

SISTEMAS DE CONEXIÓN A TIERRA EN 60 Hz

J.Hildemaro Briceño
Departamento de Potencia-Facultad de Ingeniería
Universidad de los Andes
Mérida - Venezuela

1. INTRODUCCIÓN

El tema relacionado con la existencia de un Sistema de Conexión a Tierra(SCT) conformado por una red de conductores que interconectan las partes metálicas de todos los equipos y estructuras de una instalación determinada, a un arreglo de conductores enterrados que garantizan una conexión eléctrica al terreno, ha estado continuamente bajo estudio y continua siendo objeto de investigación. Sin embargo se puede afirmar en términos generales, que el conocimiento de las funciones y diseño de un SCT no son manejados con la propiedad del caso por gran parte de los ingenieros involucrados en el manejo de la electricidad en sus diferentes aplicaciones: iluminación, conversión electromecánica, telecomunicaciones, control de procesos, equipos electrónicos utilizados en la informática, equipos biomédicos, ect.

Es el objetivo de este trabajo, mas que presentar procedimientos para diseñar un SCT, es motivar la discusión y reflexión acerca de las necesidades que justifican la existencia de un SCT y establecer así sus funciones. Con este conocimiento claramente definido, es posible entonces seguir un procedimiento lógico de diseño con las consideraciones pertinentes a cada caso en particular.

2. NECESIDAD DE UN SISTEMA DE CONEXIÓN A TIERRA EN 60 Hz

La necesidad de un SCT depende del punto de vista de las partes involucradas: Sistema de Distribución de Energía Eléctrica , seguridad de personal y equipos conectados.

2.1 Sistema de Distribución de Energía Eléctrica

Históricamente en la práctica de la distribución de energía eléctrica se ha popularizado el sistema trifásico con el punto neutro *sólidamente* o *efectivamente* conectado a tierra[19]. Esto significa que en las instalaciones donde físicamente existe un punto neutro disponible, conexiones en estrella por ejemplo; el neutro se conecta directamente a un arreglo de electrodos enterrados que determinan el punto de conexión a tierra del sistema eléctrico. La operación de un sistema de energía eléctrica sin fallas o perturbaciones que afecten ciertas características deseables como: balance en los voltajes y corrientes, valores de voltaje por encima de un mínimo determinado, corrientes dentro de la capacidad térmica y mecánica de los conductores, integridad del aislamiento eléctrico de los equipos, etc. se dice que es una operación normal del

sistema. Para sistemas de energía eléctrica operando normalmente no existe diferencia si el sistema opera con algún punto conectado intencionalmente a tierra, o sin punto alguno de conexión al terreno. Sin embargo todos los sistemas interactúan electromagnéticamente con el terreno, bien sea a través de una conexión intencional o no intencional, por medio de la capacitancia que existe entre los diferentes equipos eléctricos y el terreno, por los enlaces magnéticos que se pueden establecer, o en términos generales por la interacción electromagnética que establecen las ecuaciones de Maxwell. Es oportuno recordar que la tierra en general tiene propiedades conductoras de electricidad, y como conductor interactúa con otros elementos conductores energizados a diferente potencial y que transportan corrientes eléctricas.

Existen diferentes opciones para la operación de los sistemas eléctricos desde el punto de vista de la conexión a tierra. En la práctica se tiene las siguientes opciones que tienen mayor o menor popularidad:

1) *Neutro sólidamente conectado a tierra:*

No existe ninguna impedancia intencionalmente conectada entre el neutro y el punto de conexión a tierra

2) *Conexión a tierra a través de impedancia:*

Existe una impedancia conectada intencionalmente entre el neutro y el punto de conexión a tierra. Esta impedancia puede ser una resistencia o una inductancia, y puede tener alto o bajo valor óhmico.

3) *Sistemas resonantes*

4) *Sistemas sin conexión a tierra intencional:*

El sistema interactúa con el terreno por medio de las capacitancias de los equipos.

No se puede decir que una u otra forma de conexión a tierra es mejor que otra. Cada una de estas alternativas le aporta al sistema eléctrico características propias que se traducen en deseables o indeseables dependiendo de la concepción general de operación del sistema de distribución de energía eléctrica. Un análisis completo de las características de cada una de estas opciones está fuera del alcance de este trabajo, sin embargo existen excelentes análisis hechos en las referencias [1,18,19]. Nos limitaremos a resumir en la tabla 1 las características asociadas a los sistemas eléctricos conectados sólidamente a tierra (grounded) y aquellos sin conexión intencional a tierra (ungrounded). La información de la tabla 1 ha sido tomada de la referencia [18] y su alcance se limita a sistemas de bajo voltaje (<600V), para voltajes mayores ver [1,5,19].

Características del Sistema	Sólidamente conectado a Tierra	Aislado de Tierra
Interrupción del circuito con la primera falla a tierra	Si	No
Control de sobrevoltajes transitorios debidos a fallas intermitentes(arcing fault)	Si	No
Control de sobrevoltajes a 60 Hz	Si	No
Riesgo de quemaduras a personas por el arco formado en la primera falla a tierra	Severo	Casi nulo
Daño en el equipo debido al arco formado en la primera falla a tierra	Puede ser severo, depende del tiempo de interrupción de la falla	Generalmente menor daño, pero pueden aparecer sobrevoltajes transitorios que pueden provocar la extensión de la falla a las otras fases
Riesgo de choque eléctrico por contacto con las fases sin falla, durante la ocurrencia de una falla a tierra	Persona sometida al voltaje fase-neutro	Persona sometida al voltaje fase-fase
Riesgo de choque eléctrico por contacto con la cubierta metálica de un equipo con falla a tierra	Moderado	Pequeño
Detección de falla intermitente (arcing fault)	Fallas entre fases y fase-tierra fáciles de detectar con un arreglo adecuado de relés, relé de sobrecorriente de tierra por ejemplo	Se requieren detectores de fallas a tierra y equipo localizador de fallas. Mientras la falla persiste pueden ocurrir sobrevoltajes que pueden provocar fallas adicionales. Fallas intermitentes entre fases se pueden detectar con relés de sobrecorrientes de fases
Disponibilidad de servicio trifásico con 3 fases y neutro	Si	No. Como alternativa en una conexión en delta puede utilizarse la conexión a tierra del punto medio de una de las fases

Tabla 1 Características resaltantes de los sistemas sólidamente conectados a tierra y aislados de tierra

En los sistemas de bajo voltaje se debe tener en cuenta que en algunas ocasiones el “neutro” conectado a tierra no siempre corresponde con el neutro de un sistema trifásico. En la figura 1 se ilustran tres formas diferentes de tener un “neutro”. En la figura 1(a) se tiene la clásica bancada de transformación $\Delta - Y$, en este caso el punto n coincide con el neutro geométrico n_o asociado a los fasores de voltaje de un sistema trifásico balanceado. En la figura 1(b) el punto n difiere del punto n_o ; el lado indicado en trazo punteado es para indicar que puede ser una bancada trifásica completa $\Delta - \Delta$, o una bancada conectada en delta abierta o conexión en V. En la figura 1(c) el punto n_o simplemente no existe. En los casos de las figuras 1(b) y 1(c) el punto n que se indica y que se conecta a tierra no pasa de ser una referencia arbitraria de voltaje que permite tener diferentes niveles de voltaje con prácticamente la misma inversión en los equipos de transformación.

