

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

**SISTEMAS ELECTRICOS ATERRIZADOS
Y NO ATERRIZADOS EN ALTA TENSION**

TESIS

Presentada a la Junta Directiva de la
Facultad de Ingeniería

Por

JOSE MANUEL CARRILLO AMBROSIO

Al conferírsele el título de

INGENIERO ELECTRICISTA

Guatemala, octubre de 1997

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central

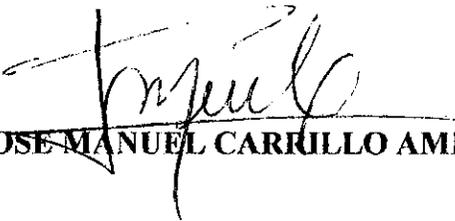
EE
T(A/25)
C.4

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

SISTEMAS ELECTRICOS ATERRIZADOS Y NO ATERRIZADOS EN ALTA TENSION

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 2 de septiembre de 1996, Ref. EIME.240.96.


JOSE MANUEL CARRILLO AMBROSIO

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

MIEMBROS DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
VOCAL 1o.	Ing. Miguel Angel Sánchez Guerra
VOCAL 2o.	Ing. Jack Douglas Ibarra Solórzano
VOCAL 3o.	Ing. Juan Adolfo Echeverría Méndez
VOCAL 4o.	Br. Víctor Manuel Lobos Aldana
VOCAL 5o.	Br. Wagner Gustavo López Cáceres
SECRETARIA	Ing. Gilda Marina Castellanos de Illescas

TRIBUNAL QUE EFECTUO EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Julio Ismael González Podszueck
EXAMINADOR	Ing. Miguel Angel Sánchez Guerra
EXAMINADOR	Ing. Enrique Edmundo Ruiz Carballo
EXAMINADOR	Ing. Judy Marlene Lone Vázquez
SECRETARIO	Ing. Francisco Javier González López

Guatemala,
21 de julio de 1997

Ing. Angel J. García Martínez
Coordinador del Area de Potencia
Escuela de Ingeniería Mecánica-Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

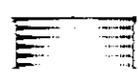
Señor Coordinador:

De la manera más atenta me dirijo a usted para informarle que, conjuntamente con el señor José Manuel Carrillo Ambrosio, he revisado el trabajo de tesis titulado **SISTEMAS ELECTRICOS ATERRIZADOS Y NO ATERRIZADOS EN ALTA TENSION**, considerando que dicha investigación cumple con los objetivos planteados y que fue realizado con responsabilidad, doy mi aprobación para que sea considerado por usted.

El autor de esta tesis y el asesor se hacen responsables del contenido y conclusión de la misma.

Atentamente,


ARMANDO GÓMEZ CASTILLO
Ingeniero Electricista
Colegiado 2162



Guatemala,
21 de julio de 1997

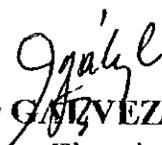
Ing. Angel J. García Martínez
Coordinador del Area de Potencia
Escuela de Ingeniería Mecánica-Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor Coordinador:

De la manera más atenta me dirijo a usted para informarle que, conjuntamente con el señor José Manuel Carrillo Ambrosio, he revisado el trabajo de tesis titulado **SISTEMAS ELECTRICOS ATERRIZADOS Y NO ATERRIZADOS EN ALTA TENSION**, considerando que dicha investigación cumple con los objetivos planteados y que fue realizado con responsabilidad, doy mi aprobación para que sea considerado por usted.

El autor de esta tesis y el asesor se hacen responsables del contenido y conclusión de la misma.

Atentamente,


ARMANDO GÁLVEZ CASTILLO
Ingeniero Electricista
Colegiado 2162



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

Guatemala, 30 de septiembre de 1,997

Señor Director
Ing. Miguel Angel Sánchez Guerra
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica.

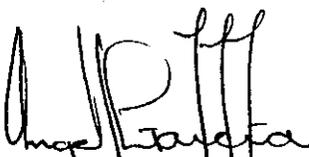
Señor Director.

Me permito dar aprobación al trabajo de tesis titulado: **Sistemas eléctricos aterrizados y no aterrizados en alta tensión**, desarrollo por el señor José Manuel Carrillo Ambrosio, por considerar que cumple con los lineamientos requeridos.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Angel J. García Martínez
Coordinador Area de Potencia

AJGM/sdem.

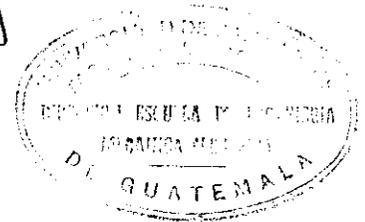


FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Area, al trabajo de tesis del estudiante José Manuel Carrillo Ambrosio, titulada: **Sistemas eléctricos aterrizados y no aterrizados en alta tensión**, procede a la autorización del mismo.

Ing. Miguel Ángel Sánchez Guerra
Director

Guatemala, 15 de octubre de 1,997.

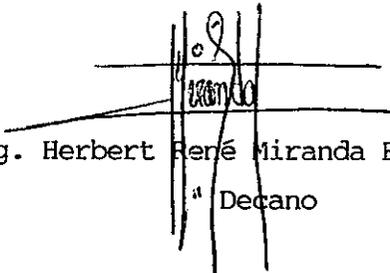


PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central



FACULTAD DE INGENIERIA

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director e la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de tesis: **Sistemas eléctricos aterrizados y no aterrizados en alta tensión**, del estudiante **José Manuel Carrillo Ambrosio**, procede a la autorización para la impresión de la misma.


Ing. Herbert René Miranda Barrios
Decano



ACTO QUE DEDICO

A NUESTRO PADRE CELESTIAL

A MIS PADRES

Gilberto Augusto Carrillo Canté
Julieta Esperanza Ambrosio de Carrillo.

(Gracias por todo su esfuerzo, cariño, respeto y por sobre todo, gracias por su amor, este triunfo más que mío es suyo).

A MIS HERMANOS

Gilberto Augusto, Julieta Nohemí y
María de los Angeles.
Con amor y cariño.

A MIS ABUELITOS

Manuel Carrillo QEPD
Dominga de Carrillo QEPD
José Ambrosio QEPD
Julia de Ambrosio QEPD

A MI ESPOSA

Maritza del Rosario Sánchez de Carrillo
Con amor eterno.

A MIS SUEGROS

Miguel Ángel Sánchez Guerra
María del Rosario de Sánchez.

A MIS TIOS

Con especial aprecio.

A MIS PRIMOS

Con cariño.

A MIS SOBRINOS

Dayrin Yadira, Mario Augusto y Michelle
Andrea.

