Distribution. *IEEE Power Engineering Society. Tutorial on Harmonics Modeling and Simulation-1998*
- [3] Desmet Jan J. M. Analysis of the Neutral Conductor Current in Three-Phase Supplied Network with Nonlinear Single-Phase Loads. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol 39, N° 3 May/Jun 2003.
- [4] Hiranandam, Ajit. Calculation of Cable Ampacities Including the Effects of Harmonics. *IEEE Industry Applications Magazine*, March/April 1998.
- [5] Mitolo, Massimo A. G. *Electrical Safety of Low-Voltage Systems*. McGraw-Hill Companies. Inc. 2009.
- [6] Morgan, Vincent T. The Current Distribution, Resistance and Internal Inductance of Linear Power System Conductors – A Review of Explicit Equations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol 28, N° 3 July 2013.
- [7] Morris, Noel M. *Electrical Circuits and Systems*. The MacMillan Press Ltd, London and Basingstoke
- [8] West, Robert. Grounding for Emergency and Standby Power Systems. *IEEE transactions on Industry Applications*, March/April 1979
- [9] IEC 60364-4-43 Low-voltage electrical installations – Part 4-43: Protection for safety – Protection against overcurrent.
- [10] IEC 60364-4-44 Low-voltage electrical installations – Part 4-44: Protection for safety – Protection against voltage disturbances and electromagnetic disturbances.