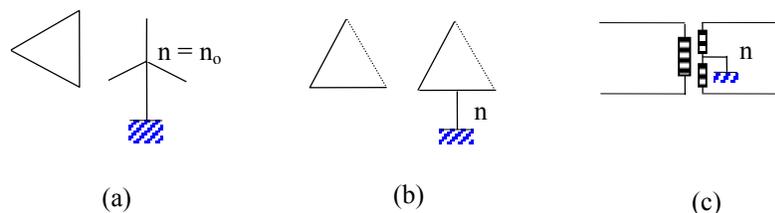


Figura 1 Tres formas diferentes de punto “neutro”

- a) Sistema trifásico $\Delta - Y$
- b) Sistema trifásico en Δ abierta
- c) Sistema monofásico tres hilos

2.2 Situaciones de riesgo

Una vez que se define el sistema eléctrico a utilizar es cuando se analiza la necesidad de conectar las partes metálicas no energizadas de una instalación a una red de tierra y al terreno, para controlar las posibles situaciones de riesgo para la vida humana que se puedan presentar.

2.2.1 Sistemas Aislados de Tierra

En este caso la ocurrencia de una falla de una fase a tierra generalmente no involucra situaciones de riesgo para las personas ya que no existen corrientes de falla. Solo existen las corrientes capacitivas asociadas a la interacción entre las partes energizadas del equipo y el terreno, y que retornan a través de la impedancia del aislamiento eléctrico de los equipos. Sea el caso de una falla a tierra, por ejemplo la pérdida de aislamiento entre un elemento energizado y su cubierta metálica, como no existe un valor de corriente elevado esta primera falla representa una condición de riesgo menor por quemaduras o choque eléctrico para una persona que toque la cubierta metálica. Sin embargo el aislamiento de las fases sanas del equipo se ve sometido al voltaje entre fases.

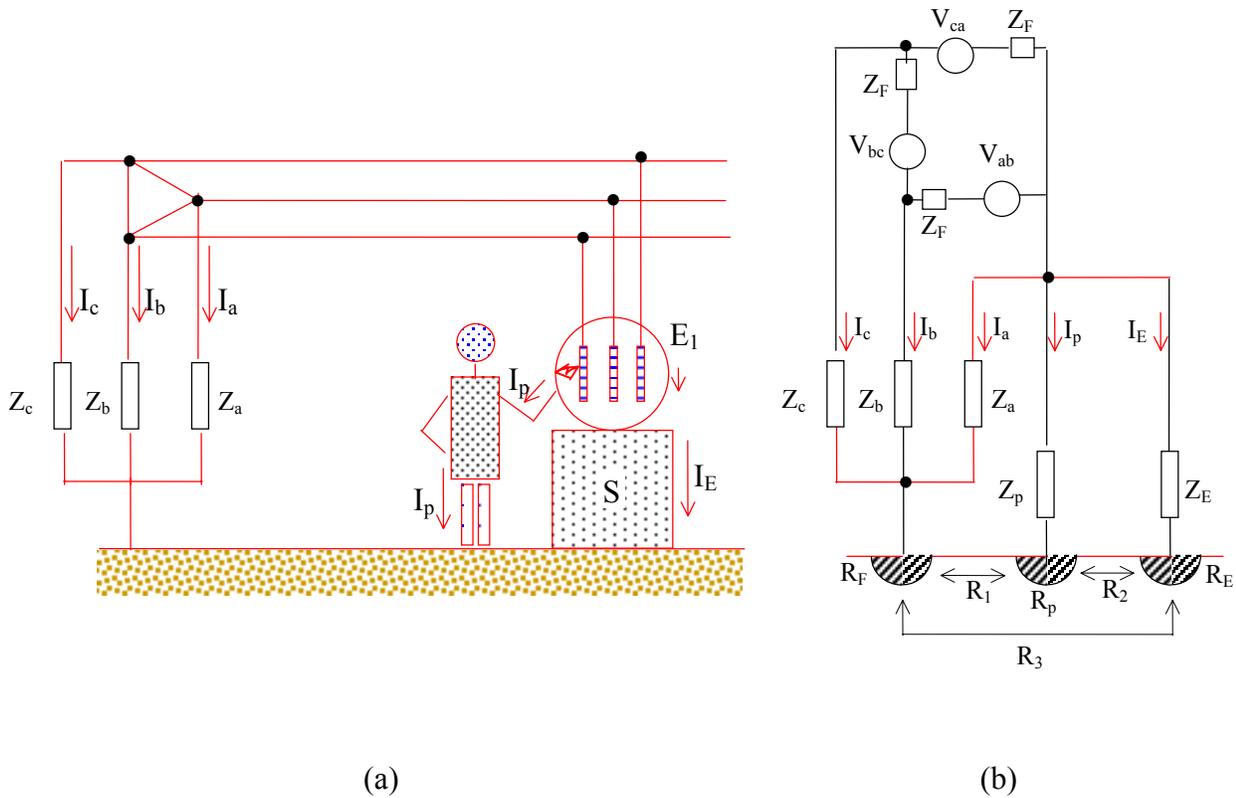


Figura 2 Falla de una fase a tierra

- (a) Camino de circulación de la corriente de falla
- (b) Circuito equivalente simplificado

En la figura 2 se muestra un esquema típico de una falla de una fase a tierra, una persona que toque el equipo fallado esta sujeta a la corriente que pueda circular a través del circuito cerrado por las impedancias de aislamiento Z_a , Z_b , Z_c y las conexiones al terrenos no intencionales R_F , R_p , R_E que existen por la superficie de contacto entre los equipos, la persona y la superficie del terreno. También es posible que se establezca una conexión a tierra de los equipos a tierra por medio de los elementos de fijación de lo equipos a los pedestales o estructuras de soporte. En el circuito simplificado de la figura 2(b) la impedancia Z_p representa la impedancia del cuerpo incluyendo las resistencias de contacto entre las diferentes partes del cuerpo, el equipo y la superficie del terreno. La impedancia Z_E incluye la impedancia del pedestal de soporte S. La impedancia interna de la fuente es Z_F . Se asume que la impedancia de la falla es nula y que la impedancia de los conductores es mucho menor que las demás impedancias involucradas en la determinación de la corriente I_p . Los resultados de la corriente I_p que puede circular la situación presentada en la figura 2(a) se pueden expresar mediante:

$$I_p = \sqrt{3} \cdot K_p \cdot V \tag{1}$$

El valor de V corresponde al voltaje entre fases. Para analizar de una manera mas clara el efecto de las variables que mas inciden sobre el valor de la corriente I_p , se ha incluido el factor K_p que depende de las aproximaciones hechas para simplificar las expresiones obtenidas. A continuación se resumen las diferentes formas de este factor bajo las siguientes suposiciones:

Impedancias de aislamiento iguales: $Z_a \approx Z_b \approx Z_c = Z$

Efecto mutuo entre las conexiones a tierra de la fuente y la persona y el equipo despreciables:

$$R_1 = R_3 = 0$$

Solución General:

$$K_p = \frac{Z_E + R_E - R_2}{\left[Z_F + Z + \frac{(Z_F + 3Z)(R_F + R_2)}{Z} \right] (Z_E + R_E - R_2) + (Z_p + R_p - R_2) \left[Z_F + Z + \frac{(Z_F + 3Z)(Z_E + R_E + R_F)}{Z} \right]} \quad (2)$$

Si $Z \gg Z_F$

$$K_p = \frac{Z_E + R_E - R_2}{[Z + 3(R_F + R_2)](Z_E + R_E - R_2) + (Z_p + R_p - R_2)[Z + 3(Z_E + R_E + R_F)]} \quad (3)$$

