

Análisis de Retorno de Corrientes de Falla a Tierra y Tensiones de Toque en sistemas IT con nuevo “factor capacitivo”

Piero Stephano Prado Zuta , Jamir Alberto Ravines Ayambo, Franklin José Picón Arana,
Fabrizio Armando Millan Montalvo
Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, Lima Perú.

Recibido: 15/04/2021 Revisado: 21/05/2021 Aceptado: 26/06/2021 Publicado: 28/07/2021

1. RESUMEN

En este artículo se desarrollarán dos puntos, la explicación de las corrientes de defecto a tierra en sistemas de distribución con sistemas de conexión a tierra IT con neutro aislado, muy usual en Lima Metropolitana, partiendo de que la corriente de falla no podría viajar por conexiones cableadas entre tomas de tierra o un neutro distribuido, ya que son inexistentes en este sistema de conexión a tierra. El segundo punto es la definición de un nuevo factor exclusivo para este sistema de conexión a tierra, denominado *factor capacitivo* (k_c) que surge del análisis de la falla a tierra por circuitos secuenciales simétricos que incluyen capacitancias parásitas, para el caso de *bushings* secundarios de transformadores de subestaciones de distribución de los cuales salen tres fases enterradas, dicho factor tiene como finalidad la evaluación de las tensiones de toque en sus masas de utilización para confirmar si se cumplen con requisitos estipulados por la IEC 60364, mediante un enfoque simplificado que considerará variables típicas como la tensión entre fases y el valor de la resistencia de puesta a tierra de las masas de utilización.

Palabras clave: Sistemas de conexión a tierra IT, Tensión de Toque, Capacitancias Parásitas, IEC 60364.

1. ABSTRACT

In this article two points will be developed, the explanation of the ground fault currents in distribution systems with IT grounding systems with isolated neutral, based on the fact that the fault current could not travel through connections wired between ground connections or a distributed neutral, since they are non-existent in this system. The second point is the definition of a new exclusive factor for this grounding system, called capacitive factor (k_c) that arises from

the analysis of the ground fault by symmetrical sequential circuits that include parasitic capacitances, in the case of secondary bushings of distribution substation transformers from which three buried phases emerge, and whose purpose is to evaluate the touch voltages in their masses of use to confirm if they meet the requirements stipulated by IEC 60364, through a simplified approach that will consider variables typical such as the voltage between phases and the value of the earthing resistance of the masses of use.

Keywords: IT Grounding Systems, Touch Voltage, Parasitic Capacitances, IEC 60364.

2. INTRODUCCIÓN

En instalaciones eléctricas se debe priorizar la seguridad contra riesgos latentes y patentes teniendo como prioridad la vida humana y en segundo lugar la protección del equipo eléctrico. Según Schneider Electric (2010) y el vocabulario electrotécnico internacional IEC 60050 que se citó en ABB (s.f.) el contacto indirecto se produce cuando el contacto se da con piezas que comúnmente no están activas y que se energizan por un defecto en la red o un conductor con fallas de aislamiento. Este último tipo de contacto produce una corriente que llega a la toma de tierra mediante el conductor de protección a tierra (PE).

En personas los principales riesgos se pueden medir en dos parámetros según ABB (2007) que son la tensión de paso y tensión de toque. En el presente artículo desarrollaremos un factor k_c llamado *factor capacitivo* que nos permitirá calcular la tensión de toque y de esta manera prevenir sus efectos en la red. Además, se analizará el retorno de las corrientes en un defecto a tierra al transformador con un esquema de protección a tierra IT, muy usual en Lima, ya que esta produce la tensión de toque mencionada que puede desencadenar contactos indirectos peligrosos si exceden los valores permisibles.

3. ANÁLISIS Y METODOLOGÍA

Se partirá de demostraciones electromagnéticas de la equipotencialidad del suelo y la explicación de las capacitancias parásitas con el uso de circuitos secuenciales explicados por Guldbrand (2009), para así apoyados de valores típicos de capacidades parásitas extraídas de Jullien et. al. (2001) calcular valores de tensión de toque referenciales a través del factor capacitivo “ k_c ” expuesto y demostrado en este artículo, por último, se calcularán los valores de tensión de toque en sistemas de distribución en baja tensión de Lima, sin embargo, el k_c puede extrapolarse a otros voltajes.