A MIS COMPAÑEROS DE PROMOCION

Con aprecio, por la calidad de tiempo
compartido.

INDICE

	Página
LISTA DE FIGURAS	iii
GLOSARIO	vi
INTRODUCCION	ix
1. ASPECTOS GENERALES DE UN SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA	
1.1 Componentes de un sistema eléctrico de potencia.....	1
1.2 Representación de un sistema eléctrico de potencia.....	1
1.3 Protecciones básicas de un sistema eléctrico de potencia	2
1.4 Secuencia de operación bajo condiciones normales de un sistema eléctrico de potencia elemental.....	3
2. COMPONENTES SIMETRICOS Y FALLOS ASIMETRICOS	
2.1 Componentes simétricos.....	6
2.2 Componentes simétricos de vectores asimétricos.....	6
2.3 Potencia en función de los componentes simétricos....	10
2.4 Redes de secuencia positiva, negativa y cero.....	11
2.5 Fallos asimétricos.....	16
2.6 Fallos asimétricos en sistemas de potencia.....	16
3. ANALISIS DE CORRIENTES DE NEUTRO	
3.1 Análisis de corrientes de neutro en sistemas eléctricos aterrizados y no aterrizados.....	21
3.2 Análisis de sobrevoltajes en sistemas eléctricos aterriza- dos y no aterrizados.....	36

4. CARACTERISTICAS DE UN SISTEMA ATERRIZADO Y METODOS DE ATERRIZAJE DE NEUTRO	
4.1 Características de un sistema aterrizado.....	54
4.2 Como aterrizar el neutro.....	57
4.3 Bancos de transformadores de tierra.....	59
4.4 Métodos de aterrizaje de neutro.....	60
5. ANALISIS Y APLICACION DE SISTEMAS ELECTRICOS NO ATERRIZADOS EN LA INDUSTRIA	
5.1 Estudio y análisis de sistemas eléctricos no aterrizados en la industria.....	71
5.2 Aplicación de bancos de transformadores de tierra en sistemas no aterrizados.....	73
5.3 Ventajas y desventajas de un sistema eléctrico aterrizado y no aterrizado.....	73
6. ANALISIS Y OPERACION DE FUENTES NO ATERRIZADAS EN SISTEMAS ATERRIZADOS	
6.1 Operación de fuentes no aterrizadas en sistemas aterrizados	80
6.2 Análisis de fuentes no aterrizadas en sistemas aterrizados..	80
6.3 Riesgos de la utilización de fuentes no aterrizadas en sistemas aterrizados.....	81
6.4 Protección de fuentes no aterrizadas en sistemas aterrizados	82
CONCLUSIONES	84
RECOMENDACIONES	86
BIBLIOGRAFIA	87
ANEXO	88

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

1. Diagrama unifilar de Hiper-Paiz.

Capítulo 2

1. Componentes equilibrados de un sistema desequilibrado.
2. Sumatoria gráfica para obtener tres vectores desequilibrados a partir de sus componentes equilibrados.
3. Generador en vacío puesto a tierra a través de reactancia.
4. Redes y sentidos de las corrientes de secuencia de un generador.
5. Redes de secuencia cero para cargas conectadas en estrella.
6. Red de secuencia cero para una carga conectada en delta.
7. Esquema de conexión, símbolos y circuitos equivalentes de secuencia cero de transformadores trifásicos.
8. Conductores de un sistema trifásico cuyas varillas portadoras de corriente pueden ser interconectadas para representar los diferentes tipos de fallos.
9. Redes de secuencia, circuitos equivalentes de Thévenin y diagrama unifilar de un sistema trifásico.
10. Simulación de varios tipos de fallas.

Capítulo 3

1. Sistema y equipo de tierra para un aterrizaje sólido y conductor de puesta a tierra del equipo.
2. Sistema y equipo de tierra para un aterrizaje sólido con circuito en derivación separado.
3. Equipo complementario, consistente en conexión de cada gabinete al sistema de tierra.
4. Desviación de la corriente de neutro debido a los múltiples aterrizajes (del conductor de servicio de tierra) del sistema.
5. Desviación de la corriente de neutro debido al aterrizaje no intencional de un conductor aterrizado.
6. Sistema y equipo de tierra para un sistema en derivación separado y servicio suministrado.
7. Interconexión sólida del conductor de neutro aterrizado en el equipo de servicio y fuente de poder alterna.

8. Desviación de la corriente de neutro debido al aterrizaje del conductor de neutro en dos lugares.
9. Ruta de retorno de la corriente de falla a tierra para un suministro normal de neutro aterrizado en dos lugares.
10. Ruta de retorno de la corriente de falla a tierra para un suministro alterno, y neutro aterrizado en dos lugares.
11. Sobrevoltaje de un sistema no aterrizado en 480 voltios debido a un contacto con un sistema de alto voltaje.
12. Composición elemental de un sistema no aterrizado.
13. Sobrevoltaje de un sistema no aterrizado resultantes de una alta resistencia inductiva conectada entre línea y tierra.
14. Ejemplos de conexiones no intencionales de altas reactancias entre línea y tierra.
15. Transformadores de potencial con estrella aterrizada y delta abierta para indicadores de tierra o detectores de voltajes de secuencia cero.
16. Sobrevoltajes en un sistema no aterrizado como resultado de un contacto a tierra en una máquina soldadora con capacitor en serie.
17. Sobrevoltajes en un sistema no aterrizado debido a contactos momentáneos repetitivos entre línea y tierra.

Capítulo 4

1. Sobrevoltajes transitorios debidos a la interrupción (liberación) de una falla a tierra en un sistema no aterrizado.
2. Las fallas de doble línea a tierra en un sistema no aterrizado resultan en la salida de dos circuitos y en corrientes de falla de nivel alto que pueden causar daños severos en el equipo.
3. Efecto en el voltaje de línea a tierra de una falla de línea a tierra en un sistema no aterrizado.
4. Sistema no aterrizado de bajo voltaje con una falla de simple línea a tierra en un circuito.
5. Transformador de tierra trifásico conectado en zig-zag.
6. Métodos de aterrizaje de neutro
7. Métodos de aterrizaje sólido del neutro de un sistema trifásico.
8. Métodos de aterrizaje de neutro a través de resistencia en sistemas trifásicos.
9. Diagrama de voltaje de un sistema durante la ocurrencia de una falla simple de línea a tierra.

10. Muestra de las corrientes de falla a tierra en un sistema aterrizado a través de neutralizador de falla a tierra.
11. Tres transformadores de corriente y relé de tierra requeridos por cada circuito en una aplicación especial del neutralizador de falla a tierra.
12. Esquema de aterrizaje para una unidad de un sistema.