Si el terreno se asume como un conductor perfecto, resistividad nula, se obtienen las siguientes expresiones:

$$K_p = \frac{Z_E}{(Z_F + Z).Z_E + Z_p \cdot \left[Z_F + Z + \frac{(Z_F + 3Z).Z_E}{Z} \right]} \quad (4)$$

Si $Z \gg Z_F$:

$$K_p = \frac{Z_E}{(Z_F + Z).Z_E + 3Z_p.Z_E} \quad (5)$$

Como se puede observar en las expresiones anteriores, la corriente que puede circular por el cuerpo de una persona es directamente proporcional al valor de la impedancia Z_E , de la resistencia a tierra R_E y del efecto mutuo R_2 debido a la interacción de las conexiones a tierra entre la persona y el pedestal del equipo. Si el terreno se asume como un conductor perfecto solamente queda la impedancia Z_E . Por esto es conveniente analizar que ocurre con las variaciones extremas de Z_E : $Z_E = 0$ y $Z_E \rightarrow \infty$.

Para $Z_E = 0$:

$$K_p = \frac{R_E - R_2}{\left[Z_F + Z + \frac{(Z_F + 3Z)(R_F + R_2)}{Z} \right] (R_E - R_2) + (Z_p + R_p - R_2) \left[Z_F + Z + \frac{(Z_F + 3Z)(R_E + R_F)}{Z} \right]} \quad (6)$$

Si $Z \gg Z_F$:

$$K_p = \frac{R_E - R_2}{\left[Z + 3(R_F + R_2) \right] (R_E - R_2) + (Z_p + R_p - R_2) \left[Z + 3(R_E + R_F) \right]} \quad (7)$$

Para $Z_E \rightarrow \infty$:

$$K_p = \frac{I}{Z_F + Z + \frac{(Z_p + R_p - R_2)(Z_F + 3Z)}{Z}} \quad (8)$$

Para terreno perfectamente conductor y $Z \gg Z_F$ la expresión (8) se simplifica notablemente:

$$K_p = \frac{I}{Z + 3Z_p} \quad (9)$$

Obviamente de esta última expresión se puede concluir que la condición mas desfavorable ocurre cuando $Z_E \rightarrow \infty$ y bajo el supuesto de un terreno de resistividad nula.

Con la ayuda de la expresión simplificada (9) es fácil comprender la importancia de detectar la primera falla a tierra en un sistema aislado de tierra. En el sencillo ejemplo ilustrado en la figura 2, para una disminución en la impedancia Z del aislamiento de la fuente la corriente I_p se incrementa. En el caso extremo cuando $Z \rightarrow 0$ el único elemento limitador de la corriente sería

la propia impedancia del cuerpo Z_p . Es oportuno aclarar que (9) fue deducida asumiendo que las impedancias de aislamiento es igual en las tres fases; si ocurre una segunda falla a tierra en otra de las fases sanas ya la condición de igualdad asumida se pierde y esta expresión deja de tener validez. Sin embargo mediante (9) es posible encontrar un criterio para evaluar el aislamiento de un equipo desde el punto de vista de seguridad de las personas.

Si se establece un valor límite de I_p como un valor máximo que no representa una condición de riesgo mortal para la vida humana; se puede estimar un valor de impedancia mínima para la suma $Z+3Z_p$, es decir:

$$Z + 3Z_p \geq \frac{\sqrt{3}.V}{I_p} \quad (10)$$

Este valor no es la resistencia de aislamiento únicamente, aquí se incluye el elemento capacitivo que generalmente se asocia al aislamiento de un equipo. Por ejemplo de acuerdo a la norma IEC-479, comentada en [4], para 5,4 s de tiempo de exposición de una persona a un choque eléctrico la corriente máxima que no produce fibrilación ventricular es de 22 mA, cuando esta corriente circula entre la mano izquierda y el pecho. Para esta condición de riesgo se requiere una impedancia mínima $Z+3Z_p$ de 78,73 Ω/V

Un sistema aislado de tierra puede continuar operando con una falla a tierra, lo que representa una ventaja desde el punto de vista de la continuidad de servicio. Como se indicó preliminarmente, el problema se puede presentar si ocurre una segunda falla a tierra en otra fase diferente antes de haber ubicado y reparado la primera falla. En este caso si pueden aparecer situaciones de riesgo para las personas, ya que se tiene una falla entre fases que utiliza el terreno como conductor de retorno de la corriente de falla. El punto clave para evitar situaciones de riesgo es detectar y ubicar la primera falla a tierra antes de que aparezca otra nueva falla en otra fase diferente. Por lo tanto un sistema de distribución de energía eléctrica que opere aislado de tierra debe estar diseñado para detectar y ubicar fallas de aislamiento de una manera rápida, para cumplir con este propósito se debe contar con equipos de protección especializado en este aspecto.

En la figura 3 se ilustra el caso de una doble falla a tierra en un sistema aislado de tierra, la corriente de falla utiliza el terreno como camino de retorno. En este caso la impedancia de los conductores son las que gobiernan la distribución de las corrientes. Las impedancias de los aislamientos juegan un papel secundario y puede asumirse que su valor es infinito. Bajo el

supuesto que $R_1 = R_3 = 0$, la corriente I_p se determina mediante una expresión similar a (1) donde V representa ahora el voltaje fase neutro y el factor K_p esta dado por :

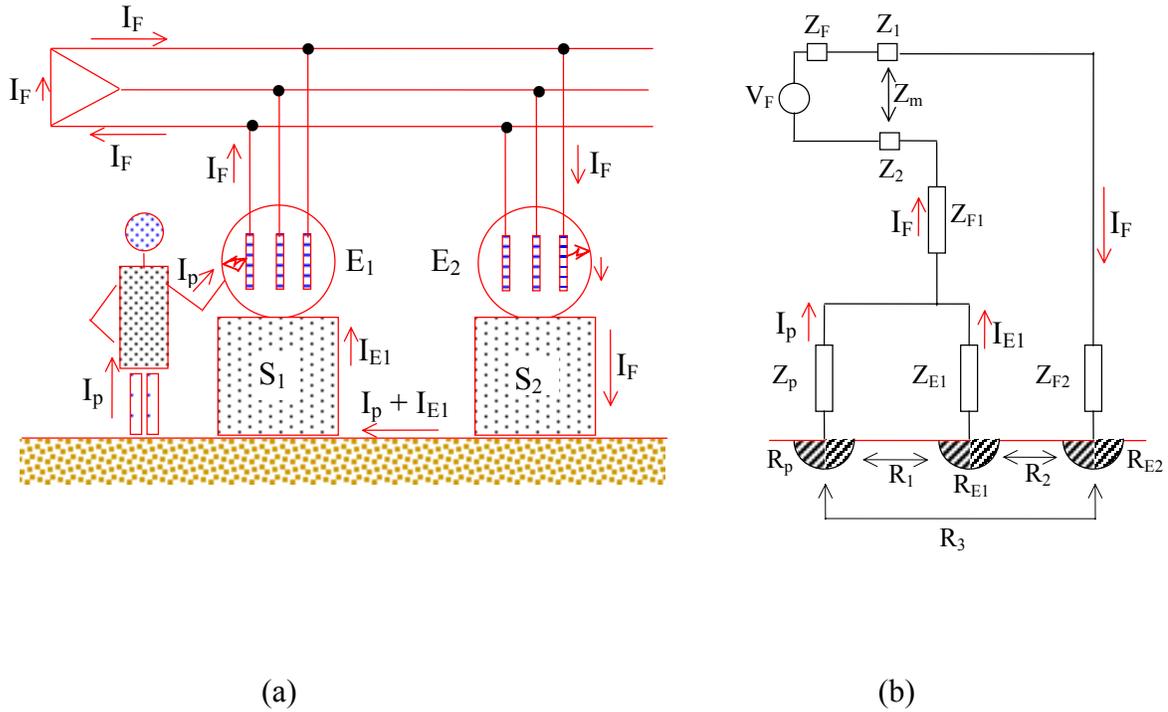


Figura 3 Doble falla a Tierra en un sistema aislado de tierra
 (a) Camino de circulación de la corriente de falla
 (b) Circuito Equivalente