3.1. La equipotencialidad del suelo

Al ocurrir un defecto a tierra; las corrientes, independientemente de su ECT (Esquema de Conexión a Tierra), vuelven al transformador a través del suelo desde su toma de tierra ya implementada (TT), su masa (TN) o mediante capacidades parásitas (IT). Pero el porqué de este fenómeno no está aclarado en guías técnicas, por lo que se recurre al análisis electromagnético para encontrar el motivo de este puente equipotencial en el suelo. En primera instancia se puede descartar que se produzca por un fenómeno de conducción eléctrica en el suelo, puesto que la resistividad del suelo es muy alta en comparación a los conductores de línea. Además, el anterior supuesto contradeciría a Jullien et. al. (2001), ya que no consideran la resistencia del suelo en sus cálculos.

La respuesta a esta cuestión se encuentra con la equipotencialidad de la tierra. Es decir, sin caídas de tensión. Esto sería posible si el potencial eléctrico a donde están conectados los terminales de los sistemas de puesta a tierra mencionados sería idéntico. La demostración se hará enseguida.

Se partirá por el cálculo del potencial en la superficie de una esfera cualquiera con distribución de carga uniforme de acuerdo a los ejemplos 22.9 y 23.8 realizados por Young et.al (2019).

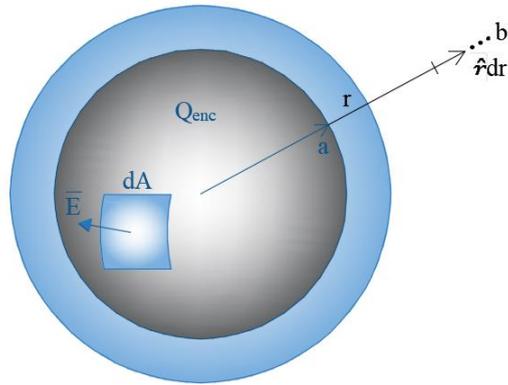
En la Figura 1 se toma una superficie imaginaria que rodea a una esfera para hallar la carga en su superficie mediante la ley de Gauss en su manera integral. Se considera que la carga está en la corteza y que el campo eléctrico es colineal al vector normal a la diferencial de área (dA). Los cálculos son los siguientes:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{enc}}{\epsilon_0}; E(4\pi r^2) = \frac{Q_{enc}}{\epsilon_0}; E = \frac{Q_{enc}}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

$$V_a - V_b = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l}; V - 0 = \int_r^\infty \frac{Q_{enc}}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{r} \cdot \hat{r} dr$$

$$\boxed{V = \frac{Q_{enc}}{4\pi\epsilon_0 r}} \quad (1)$$

Figura 1. Esquema para determinar el potencial de una esfera.



Fuente: Elaboración Propia

Al tener la expresión del voltaje en función del radio de la esfera (1), esta se puede aplicar a un cuerpo esférico como nuestro planeta, esto lo hace Talledo (2013) al indicar que cuando se reemplaza “r” por el radio de la tierra, el valor de r se considera muy grande y por lo tanto el voltaje en todos los puntos de la corteza es cero. Además, se aclara que cualquier objeto conectado a Potencial 0 tenderá a tener este potencial. Sin embargo, no la misma carga. Un ejemplo son las puestas a tierra en un sistema TT.

3.2. Defecto a tierra en sistemas IT

Según Schneider (2010) para definir el principio de funcionamiento del esquema IT se toma como características principales a que el neutro del transformador no está conectado directamente a tierra, pero con la peculiaridad de que, si bien no está conectado física y directamente a tierra, lo hace mediante sus capacidades parásitas y/o intencionalmente por una impedancia elevada, cercana a 1500Ω . Además, la NTP 370.303 (2003) señala que las masas del sistema deben estar referidas a tierra mediante grupos o individualmente y que no se debe conectar una fase viva a tierra, a menos que sea por una impedancia lo suficientemente elevada y no exista un neutro. Un detalle importante que proporciona ABB (2007) es: Los electrodos de puesta a tierra del transformador y las masas van conectados independientemente. Una manera resumida para definir el sistema lo da su propio nombre, que ABB (s.f.) explyaya; I= Todas las partes en tensión son aisladas de tierra o con un punto a través de la resistencia (generalmente el neutro), T= Conexiones de los partes conductores expuestas a tierra. Y la NTP 370.303 (2003) agrega que en la letra T las conexiones de puesta a tierra deben ser independientes.