Capítulo 5

1. Métodos de conexión del transformador de tierra al sistema.

GLOSARIO

Acometida

Conductores que suministran servicio desde el último poste u otro conductor aéreo de soporte, se incluyen empalmes en el caso de que existiera alguno que se conectara a los conductores de entrada del servicio del edificio u otra construcción.

Componentes simétricas

n sistemas de vectores equilibrados en los que se puede descomponer un sistema desequilibrado de n vectores relacionados entre sí (Teorema de Fortescue).

Conductor aterrizado (neutro)

Conductor de sistema o circuito que intencionalmente se aterriza.

Conductor de aterrizaje

Conductor usado para conectar el equipo o el neutro de un sistema hacia los electrodos de tierra.

Conductor del electrodo de tierra

El conductor usado para conectar el electrodo de aterrizaje al conductor de puesta a tierra del equipo y/o al neutral del circuito, ya sea en el equipo de protección o en la fuente en un sistema de derivación separada.

Conductor de puesta a tierra del equipo

El conductor usado para conectar las partes metálicas no portadoras de corriente del equipo, (canaletas, etc.) al conductor neutro del sistema y/o al electrodo de aterrizaje ya sea en el equipo de protección o en la fuente en un sistema de derivación separada.

Conductores de servicio

Son los conductores de suministro que se extienden de la calle principal o de un transformador hacia el equipo de servicio de una instalación.

Corrientes neutrales indeseables

Corrientes neutrales que durante la operación normal del sistema fluyen por otros caminos que los indicados con los conductores de tierra del sistema (neutro).

Diagrama Unifilar

Representación por medio de una línea simple y de símbolos normalizados de líneas de transmisión y aparatos asociados a un sistema eléctrico.

Equipo de servicio

Equipo de protección usualmente formado por un interruptor o por un juego de fusibles, con sus respectivos accesorios, se encuentran instalados cerca de los conductores de suministro que alimentan a edificios o construcciones cercanas e intenta constituirse en el control y medio principal de desconexión del suministro.

Instalación eléctrica del sistema

Cableado interior y exterior, que incluye el cableado de los circuitos de fuerza, iluminación, control y señalización junto a toda la infraestructura que ello implica, ya sea instalados permanente o temporalmente y que se extienden desde el final del cableado de bajada del servicio hasta las salidas. No se incluye cableado interno de motores, controladores, centro de motores y equipo similar.

Red de tierras

Sistema de conductores y varillas en un arreglo determinado que constituye un sistema o red de tierras.

Servicio

Los conductores y equipo usados para suministrar la energía de la fuente eléctrica hacia la instalación del usuario.

Sistema de derivación separada

Es el sistema cuya instalación eléctrica se abastece de energía desde un generador, transformador, etc. y no tiene conexiones eléctricas directas, incluye un conductor del circuito sólidamente aterrizado para suministrar conductores, el cual da origen a otro sistema.

Sistema no aterrizado

Término utilizado para identificar un sistema en el cual no hay conexión intencional entre el neutro del sistema y tierra.

INTRODUCCION

El presente estudio de **SISTEMAS ELECTRICOS ATERRIZADOS Y NO ATERRIZADOS EN ALTA TENSION** intenta ser una herramienta de utilidad para profesionales, estudiantes y técnicos que se desempeñan en el campo de la electricidad. Este personal necesita conocer bajo qué condiciones de operación se encuentra el sistema en el cual está trabajando y al cual se interconecta. Las condiciones de operación estudiadas son las normales, también se incluyen las condiciones de falla.

En primer lugar se presentan aspectos generales sobre el tema, en seguida se estudian los componentes simétricos y fallos asimétricos, luego se realiza un análisis del comportamiento de corrientes de neutro y sobrevoltajes en un sistema eléctrico aterrizado y no aterrizado; se analizarán ventajas y desventajas de la operación de un sistema de potencia en estas condiciones, se estudian fallas en la industria que utiliza sistemas no aterrizados, así mismo, las consecuencias de daños en el equipo por sobrevoltajes así como la operación de este sistema de potencia, finalmente se incluyen aspectos generales de la operación de fuentes no aterrizadas en sistemas eléctricos aterrizados.

1. ASPECTOS GENERALES DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA

1.1 COMPONENTES DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA

Todo sistema eléctrico de potencia consta de cuatro partes o componentes principales. Éstas son:

- centros de generación
- estaciones de transformación
- líneas de transmisión
- líneas de distribución.

Generalmente los centros de generación están conectados a las líneas de distribución por medio de las estaciones de transformación y las líneas de transmisión, de igual manera estas líneas sirven para conectar un sistema de potencia a otro a través de las conexiones adecuadas.

1.2 REPRESENTACION DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA

Para representar un sistema eléctrico de potencia se hace uso de **diagramas unifilares**. El diagrama unifilar es la representación en una sola línea y con símbolos normalizados (ver anexo) de las partes de un sistema eléctrico de potencia, el cual suministra en forma concisa los parámetros más importantes y significativos del mismo.

Los valores de tensión, corriente, potencia aparente y reactancias; en el diagrama unifilar de un sistema eléctrico de potencia se expresan en **cantidades por unidad**. El valor por unidad de cualquier magnitud es el cociente de su valor real en relación a su valor base, de esta operación se obtiene como resultado una expresión decimal. Si se eligen los valores base para dos, cualesquiera de los valores de tensión, corriente, potencia aparente o reactancia, estos determinan los valores bases de los otros dos, aunque normalmente se toman como valores base la potencia aparente y el voltaje.

Para sistemas trifásicos las ecuaciones que se emplean son:

$$\text{Corriente base A} = \frac{\text{base KVA}_{\text{trifásicos}}}{\sqrt{3} \text{ tensión base KV}_{\text{ll}}} \quad (1.01)$$

$$\text{Impedancia base} = \frac{[\text{tensión base KV}_{\text{ll}}]^2}{\text{MVA base}_{\text{trifásicos}}} \quad (1.02)$$

V_{ll} = Voltaje de línea a línea

$$\text{Impedancia p.u. de un elemento de circuito} = \frac{\text{Impedancia real}}{\text{Impedancia base}} \quad (1.03)$$

Frecuentemente se presenta el problema de que la impedancia por unidad de un elemento de un sistema eléctrico de potencia en particular, se expresa en una base distinta al sistema de potencia al cual se va conectar, razón por la cual se hace necesario un cambio de base. Para cambiar la base de un valor por unidad a otra distinta se aplica la ecuación siguiente:

$$\text{p.u. } Z_{\text{nuevos}} = \text{p.u. } Z_{\text{dados}} \frac{[\text{base KV}_{\text{dados}}]^2 \times [\text{base KVA}_{\text{nuevos}}]}{[\text{base KV}_{\text{nuevos}}]^2 \times [\text{base KVA}_{\text{dados}}]} \quad (1.04)$$

1.3 PROTECCIÓN BÁSICA DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA

Para considerar protegido un sistema eléctrico de potencia éste debe ser capaz de manejar e interrumpir con rapidez y precisión las fallas que se le presenten, desconectando únicamente la parte del sistema que haya fallado, con el fin de evitar daños al sistema y a los elementos que lo constituyen.