$$K_p = \frac{(Z_{E1} + R_{E1} - R_1)}{(Z_t + Z_p + R_{E2} + R_p - 2Z_m)(Z_{E1} + R_{E1} - R_1) + (Z_t + R_{E2} - 2Z_m + R_1)(Z_p + R_p - R_1)} \quad (11)$$

Donde :

$$Z_t = Z_F + Z_{F1} + Z_{F2} + Z_1 + Z_2 \quad (12)$$

Z_F representa la impedancia de la fuente, Z_1 y Z_2 son las impedancias de los conductores con su respectiva impedancia mutua Z_m . La impedancia Z_{F2} incluye la impedancia de la falla mas la

impedancia del pedestal de soporte S_2 . Z_{F1} representa la impedancia de la falla en el equipo E_1 , usualmente se asume igual a cero.

La condición mas desfavorable se tiene cuando la impedancia $Z_{E1} \rightarrow \infty$, en este caso el factor K_p está determinado por:

$$K_p = \frac{I}{Z_t + Z_p + R_p + R_{E2} - 2Z_m} \quad (13)$$

Por el contrario si $Z_{E1} \rightarrow 0$ se tiene:

$$K_p = \frac{(R_{E1} - R_l)}{(Z_t + Z_p + R_{E2} + R_p - 2Z_m)(R_{E1} - R_l) + (Z_t + R_{E2} - 2Z_m + R_l)(Z_p + R_p - R_l)} \quad (14)$$

De las expresiones anteriores, especialmente de las expresiones (2), (6), (11) y (14), pareciera prudente tener un sistema de conexión a tierra que redujera a valores mínimos la impedancia entre los equipos y el terreno (Z_E) y la resistencia a tierra de los equipos (R_E). Sin embargo esto implica costos adicionales en la instalación frente a la probabilidad de ocurrencia de una situación de riesgo para una persona. La decisión depende de la política de seguridad dentro de la instalación en cuestión.

2.2.2 Sistemas sólidamente conectados a tierra

En este caso una falla a tierra involucra corrientes elevadas que en algunos casos pueden superar los niveles de corriente de una falla trifásica. Este elevado valor de corriente representa un riesgo para las personas por efectos del arco eléctrico de falla y/o choque eléctrico. Si el arco de falla se presenta en un sitio de acceso a personas, existe la posibilidad de que una persona este en el espacio inmediato de la falla sirviendo de puente eléctrico para el arco de la falla, o en el caso extremo que sea la persona la causante de la falla por un contacto involuntario con un elemento energizado. Por otro lado si existe una falla que involucre una parte del metálica del equipo de fácil acceso, por ejemplo: la cubierta de un motor, el tanque de un transformador, la postadura o apoyo de los conductores; que en condiciones normales están aisladas de los elementos energizados, existe la posibilidad de que una persona sufra un choque eléctrico si establece contacto con el equipo.

En general la detección y ubicación de fallas a tierra en un sistema sólidamente conectado a tierra es mas fácil que en un sistema aislado. Sin embargo la continuidad de servicio es inferior en el sistema conectado a tierra. Para analizar las situaciones de riesgo se va a utilizar la condición ilustrada en la figura 4.

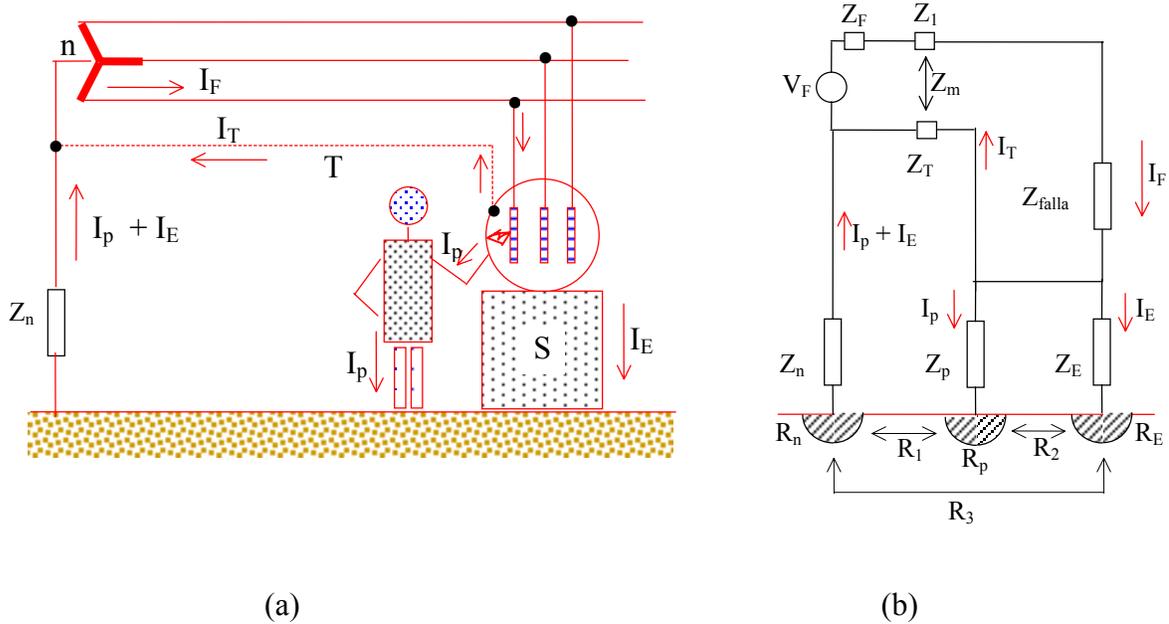


Figura 4 Falla a Tierra en un sistema sólidamente conectado a tierra

(a) Camino de circulación de la corriente de falla

(b) Circuito Equivalente

Es evidente que bajo una condición de falla si no se toman las previsiones del caso, la situación que se ilustra en la figura 4 puede ser de riesgo para una persona. El conductor T representa lo que se ha denominado el conductor de tierra, su función es servir de camino de retorno a las corriente de falla que se originan por pérdida del aislamiento. La forma correcta de utilizar este conductor T es ubicarlo lo mas cercano posible a los conductores activos que alimentan el equipo, es por ello que generalmente se ubican en la misma ductería . La impedancia Z_n representa la impedancia que se puede colocar intencionalmente entre el neutro y la conexión al terreno para limitar la corriente de falla de una fase a tierra; para el análisis que sigue en sistemas sólidamente conectado a tierra $Z_n = 0$.