Con lo descrito anteriormente, se profundizará el estudio del defecto a tierra en estos sistemas. Se define según ABB (s.f.) como un fenómeno accidental donde la corriente encuentra una ruta conductora a tierra. Lo anterior causa un peligro ya que electrifica partes metálicas aisladas que usualmente no lo están, provocando un contacto indirecto. El defecto a tierra está ligado íntimamente a la pérdida de aislamiento, siendo sus principales causas descritas según ABB (s.f.): Erosión del pozo a tierra, rotura mecánica en los conductores, medios adversos en los conductores, electrificación de las masas, etc.

En los sistemas IT el defecto a tierra se modela con una de las fases vivas que sale del transformador de distribución que experimenta un defecto de aislamiento en la masa de utilización o industrial, así refiriendo dicha fase de falla a tierra y produciendo una corriente que volverá a tierra por el neutro impedante referido a tierra también, pero aunque la impedancia sea infinita (neutro aislado) y la corriente no podría ingresar por esta toma de tierra del transformador, aun así la instalación estaría conectada a tierra debido al fenómeno de las capacidades parásitas y la equipotencialidad, explicada anteriormente. A continuación, se ampliará en el retorno de las corrientes de falla al transformador.

3.3. Circuito equivalente para retorno de corrientes de falla.

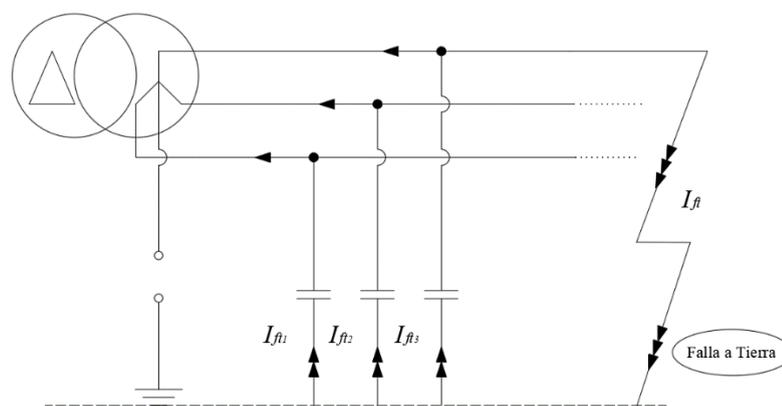
Para abordar el caso de un sistema de puesta a tierra IT con características de neutro aislado y líneas de distribución que están enterradas. Se emplea el análisis de secuencialidad cero abordado por Guldbrand (2009). En los IT aislados, uno de los componentes más importantes son las capacitancias parásitas, aunque resultan relativamente bajas si nos ponemos a pensar que redes de potencia que miden kilómetros apenas están en el orden de $10 \mu\text{F}$. Para Jullien et. al. (2001) estos valores fluctúan por el tipo de red, ya que para una red poco capacitiva como en hospitales ya que una de sus fases tiene la capacidad de $0,3\mu\text{F}$, una red de potencia unos $1,6 \mu\text{F}$ y una red extensa de potencia unos $10 \mu\text{F}$ por fase, algo significativamente puesto que esa red extensa es de 40 km de largo.

Un dato importante que añade Guldbrand (2009) es que estas capacitancias se acentúan si es que las líneas están bajo tierra, puesto que una red subterránea es de 50 a 100 veces más “capacitiva” que, si se hubiese instalado de manera aérea, además este parámetro es proporcional al largo de los cables, coincidiendo con Jullien et. al. (2001) y las variaciones de este valor por la extensión de la red.

En la Figura 3 se observa un esquema de retorno de la corriente de falla al sistema de distribución en un sistema IT aislado según Fickert et. al (2015). Una de las fases sufre un defecto a tierra al

conectarse a su masa y por lo tanto a tierra, lo que hace que encuentre el retorno en las capacitancias entre las fases y la tierra, las corrientes en las otras fases decrecen, rompiendo la simetría en la red según Gulbrand (2009). Después vuelven al circuito por las fases, a pesar que la corriente es mínima en estas, cerrando el circuito y adicionando a la corriente de falla. El retorno por el suelo también es afirmado en ABB (2007) al decir que las corrientes vuelven por el suelo. Además, los esquemas de Schneider (2010) muestran una corriente de defecto a tierra pasar por debajo del suelo.