La mayoría de fallas que se presentan en un sistema son cortocircuitos que pueden ser: trifásicos, de fase a fase, de fase a tierra, etc., y las corrientes que se derivan de estas clases de fallas deben ser interrumpidas lo más pronto posible por los dispositivos de protección del sistema donde ocurran; dichos dispositivos de protección tienen la función de desconectar con precisión y rapidez la parte

del sistema donde haya ocurrido la falla y se alimentan del mismo por medio de transformadores de potencial y transformadores de corriente a excepción de los fusibles de alta tensión que se conectan en serie con el equipo al cual protegen.

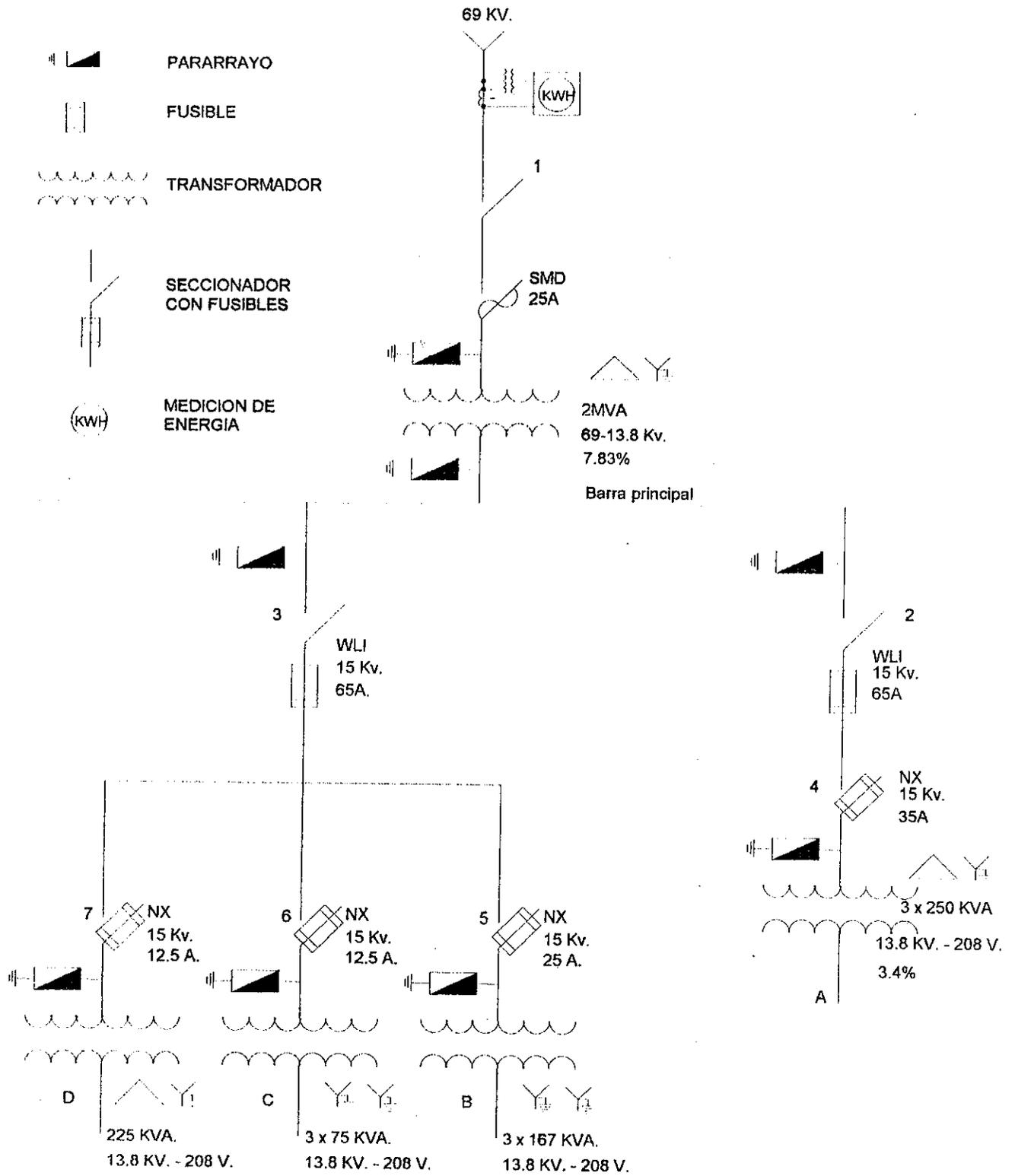
1.4 SECUENCIA DE OPERACIÓN BAJO CONDICIONES NORMALES DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA ELEMENTAL

Para el sistema eléctrico de potencia mostrado en la figura 1.1, la secuencia de operación es la siguiente:

Primeramente se cierra el seccionador No.1 para alimentar la subestación principal de 69 KV de la línea de la Empresa Eléctrica de Guatemala. Dicha subestación alimenta la barra principal de la cual se derivan dos circuitos. Cerrando el panel WLI No.2 y pasando a través del fusible trifásico tipo NX de 35 amperios todo esto en 13.8 KV, se energiza la subestación secundaria *A* de 3x250 KVA, 13.8 KV/208 V, conexión delta-estrella aterrizada. Cerrando el panel WLI No. 3 se energizarán tres subestaciones secundarias: la subestación *B* conformada por un banco de transformadores de 3x167 KVA, 13.8 KV/208 V, conexión estrella aterrizada-estrella aterrizada y protegida por un juego de fusibles trifásicos tipo NX de 25 amperios, la subestación *C* conformada por un banco de transformadores de 3x75 KVA, 13.8 KV/208 V con conexión estrella aterrizada-estrella aterrizada y protegida por un juego de fusibles trifásicos de 12.5 amperios y la subestación *D* consistente en un transformador trifásico de 225 KVA, 13.8 KV/208 V con conexión delta-estrella aterrizada protegida por un fusible trifásico tipo NX de 12.5 amperios. Es de esta forma que el sistema eléctrico de potencia de la tienda Hiper-Paiz opera y hace posible desconectar del sistema cualquiera de sus cuatro subestaciones secundarias, habiendo los fusibles trifásicos tipo NX identificados en el diagrama con los números 4,5, 6 y 7.