La corriente I_p que circula por el cuerpo de la persona en la situación de la figura 4 esta dada por la expresión $I_p = K_p \cdot V_F$, donde V_F es el voltaje de fase a neutro. El factor K_p es igual a:

$$K_p = \frac{(Z_E + R_E - R_2)(Z_T - Z_m)}{\left[(Z_p + R_p - R_2)(Z_T + R_n - R_2) + Z_C \cdot (Z_E + R_E - R_2) \right] (Z_B - Z_m) + Z_D (Z_T - Z_m)^2} \quad (15)$$

Donde :

$$Z_B = Z_F + Z_1 + Z_T + Z_{falla} \quad (16)$$

$$Z_C = Z_p + Z_T + R_p + R_n \quad (17)$$

$$Z_D = Z_E + Z_p + R_E + R_p - 2R_2 \quad (18)$$

Se asume que $R_1 = R_3 = 0$. Al igual que en los casos analizados previamente, la condición mas desfavorable se tiene cuando la impedancia $Z_E \rightarrow \infty$ y no existe el conductor de tierra T, en este caso el factor K_p está determinado por:

$$K_p = \frac{1}{Z_F + Z_p + R_p + R_E + Z_{falla} + Z_1} \quad (19)$$

Por el contrario si $Z_E \rightarrow 0$ se tiene:

$$K_p = \frac{(R_E - R_2)(Z_T - Z_m)}{\left[(Z_p + R_p - R_2)(Z_T + R_n - R_2) + Z_C \cdot (R_E - R_2) \right] (Z_B - Z_m) + Z_D (Z_T - Z_m)^2} \quad (20)$$

El valor de Z_D se modifica a $Z_D = Z_p + R_E + R_p - 2R_2$

Es obvio la necesidad de que la resistencia a tierra del equipo sea lo menor posible. En general las situaciones prácticas no son tan simples como la de la figura 4, ya que los sistemas de conexión a tierra pueden tener una geometría mas compleja que la de un electrodo simple. En estos casos la determinación de la corriente I_p no se puede hacer mediante el planteamiento formal de un sistema de ecuaciones derivadas mediante la aplicación de la teoría de circuitos. Para bajas frecuencias la distribución de corrientes entre los elementos que conforman un SCT complejo conduce a la resolución de la ecuación de Laplace en tres dimensiones. Como alternativa se han desarrollado procedimientos que permiten determinar el perfil de voltajes en la superficie del terreno, y a partir de esta información se puede evaluar el riesgo en una situación determinada[9].

Si no existe el conductor de tierra T, el facto K_p se modifica de la siguiente forma:

$$K_p = \frac{(Z_E + R_E - R_2)(Z_T - Z_m)}{\left(Z_F + Z_1 + Z_p + R_p + R_n + Z_{falla} \right) + \left(Z_p + R_p - R_2 \right) \left(Z_F + Z_1 + Z_p + R_p + R_n + Z_{falla} \right)} \quad (21)$$

3) EL SISTEMA DE CONEXIÓN A TIERRA PARA DESCARGA DE RAYOS

Parte de los sistemas de protección contra descargas directas de rayos lo conforma el equipo de intercepción de la descarga, el cual consiste de una punta pararrayo, o punta Franklin, conductor de conexión a tierra y la conexión a tierra propiamente dicha. Tanto el conductor como la conexión a tierra deben presentar la menor impedancia posible al impulso de corriente de la

descarga del rayo, idealmente cero; aparte de la capacidad térmica y mecánica necesarias para soportar los efectos de este impulso de corriente.

La respuesta de un SCT a un impulso de corriente es compleja y hasta la fecha no se tiene una formulación matemática concluyente. Un factor importante en esta respuesta lo constituye la ionización del terreno, sin embargo todavía se conoce poco acerca de este fenómeno. Lo que si está claramente definido es que el uso de conductores muy largo para obtener un baja resistencia a bajas frecuencias, no es conveniente para las descargas del rayo debido a que existe un tiempo de transito del impulso a lo largo del conductor, es decir se comporta como una línea de transmisión y no como un elemento concentrado.

Los efectos de un impulso de corriente que descarga a través de un SCT se deben controlar para evitar los siguientes efectos:

- Situaciones de peligro para las personas
- Daños de equipos
- Riesgo de incendio
- Interferencia electromagnética

Generalmente el SCT utilizado para bajas frecuencias se utiliza también para las descarga del impulso de corriente de los rayos. Los criterios de diseño deben ser manejados acertadamente para evitar los efectos indeseables mencionados.

4) CORRIENTES PERMITIDAS EN EL CUERPO HUMANO

Es común hablar de los efectos debidos a una intensidad de corriente, mas que de un valor de voltaje, debido a que la circulación de una corriente eléctrica es la que produce efectos en el cuerpo humano. Aún cuando se cumple la ley de ohm, no es fácil establecer un nivel de voltaje peligroso debido a que la intensidad de corriente depende de factores difícilmente controlables como lo son: la resistencia de contacto de las partes del cuerpo humano por donde se cierra el circuito de corriente(manos, pies, etc.), humedad de la piel y la impedancia que presentan en sí las partes del cuerpo humano por donde circula la corriente (brazos, piernas, tronco, etc.).

El efecto de la corriente eléctrica sobre el cuerpo humano depende de múltiples factores entre los que se pueden mencionar los siguientes:

- Camino de circulación en el cuerpo y distribución de la densidad de corriente
- Intensidad de la corriente
- Tiempo de duración de la corriente
- Tipo de onda de la corriente: corriente continua, alterna(frecuencia), impulso(rayos)
- Condiciones orgánicas de la persona

Estos efectos van desde la sensación de hormigueo para bajas corrientes, apareciendo dolor muscular y rigidez muscular en la medida que se incrementa la intensidad de corriente, dificultad para respirar, asfixia, fibrilación ventricular, quemaduras y alteraciones en la sangre. Obviamente estos efectos dependen del tiempo que dure la circulación de la corriente por el cuerpo. En la

tabla 2 se resumen los rangos de corriente y sus efectos para corriente alterna de 60 Hz según la norma IEEE-80[9].

1 mA	Nivel de percepción. Ligera sensación de hormigueo
1 - 6 mA	Sensación desagradable. No se pierde el control muscular (let – go current)
9 - 25 mA :	Dolor. Dificultad o imposibilidad de soltar un objeto agarrado con la mano
25 – 60 mA	Aparecen contracciones musculares que pueden dificultar la respiración. Hasta este nivel de corriente los efectos desaparecen cuando se interrumpe la corriente, excepto en el caso que ocurra paro respiratorio. En este caso con técnicas de resucitación se puede salvar a la persona.
60 – 100 mA	Puede ocurrir fibrilación ventricular, paro cardíaco, paro respiratorio los cuales pueden causar la muerte o daños irreversibles

Tabla 2 Rangos de corriente y sus efectos de acuerdo a la norma IEEE-80[9]

5) EL SISTEMA DE CONEXIÓN A TIERRA

Un SCT está formado por dos partes claramente diferenciadas:

- La red de conexión a tierra(RCT)
- El sistema de electrodos de conexión al terreno(SECT)

5.1) La Red de Conexión a Tierra (RCT)

La red de conexión a tierra está formada por todas las conexiones y conductores encargados de ofrecer un camino de baja impedancia entre los equipos a ser conectados a tierra , y los puntos de conexión al terreno. La confiabilidad de esta conexión debe ser elevada, de los análisis preliminares en la sección 2 se puede ver cuan importante es que la impedancia de conexión al SECT sea lo menor posible. La interrupción de una conexión a tierra puede transformar un equipo seguro en un equipo potencialmente peligroso.