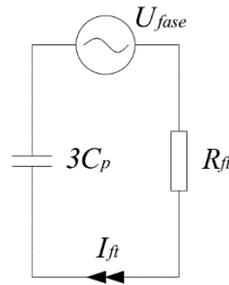
Figura 2. Esquema de retorno de corrientes de falla a tierra con neutro aislado



Fuente(s): Adaptado de Fickert (2015)

Para calcular las corrientes de falla se emplea un equivalente secuencial simétrico, que consiste en transformaciones fasoriales para compensar las asimetrías en la red en el defecto a tierra. También en transformaciones para dar un equivalente tanto impedante (la resistencia e inductancia de la red) y capacitivo que se explica con mayor detalle en Gulbrand (2009). Al momento de mostrar el circuito equivalente se desprecia la componente resistiva de los cables, ya que la resistencia de defecto a tierra se vuelve muy grande con respecto a ella, de acuerdo a Jullien et. al. (2001) esta resistencia de defecto a tierra fluctúa de 0 a 10kΩ. El circuito equivalente se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Circuito equivalente para el cálculo de la corriente de defecto a tierra (I_{ft})



Fuente(s): Adaptado de Guldbrand (2009)

Jullien et. al. (2001) menciona que según la IEC 603364 los sistemas IT deben cumplir con un requisito mínimo de protección que es un valor máximo de tensión de toque de 50 V, que se obtiene multiplicando la intensidad de defecto por la resistencia de la toma de tierra de la masa y en caso de que no lo posea se utilizará la resistencia de la toma de tierra del alimentador.

De la Figura 3 se puede establecer una ecuación para hallar la corriente de defecto a tierra, y de lo mencionado en el anterior párrafo se puede establecer una ecuación para la tensión de toque, quedando las siguientes expresiones.

$$I_{ft} = U_{fase} \left(\frac{3jC_p\omega}{1+3jC_p\omega R_{ft}} \right) \quad (2)$$

$$U_T = I_{ft} R_{PT} \quad (3)$$

El valor de las capacitancias parásitas se tomará para tres tipos de redes definidas en Jullien et. al. (2001). Siendo la primera la red poco capacitiva, las redes de potencia y las redes extensas de potencia de (Esta última de alrededor de 40 km). Ya que los requisitos de seguridad están enfocados a las tensiones de toque, se reescribirá la expresión (3) con el factor “ k_c ”, de modo que ahora la tensión de toque dependa de dos factores conocidos en la instalación que serán la tensión entre fases y la resistencia de la puesta a tierra de la masa analizada.

$$U_T = k_f U_L R_{PT} \quad (4)$$

Para demostrar k_c , se tendrán ciertas consideraciones, como considerar un sistema IT aislado y un secundario en estrella de modo que $U_L = \sqrt{3} U_{fase}$ utilizado en Lima, y se separarán en las tres categorías mencionadas anteriormente.

$$I_{ft}R_{PT} = k_f U_{fase} R_{PT}$$

$$k_c = \frac{I_{ft}}{U_L} = \frac{U_0}{U_L} \left(\frac{3j}{1+3jC_p\omega R_{ft}} \right) = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{3jC_p\omega}{1+3jC_p\omega R_{ft}} \quad (5)$$

En (5) se demuestra la forma compleja de k_c , pero ya que los cálculos se simplifican para la ecuación (4), se tomará el módulo del factor capacitivo.

$$k_c = \sqrt{3} C_p \omega \frac{\sqrt{1+C_p^2 \omega^2 R_{ft}^2}}{1+9C_p^2 \omega^2 R_{ft}^2} \quad (6)$$

4. RESULTADOS

El factor capacitivo, se hallará para valores típicos de capacitancias mencionadas en Jullien et. al. (2001) y considerando un defecto franco para la falla a tierra, ya que es el peor de los casos y suple la información de la resistencia de falla a tierra. Los valores calculados para (6) se escribirán en la Tabla 1 y los valores de tensión de toque calculados con (4) teniendo en consideración una resistencia de puesta a tierra de 10Ω , se muestran en la Tabla 2.