Si durante el proceso de operación del sistema de Hiper-Paiz ocurriera alguna falla, operaría la protección más cercana al punto donde ocurriera la misma, liberando la falla. Todo la secuencia de operación descrita se ha supuesto en condiciones de "no falla" en el sistema eléctrico de potencia de Hiper-Paiz.

Fig. 1.1 Diagrama Unifilar de Hiper-Paiz.



2. COMPONENTES SIMÉTRICOS Y FALLOS ASIMÉTRICOS

2.1 COMPONENTES SIMÉTRICOS

Los componentes simétricos sirven para estudiar y analizar sistemas polifásicos desequilibrados; su aplicación se basa en el teorema de C.L. Fortescue. Este teorema establece que un sistema desequilibrado de n vectores relacionados entre sí, pueden descomponerse en n sistemas de vectores equilibrados denominados **componentes simétricos** de los vectores originales. Estos n vectores de cada conjunto de componentes tienen características iguales: igual magnitud y desfaseamiento pero diferente secuencia.

2.2 COMPONENTES SIMÉTRICOS DE VECTORES ASIMÉTRICOS

Aplicando el teorema de Fortescue a un sistema trifásico desequilibrado se obtiene que los tres vectores desequilibrados de este sistema se descomponen en tres sistemas equilibrados de vectores. Estos tres sistemas se agrupan de la siguiente forma:

1. Componentes de secuencia positiva
2. Componentes de secuencia negativa
3. Componentes de secuencia cero.

Las componentes simétricas tienen la misma magnitud, la misma diferencia de fases, 120 grados entre sí, pero no la misma secuencia de fases, es así como la componente de secuencia positiva tiene la misma secuencia de fases que los vectores originales, las componentes de secuencia negativa tienen la secuencia de fase opuesta a la de los vectores originales; y las componentes de secuencia cero no tienen diferencia de fase, es decir, su desfaseamiento es de cero grados.

A continuación se hace mención de algunos subíndices usados para los componentes de secuencias. (Ver figura 2.1):

secuencia positiva: (+) y el número 1
 secuencia negativa: (-) y el número 2
 secuencia cero: (0) y el número 0.

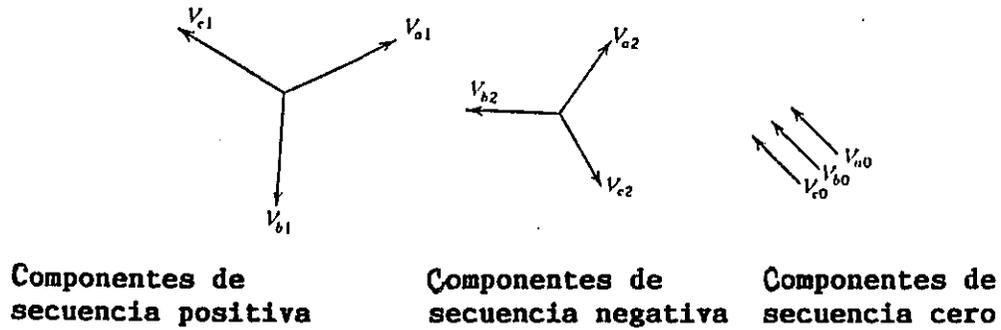


Fig. 2.1 Componentes equilibrados de un sistema desequilibrado.

La sumatoria de las componentes simétricas de un vector desequilibrado, da como resultado el mismo vector sólo que equilibrado.

Por ejemplo, para tres vectores de voltajes, las sumatorias de sus componentes simétricas sería de la siguiente forma:

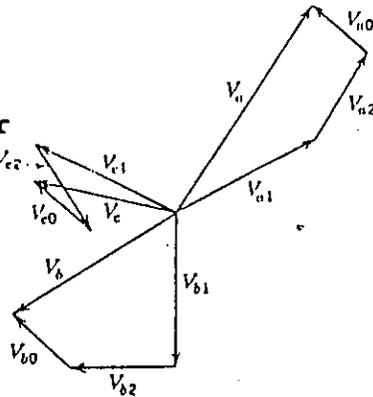
$$V_a = V_{a+} + V_{a-} + V_{a0} \quad (2.1)$$

$$V_b = V_{b+} + V_{b-} + V_{b0} \quad (2.2)$$

$$V_c = V_{c+} + V_{c-} + V_{c0} \quad (2.3)$$

En la figura No. 2.2 se muestra un sistema de vectores desequilibrados a partir de sus componentes simétricos.

Fig. 2.2 Sumatoria gráfica para obtener tres vectores desequilibrados V_{c2} a partir de sus componentes equilibrados.



Es conveniente el uso de operadores para representar la rotación de un vector 120 grados. Un operador es un número complejo de módulo uno y argumento θ que gira al vector que se le aplica, un ángulo θ , generalmente se le asigna la letra "a", a un operador que desplaza 120 grados en contra del movimiento de las agujas del reloj al vector que se le aplica, de esta forma se tiene:

$$"a" = 1 \angle 120^\circ = -0.5 + j0.866$$

Usando la figura No.2.1 se puede expresar cada componente vectorial de V_b y V_c como una función de una componente de V_a con el operador "a" de la siguiente forma:

$$V_{b+} = a^2 V_{a+} \quad V_{c+} = a V_{a+} \quad (2.4)$$

$$V_{b-} = a V_{a-} \quad V_{c-} = a^2 V_{a-} \quad (2.5)$$

$$V_{b0} = V_{a0} \quad V_{c0} = V_{a0} \quad (2.6)$$

Ahora sustituyendo las ecuaciones (2.4), (2.5) y (2.6) en las ecuaciones (2.1), (2.2) y (2.3) se obtiene:

$$V_a = V_{a+} + V_{a-} + V_{a0} \quad (2.7)$$

$$V_b = a^2 V_{a+} + a V_{a-} + V_{a0} \quad (2.8)$$

$$V_c = a V_{a+} + a^2 V_{a-} + V_{a0} \quad (2.9)$$

Trabajando con la matriz $A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$ y la matriz transpuesta de esta,

pueden hacerse simplificaciones y llegar a determinar los componentes de secuencia positiva, negativa y cero de cualquier vector desbalanceado. En este caso se trabajará con V_a .

$$V_{a0} = 1/3 (V_a + V_b + V_c) \quad (2.10)$$

$$V_{a+} = 1/3 (V_a + a V_b + a^2 V_c) \quad (2.11)$$

$$V_{a-} = 1/3 (V_a + a^2 V_b + a V_c) \quad (2.12)$$

Ahora bien, la corriente de neutro en un sistema trifásico (que se denota como I_n), es igual a la sumatoria de las corrientes de línea, por lo tanto:

$$I_n = I_a + I_b + I_c \quad (2.13)$$

Trabajando con la ecuación (2.10) para corrientes, se observa que:

$$I_{a0} = 1/3(I_a + I_b + I_c) \text{ por lo tanto } I_{a0} = 1/3 (I_n) \quad (2.14)$$