La práctica recomendada para la RCT es la conexión individual de los equipos al SECT. Esto se hace por las siguientes razones:

- Permite minimizar la desconexión de equipos al SECT cuando por accidente se rompa o interrumpa alguna de estas conexiones. De esta forma se incrementa la confiabilidad general de la conexión a tierra de los equipos en una instalación determinada.
- Si ocurre una falla a tierra en alguno de los equipos, la corriente de falla tiene su retorno individual por medio de un conductor específico. Este aspecto es de suma importancia, se debe garantizar que la corriente de falla no va tomar caminos de retorno alternos no previstos. El riesgo que se corre con estos caminos alternos no previstos, es que no posean la capacidad térmica necesaria para transportar la corriente de falla en forma total o parcial; esto puede traer como consecuencia daños en otros circuitos y/o equipos que no estén involucrados en la falla, además del riesgo de generación de incendios.

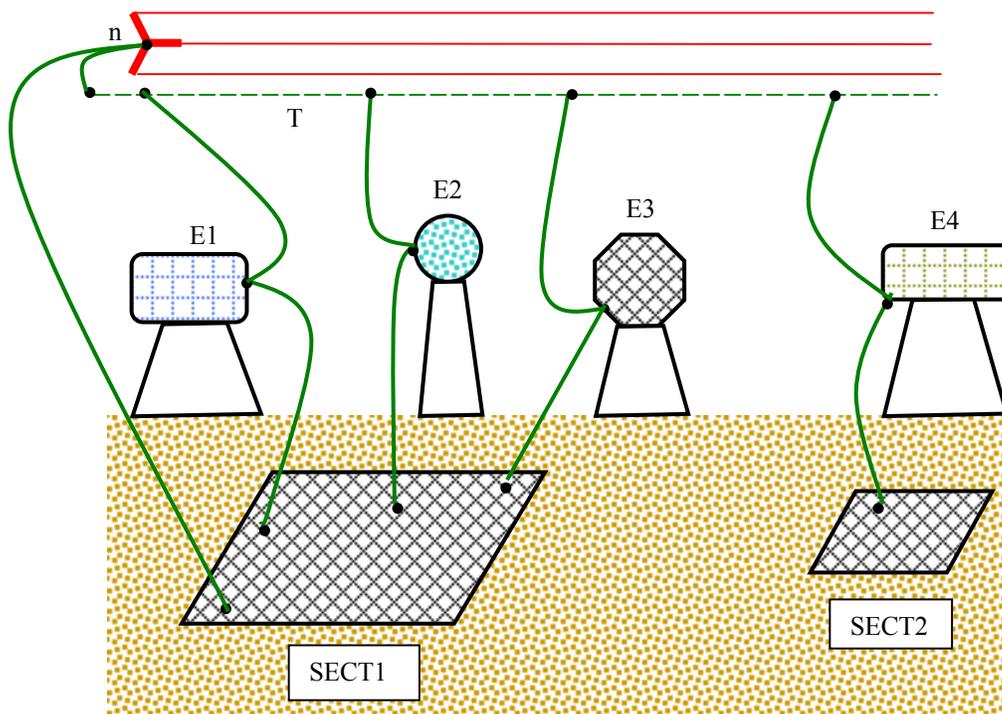


Figura 5 Conexión de equipos al SECT

En la figura 5 se ilustran algunos casos de conexión de equipos al SECT, los equipos tienen conexión redundante a tierra por medio de la conexión al cable de tierra T. Esta conexión redundante representa caminos alternos para el retorno de las corrientes de falla involucradas en otros equipos. Las conexiones de E1, E2 y E3 al conductor T son opcionales si el perfil de voltajes en las inmediaciones, bajo la condición de falla más severa, está controlado por el SECT1 para evitar situaciones de riesgo. Si el SECT1 no puede garantizar esto, entonces lo recomendable es conectar los equipos al conductor T; esto permite que la corriente de falla retorne predominantemente por T aliviando los voltajes de riesgo que pueden aparecer en la superficie

del terreno. El equipo E4 que está alejado del SECT1 y tiene su propio arreglo SECT2 de conexión al terreno. La conexión al conductor T permite la operación de los dos SECT en paralelo lo cual generalmente es beneficioso ya que reduce sustancialmente el retorno de la corriente por el terreno reduciendo los voltajes de riesgo que pueden aparecer en la superficie del terreno. Como ya se dijo previamente, la corriente de falla a tierra que pueda ocurrir en E4 retorna predominantemente por T. Si esta conexión se omite, entonces la corriente de falla en E4 retorna por el terreno utilizando los SECT 1 y 2; en este caso se debe garantizar que la resistencia a tierra de ambos arreglos es lo suficientemente baja para evitar que el valor de la corriente de falla este por debajo del valor de operación de los dispositivos de protección. Adicionalmente se debe garantizar que el perfil de voltajes asociado no represente una situación de riesgo para las personas.

Cualquiera que sea el caso de conexión o no al conductor T, siempre se debe verificar que el perfil de voltajes que pueda aparecer en la superficie del terreno no represente una situación de riesgo. Esta es una de las funciones mas importantes del SECT

Para el diseño de la RCT se siguen tres recomendaciones básicas:

- Determinar la corriente de falla mas severa y el tiempo a que puedan estar sometidos los conductores y conexiones a los equipos, con la finalidad de seleccionar el calibre adecuado del conductor y la forma de conexión a los equipos y al SECT. Adecuado significa que tengan la capacidad térmica y mecánica suficiente para transportar la corriente de falla sin perder sus propiedades de conducción eléctrica.
- Evitar lazos o caminos paralelos no previstos para el retorno de la corriente de falla. Esto se logra haciendo la conexión individual de cada equipo al SECT o al conductor de tierra.
- Cuando se tienen equipos alejados con SECT individuales, se deben analizar en detalle las posibles situaciones de retorno de la corriente de falla por elementos sin capacidad para transportar altas densidades de corriente, por ejemplo pantallas de cables coaxiales, y la situación de riesgo que se pueden ocasionar por los denominados potenciales transferidos.

5.2 El Sistema de Electrodo de Conexión al Terreno(SECT)

El diseño de un SECT involucra criterios relacionados con la respuesta eléctrica de uno o varios electrodos inmersos en un terreno que se considera un medio conductor semiinfinito heterogéneo. Como la conductividad del material de los electrodos es mucho mayor que la del terreno se asume que los electrodos son conductores perfectos. Los criterios de diseño se reducen a dos:

- a) El perfil de voltajes en las inmediaciones del SECT debe ser controlado para evitar que aparezcan en la superficie del terreno diferencias de potencial que pongan en peligro la vida de las personas.
- b) La resistencia a tierra del arreglo debe ser menor que un límite preestablecido.

El valor de la resistencia a tierra se fija de acuerdo a los siguientes factores:

- ❑ Valor mínimo de corriente de operación de los dispositivos de protección.
- ❑ Valor máximo de resistencia permitido para evitar efectos adversos en la descarga al terreno de un rayo.
- ❑ Valor máximo de la elevación del potencial de tierra de la instalación respecto una referencia muy lejana (EPT o GPR).