Tabla 1. Factor capacitivo para Redes Típicas

Tipo de Red	$k_c \times 10^4$
Red poco capacitiva ¹	2,18
Red de potencia	10,88
Red extensa de potencia	65,30

¹ por ejemplo, circuitos de hospitales

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 2. Tabla de Tensión de Toque para Redes Típicas

Tipo de Red	Tensión de Toque (V)	
	Para 220 V	Para 380 V
Red poco capacitiva	0,479	0,827
Red de potencia	2,394	4,135
Red extensa de potencia	14,365	24,813

Fuente: Elaboración Propia

5. CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES

Los factores capacitivos vistos en la Tabla 1 hacen de los cálculos para la tensión de toque más breves y directos, además que son apoyados con valores de capacitancias parásitas brindadas por manuales técnicos ya citados, mientras que los valores referenciales de la Tabla 2 muestran tensiones de toque en masas de utilización de baja tensión que dejan ver que son valores permitidos para la IEC 60364 al encontrarse por debajo de los 50 V, e incluso se podría decir que la gran mayoría de redes bajo este criterio son seguras, ya que las capacitancias parásitas dependen de la longitud de los conductores por los que van tendidos y el peor de los casos es una red de 40 km (Red Extensa de Potencia de 380 V), los valores de Tensión de Toque no llegan ni a la mitad de la tensión permisible. Sin embargo, el trabajo de Spalding et. al. (2009) establece que las redes poco capacitivas en hospitales, más específicamente circuitos de transformadores aislados en camas UCI, a pesar del bajo valor de las capacitancias parásitas en sus fases, pueden existir riesgos de fibrilación ventricular por corrientes de defecto a tierra ocasionadas por capacitancias parásitas entre los cables de las fases y los PE.

REFERENCIAS

- ABB (s.f.). Cuaderno de aplicaciones técnicas nº3: Sistemas de distribución y protección contra contactos indirectos y defectos a tierra. Autor. Recuperado de:
https://library.e.abb.com/public/c19962ebb95b8d9cc125791a00395bc8/1TXA007102G0701_CT3_.pdf
- ABB SACE. (2007). *Protección a las personas*. Manual técnico de instalaciones eléctricas Aparatos de protección y maniobra La instalación eléctrica Tomo 2. Recuperado de:
<https://library.e.abb.com/public/79e9d70830db5707c125791f0038dfff/Manual%20tecnico%20de%20instalaciones%20electricas.pdf>
- Fickert, L., Hufnagl, E., Schmutzner, E. (2015). EFFICIENT CALCULATION OF EARTH FAULT CURRENTS IN COMPENSATED NETWORKS. 24th Expert Meeting "KOMUNALNA ENERGETIKA / POWER ENGINEERING". Congreso llevado a cabo en Mariborno, Eslovenia. Recuperado de: <http://ke.powerlab.um.si/Arhiv/dokument.aspx?id=178>
- Guldbrand, A. (2009). Earth Faults in Extensive Cable Networks Electric Distribution Systems. (tesis de licenciatura). Universidad de Lund. Lund. Recuperado de:
<https://www.iea.lth.se/publications/Theses/LTH-IEA-1057.pdf>
- Jullien, F., Heritier I. (2001). El esquema IT (neutro aislado) de los esquemas de conexión a tierra en BT. Schneider Electric España. Recuperado de:
<https://www.alfacent.com/uploads/CT%20178%20CONEXION%20IT%20NEUTRO%20A ISLADO.pdf>
- Schneider Electric (2010). Guía de diseño de instalaciones eléctricas 2010 según normas internacionales IEC. Autor. Recuperado de:
https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Application+solutions&p_File_Name=020511_E10-guia-diseno-instalac-electricas.pdf&p_Doc_Ref=020511E10
- Spalding, L. E. S., Carpes, W. P., Batistela, N. J., & Groth, C. R. (2009). Parasitic

capacitances in the installation of IT grounding systems for operation rooms, ICUs and hemodynamics centers. IFMBE Proceedings, 25(7), 93–96. https://doi.org/10.1007/978-3-642-03885-3_26

- Talledo, A (2013). *Electrostática en el vacío*. Teoría Electromagnética. Editor: Victor Lopez Guzman. ISBN 978-612-4072-51-2
- Young, H., Freedman, R. (2019). *Electric Potential*. University Physics. Pearson Education. ISBN 978-0-13-15955-2