Basados en la ecuación (2.14) se concluye que si el sistema trifásico que se está estudiando no tiene retorno por el neutro, la corriente de neutro es cero, por lo que la componente de secuencia cero, no existe. Por esta razón, las corrientes en las líneas no tiene componentes de secuencia cero, solo de secuencia positiva

tienen componentes de secuencia cero, solo positiva y negativa y negativa. De igual forma, observando la ecuación (2.10) se concluye que si la sumatoria de los voltajes entre líneas del sistema trifásico que se está estudiando, es cero, y de hecho siempre es cero, los voltajes de línea de este sistema no tienen componentes de secuencia cero, solo positiva y negativa. Ahora bien, la sumatoria de los voltajes entre líneas y neutro, no es cero, por lo cual estos voltajes con respecto al neutro sí pueden tener componentes de secuencia cero.

2.3 POTENCIA EN FUNCIÓN DE LOS COMPONENTES SIMÉTRICOS

La potencia compleja total, en un sistema trifásico con líneas a, b y c, es de la siguiente forma:

$$S = P + jQ = V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^* \quad (2.15)$$

Los voltajes V_a , V_b y V_c son voltajes con respecto al neutro del sistema trifásico estudiado, y las corrientes I_a , I_b y I_c son las corrientes de línea de dicho sistema trifásico.

Si conocemos los componentes simétricos de las corrientes y voltajes de un sistema trifásico cualquiera, se puede escribir la potencia compleja total del mismo en función de los componentes simétricos:

$$S = V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^* = 3V_0 I_0^* + 3V_1 I_1^* + 3V_2 I_2^* \quad (2.16)$$

donde V_0 , V_1 y V_2 son voltajes con respecto al neutro del sistema.

Esta ecuación muestra como se puede calcular la potencia total compleja de un sistema trifásico cualquiera, a partir del uso de los componentes simétricos de los voltajes y corrientes instantáneos que existen en dicho sistema trifásico.

2.4 REDES DE SECUENCIA POSITIVA, NEGATIVA Y CERO

A. IMPEDANCIAS DE SECUENCIA

Existen tres tipos de impedancia de secuencia:

1. impedancia de secuencia positiva
2. impedancia de secuencia negativa
3. impedancia de secuencia cero.

Si a través de la impedancia de un circuito, sólo circulan corrientes de determinada secuencia, entonces la impedancia se denominará: impedancia de esa secuencia.

El circuito monofásico equivalente formado por las impedancias de secuencia de cualquier corriente en forma exclusiva se llama "red de secuencia" de dicha secuencia en particular. Esta red de secuencia contiene las fuerzas electromotrices generadas de una secuencia igual.

B. REDES DE SECUENCIA

Los motores, generadores, transformadores y líneas de transmisión pueden ser representados por medio de tres redes de secuencia:

1. redes de secuencia positiva
2. redes de secuencia negativa
3. redes de secuencia cero.

C. REDES DE SECUENCIA POSITIVA, NEGATIVA Y CERO DE UN GENERADOR SIN CARGA

La figura No.2.3 muestra un generador sin carga que está puesto a tierra a través de una reactancia. Al momento de presentarse un fallo en las terminales

de dicho generador circularían las corrientes I_a , I_b e I_c que se muestran en dicha figura, ahora bien, si el fallo se relaciona con la tierra se producirá una corriente en el neutro denominada I_n .

La figura No.2.4 muestra las redes de secuencia correspondientes para cada corriente de secuencia que circula por el generador.

La barra de referencia de las redes de secuencia positiva y negativa se encuentra localizada en el neutro del generador.

Las ecuaciones para los voltajes de secuencia positiva, negativa y cero del generador sin carga estudiado, se pueden deducir de la figura No.2.4:

$$V_{a_1} = E_a - I_{a_1} Z_1 \quad (2.17)$$

$$V_{a_2} = -I_{a_2} Z_2 \quad (2.18)$$

$$V_{a_0} = -I_{a_0} Z_0 \quad (2.19)$$

Estas ecuaciones constiuyen la base para deducir las ecuaciones de los componentes de corriente, que se aplican a los diferentes tipos de fallos que existen en un sistema eléctrico de potencia.

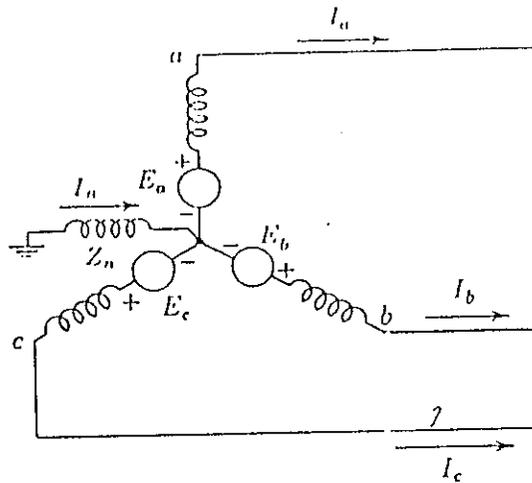


Fig. 2.3 Generador en vacío puesto a tierra a través de reactancia.