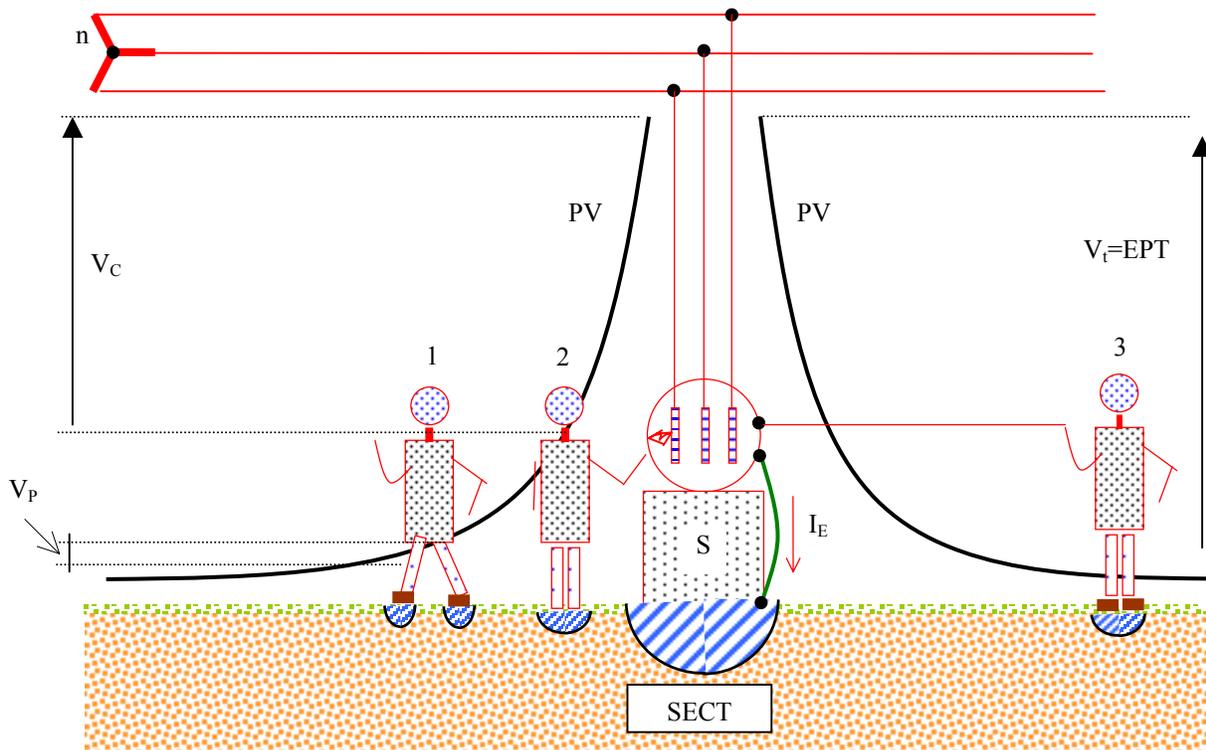


Figura 6 Situaciones de Riesgo

- 1- Voltajes de paso
- 2- Voltaje de contacto
- 3- Voltaje transferido

En la figura 5 se muestran las tres situaciones típicas que se analizan cuando se diseñan los SECT. El perfil de voltajes PV representa la variación del voltaje sobre la superficie del terreno tomando como referencia un punto en el infinito. Este perfil de voltajes aparece cuando se inyecta una corriente de falla I_E al SECT. La persona en la situación 1 está sometida a una diferencia de potencial V_p que aparece entre los pies por estar en contacto con diferentes puntos en la superficie del terreno. La situación 2 corresponde a una persona que se encuentra en contacto con el equipo fallado y sus pies están en contacto con un punto del terreno a diferente potencial que la conexión a tierra del equipo. La tercera situación corresponde a lo que se denomina voltaje transferido, éste es un caso particular del voltaje de contacto en la que la diferencia de potencial a la cual está sometida la persona es prácticamente igual a la Elevación del Potencial de Tierra (EPT) del SECT respecto a una referencia en el infinito.

El concepto de resistencia se define como la relación entre el voltaje respecto a un punto en el infinito y la corriente que provoca esa elevación de voltaje. En la figura 7 se ilustra este concepto, pero midiendo el potencial en el terreno respecto al SECT. Es de notar que desde el punto de vista práctico la distancia a partir de la cual la diferencia de voltaje medida entre el SECT y el punto r no varía sustancialmente se puede considerar como una distancia infinita.

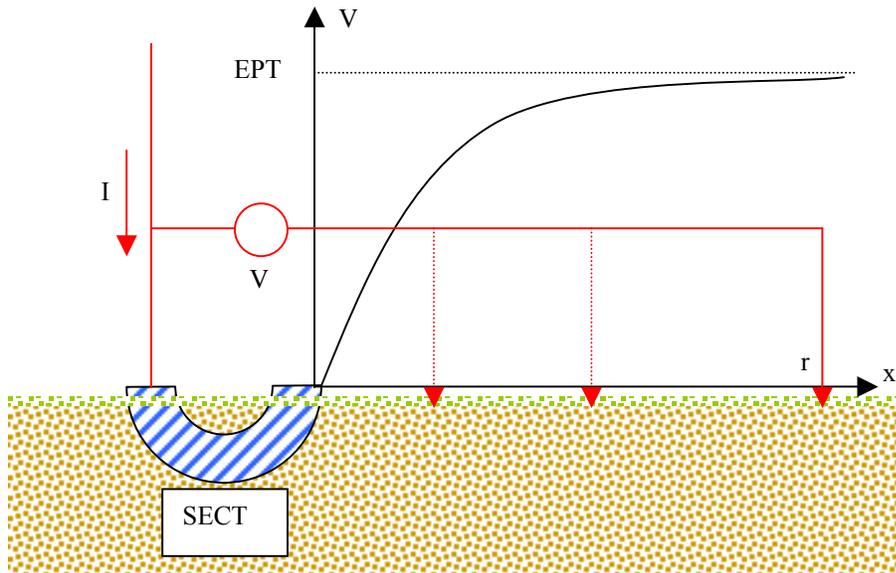


Figura 7 Perfil de voltaje tomando como referencia el SECT

La relación EPT/I es lo que se denomina la resistencia a tierra del SECT. Nótese que si la diferencia de potencial se mide muy cerca del SECT la relación indicada no representa el concepto de resistencia tierra. El método más utilizado para medir la resistencia a tierra es el Método de la Caída de Potencial o método de los tres puntos, para más detalle ver[2,11].

El proceso de diseño de un SECT se reduce entonces a determinar el máximo voltaje que una persona puede soportar en una situación determinada, y compararlo con el voltaje que puede aparecer en esa misma situación cuando ocurre la falla a tierra que inyecta la mayor proporción de corriente al terreno. Para determinar valor máximo que una persona puede soportar sin riesgo de muerte existen procedimientos detallados en la referencia[10]. Calcular los voltajes que pueden aparecer en la superficie del terreno es un problema complejo que depende de la geometría del SECT. Para arreglos sencillos de un solo electrodo se han desarrollado fórmulas utilizando el método del potencial promedio[7,15]. Para arreglos complejos como las mallas de tierra y/o arreglos con múltiples barras verticales, tomando como punto de partida las expresiones para electrodos simples se logra ensamblar un sistema de ecuaciones que permite obtener la distribución de corrientes entre los elementos del arreglo. Conocida la distribución de corrientes se puede determinar el potencial en cualquier punto de la superficie y también se puede determinar el valor de la resistencia a tierra. Todo este procedimiento se encuentra más o menos en detalle en las referencias[6,8].

Para la aplicación del procedimiento mencionado es fundamental tener un modelo adecuado del terreno. Para bajas frecuencias un terreno en particular se puede caracterizar por su resistividad.