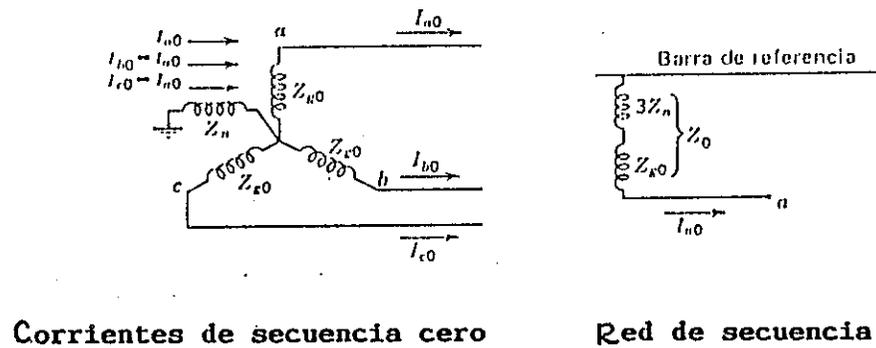
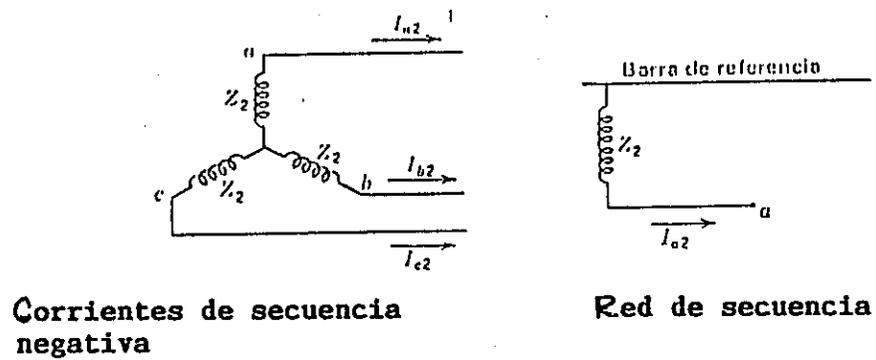
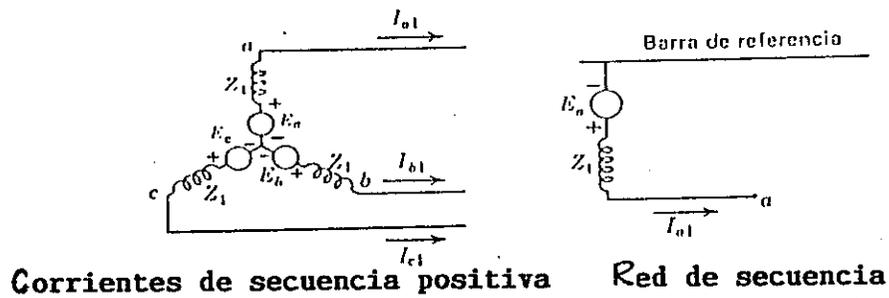


Fig.24 Redes y sentidos de las corrientes de secuencia de un generador.

D. REDES DE SECUENCIA CERO

Es posible que las corrientes de secuencia cero, estén circulando por tierra y esta tierra no necesariamente está al mismo potencial en todos sus puntos, razón por la cual, la barra de referencia de la red de secuencia cero representa una tierra con potencial no uniforme; los cables de tierra y la impedancia de tierra se incluyen en la impedancia de secuencia cero de la línea, por lo que las tensiones medidas respecto a la barra de referencia de dicha red son las tensiones exactas respecto a tierra. El conductor de retorno del sistema tiene impedancia nula. En la figura No. 2.5 se muestra las redes de secuencia cero de cargas conectadas en estrella.

En el caso de un circuito conectado en delta, no se dispone de camino de retorno, por lo tanto, en la red de secuencia cero esta condición se representa con una impedancia infinita y abierta. Como el circuito delta es un circuito en serie cerrado, las corrientes de secuencia cero pueden circular dentro del mismo, pero estas corrientes deberían de ser producidas por la delta, por las tensiones generadas de secuencia cero o por fuentes exteriores. En la figura No.2.6 se muestra una carga conectada en delta y su red de secuencia cero.

Para las redes de secuencia cero de conexiones de transformadores trifásicos existen diversas combinaciones posibles de los devanados primario y secundario conectados en delta y en estrella, figura No.2.7, variando por esta razón la red de secuencia cero, las posibles conexiones serán:

1. conexión Y-Y un neutro a tierra
2. conexión Y-Y ambos neutros a tierra
3. conexión Y- Δ con la Y aterrizada
4. conexión Y- Δ con la Y no aterrizada
5. conexión Delta-Delta.

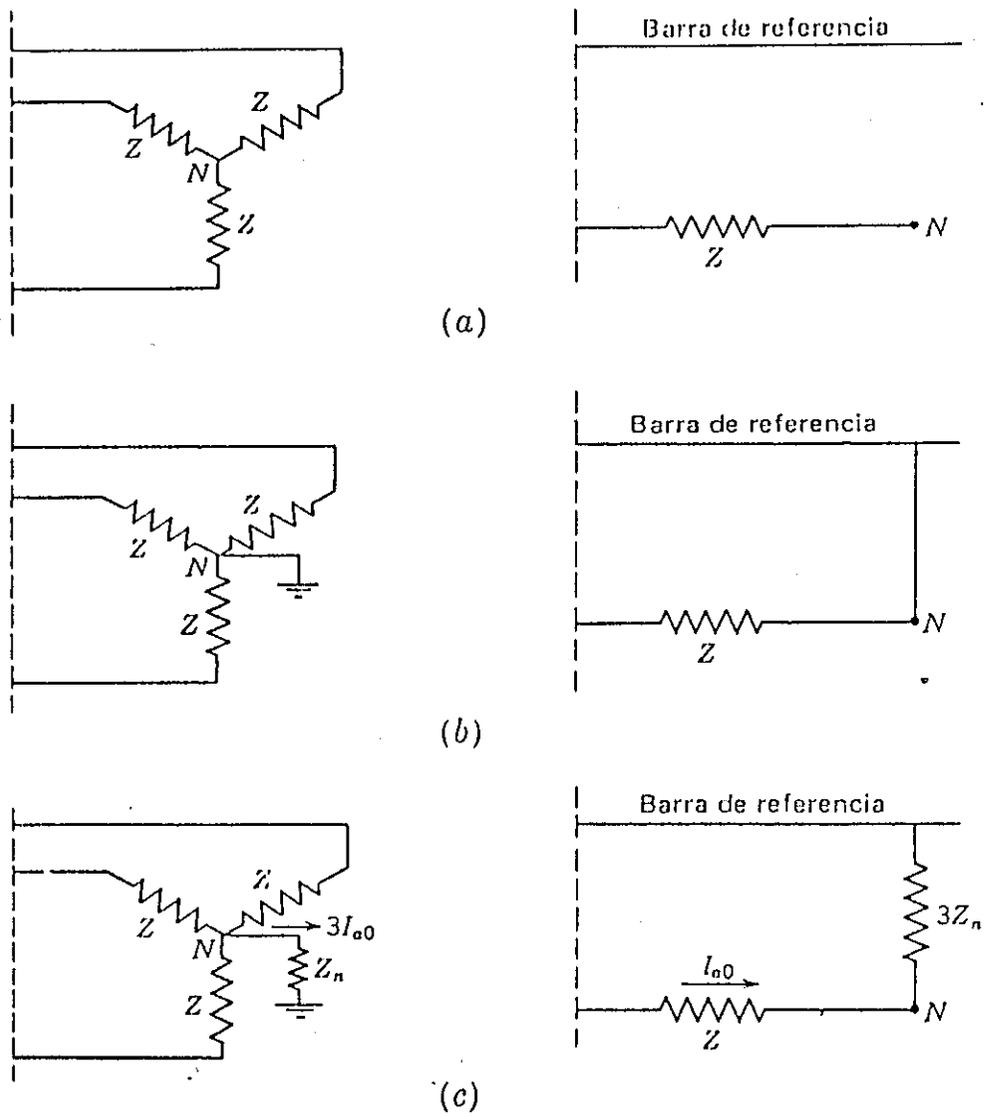


Fig.25 Redes de secuencia cero para carga conectadas en estrella.