Dependiendo de los materiales que lo conforman el terreno puede considerarse homogéneo o heterogéneo. En la práctica es difícil conseguir un terreno que se pueda modelar como un terreno homogéneo. Es usual utilizar modelos de dos o más estratos dispuestos horizontalmente, cada estrato caracterizado por su resistividad y espesor. La información necesaria para determinar un modelo se obtiene mediante la exploración geoelectrica, la cual consiste en medir la resistividad aparente mediante arreglos de electrodos dispuestos en la superficie del terreno [13,14]. Uno de los métodos más populares en América es el método de los cuatro puntos de Wenner. Una vez que se tienen los valores de la resistividad aparente se resuelve el problema inverso: determinar el modelo multiestratificado que mejor se aproxime a los valores medidos mediante la exploración hecha. Obviamente lo recomendable es llevar a cabo la exploración geoelectrica durante la época seca, que es la condición más desfavorable en relación a la conducción eléctrica del terreno.

Otro parámetro fundamental es la mayor corriente de falla a tierra prevista que puede originar situaciones de más riesgo para las personas. Aquí es importante tener en cuenta el crecimiento con el tiempo de los niveles de cortocircuito del sistema de potencia originado por modificaciones en la topología del sistema y el incremento de la capacidad de generación. Un SCT puede ser seguro para unos niveles de cortocircuito dados, pero puede transformarse en un sistema con riesgo mortal si los niveles de cortocircuito superan ciertos valores determinados.

El procedimiento de diseño de un SCT se puede resumir en los siguientes pasos:

- ❑ Exploración geoelectrica del terreno y obtención de un modelo estratificado del terreno.
- ❑ Determinación de la máxima corriente de falla posible, incluyendo variaciones posibles del sistema de potencia.
- ❑ Diseño de la Red de Conexión a Tierra (RCT), controlando el camino de retorno de las corrientes de falla. Determinación del calibre mínimo del conductor y la forma de conexiones a equipos que soporten sin pérdida de sus propiedades conductoras la máxima corriente de falla prevista, de acuerdo a la distribución de la corriente de falla por los caminos de retorno previstos anteriormente.
- ❑ Determinación de los máximos voltajes que puede soportar una persona sin riesgo de muerte.
- ❑ Proposición de un arreglo inicial del Sistema de Electrodos de Conexión a Tierra (SECT), y determinación de los voltajes máximos de paso, contacto, transferidos y determinación de la resistencia de tierra.
- ❑ Si los valores determinados en el paso precedente cumplen con los criterios establecidos de voltajes y resistencia a tierra el diseño se considera adecuado. En caso contrario se deben hacer modificaciones a la proposición inicial, y verificar de nuevo si se cumple con los criterios establecidos.

Generalmente el proceso de diseño de un SCT es un proceso iterativo que se mejora en cada revisión hasta satisfacer los criterios de diseño.

5) CONCLUSIONES

Se han expuesto en forma resumida los aspectos fundamentales de los Sistemas de Conexión a Tierra, haciendo énfasis en como se origina esta necesidad debido a la selección de un sistema de distribución de energía eléctrica conectado a tierra o aislado de ésta. El aspecto primordial de un SCT es la seguridad de las personas, y esto se refleja en la facilidad de detectar y aislar una falla de aislamiento que involucre elementos conductores que puedan ser tocados por personas. Desde el punto de vista de la primera falla a tierra los sistemas aislados presentan menor riesgo para las personas en comparación a los sistemas sólidamente conectados a tierra. Sin embargo la detección y ubicación de fallas a tierra en un sistema aislado es mas difícil.

Una vez que se define la utilización de un sistema conectado a tierra, se requiere la existencia de un SCT que garantice la seguridad de las personas cuando ocurre una falla a tierra. El diseño del SCT es un proceso que requiere información fundamental relacionada con el terreno y con los máximos niveles de corriente de falla a tierra que pueda aportar el sistema, previendo el crecimiento de estos niveles con las modificaciones que pueda sufrir el sistema de potencia a lo largo de la vida útil de la instalación donde va a funcionar el SCT.

6) BIBLIOGRAFÍA

- [1]BEEMAN, D., Ed.: “ Industrial Power Systems Handbook”, McGraw- Hill, 1955
- [2]BRICEÑO, J.H., : “ Manual para la Medición de la Resistencia a Tierra”, Taller de Publicaciones de la Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, 1995.
- [3]BRICEÑO, J.H.,: “ Guía y Procedimientos para la Medición de la Resistividad aparente e Interpretación de Resultados”, Publicaciones de la Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, 1995., Marzo, 1997 .
- [4]BRIDGES, J.E, VAIMBERG, M., WILLS, M.C.,: “Impact of Recent Developments in Biological Electric Shock Safety Criteria” , IEEE Trans. Vol. PWRD-2, No. 1, January 1987.
- [5]CENTRAL STATION ENGINEERS OF THE WESTINGHOUSE ELECTRIC COTPORATION: “ Electrical Transmission and Distribution Reference Book”, Pittsburg, 1964.
- [6]DAWALIBI, F., MUKHEDKAR, D.,: “ Optimun Design of Substation Grounding in a Two Layer Earth Structure, Part I : Analytical Study” , IEEE Trans. Vol. PAS-94, No. 2, March/April, 1975.
- [7]DWIGHT, H.B.,: “ Calculation of Resistance to Ground”, Electrical Engineering, vol. 55, pp 1319-1328, December 1936.
- [8]HEPPE, R. J., : “ Computation of Potentials at Surface Above an Energized Grid or Other Electrode Allowing for Non-uniform Current Distribution”, IEEE Trans., vol. PAS- 98 , No. 6 , pp.1978-1989, Nov./Dec. 1979.
- [9]IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding ANSI/IEEE std. 80-1986, New York, IEEE/Wiley, 1986.
- [10]IEEE: “ Practical Applications of ANSI/IEEE Standard 80-1986, IEEE Guide for Safety”, IEEE Tutorial Course Text 86 EH0253-5 PWR.
- [11]IEEE std. 81: “ Recomendado Guide for Measuring Ground Resistance and Potentials Gradients in the Earth”, IEEE, 1986.

- [12]KAUFMANN, R.H.: “ Some Fundamentals of Equipment-Grounding Circuit Design”, AIEE Trans., 73, pt. II, pp. 227-232, November 1954.
- [13]KOEFOED, O.: “ Geosounding Principles,1: Resistivity Sounding Measurements”, Elsevier, 1979.
- [14]ORELLANA, E.: “ Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua”, Paraninfo, Madrid, 1982.
- [15]SCHWARZ, S.J.: “ Analytical expressions for Resistance of Grounding Systems”, AIEE Trans., vol. 73, part III-B, pp. 1011-1016, August, 1954.
- [16]SMITH, R.L.,Jr.: “ Grounding- System + Equipment”, Maintenance Engineering, Cleworth, 1971.
- [18] “ SYSTEM GROUNDING FOR LOW-VOLTAGE POWER SYSTEMS”, report on power system grounding, Industrial Power Systems Engineering Operation, General Electric, Schenectady.
- [17]SUNDE, E.J.: “ Earth Conduction Effects in Transmission Systems”, Dover, 1968.
- [19] WILLHEIM, R., WATERS, M.: “ Neutral Grounding in High Voltage Transmission”, Elsevier, 1956.
- [20] WINBURN, D.C.: “ Practical Electrical Safety”, Marcel Dekker, 1988.