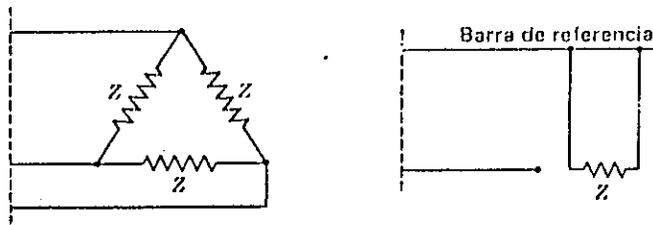


Fig. 2.6 Red de secuencia cero para una carga conectada en delta.

2.5 FALLOS ASIMÉTRICOS

Es común que este tipo de fallos se presenten en sistemas de energía, se pueden producir fallos asimétricos a través de impedancias, conductores abiertos o cortocircuitos asimétricos; entre esta clase de fallos, tenemos fallos de línea-tierra, de línea a línea o de doble línea a tierra. Se presenta un fallo asimétrico, si se rompe uno o dos conductores o si los dispositivos de protección no abren simultáneamente las tres líneas del sistema. Un fallo asimétrico origina corrientes desequilibradas que circulan por el sistema, por lo tanto, es de suma importancia la utilización del método de componentes simétricos para determinar corrientes y tensiones en el sistema cuando se presene un fallo asimétrico.

2.6 FALLOS ASIMÉTRICOS EN SISTEMAS DE POTENCIA

La figura No.2.8 muestra las tres líneas de un sistema trifásico de potencia en donde se presenta un fallo. La figura No. 2.9 muestra un diagrama unifilar de un sistema de potencia trifásico y las redes de secuencia positiva, negativa y cero. Cada red con su respectivo circuito equivalente de Thévenin, cuando se presenta un fallo en el punto "p".

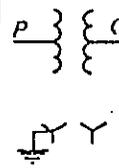
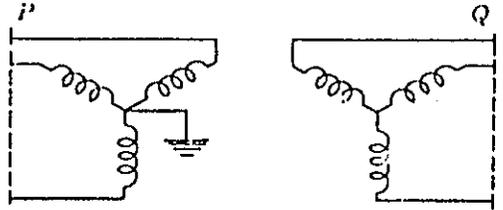
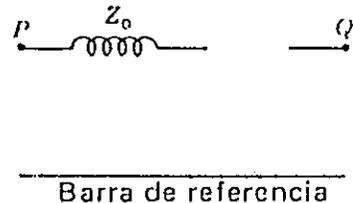
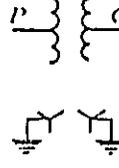
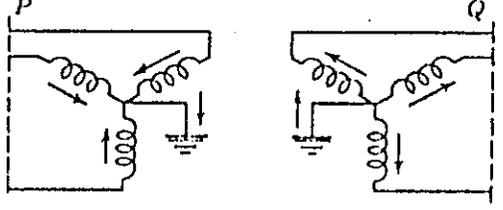
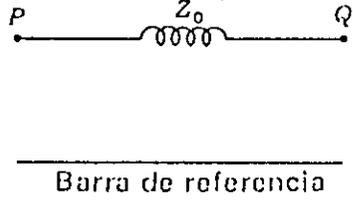
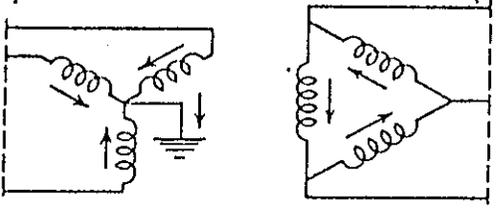
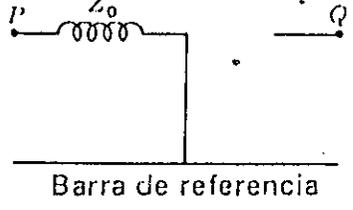
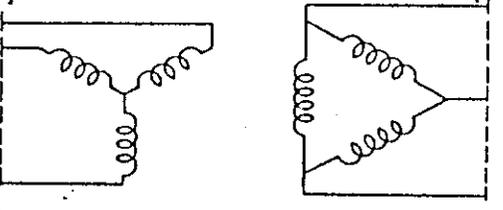
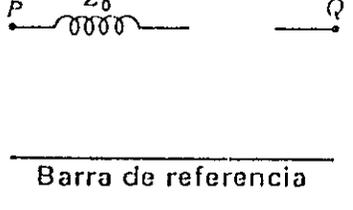
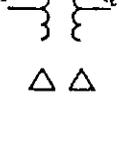
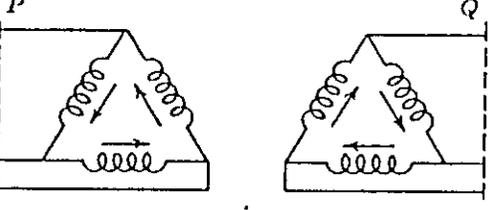
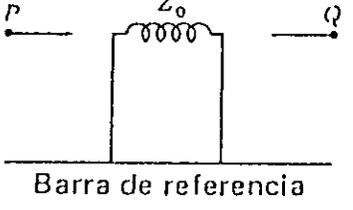
SIMBOLOS	ESQUEMAS DE CONEXIONES	CIRCUITOS EQUIVALENTES DE SECUENCIA CERO
		 <p style="text-align: center;">Barra de referencia</p>
		 <p style="text-align: center;">Barra de referencia</p>
		 <p style="text-align: center;">Barra de referencia</p>
		 <p style="text-align: center;">Barra de referencia</p>
		 <p style="text-align: center;">Barra de referencia</p>

Fig.2.7 Esquema de conexión, símbolos y circuitos equivalentes de secuencia cero de transformadores trifásicos.

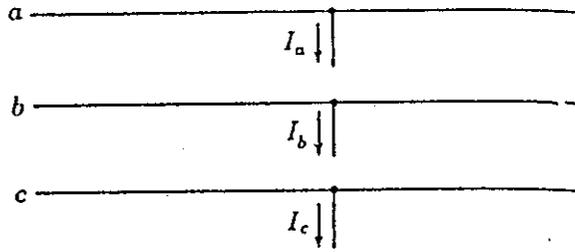


Fig. 2.8 Conductores de un sistema trifásico cuyas varillas portadoras de corriente pueden ser interconectadas para representar los diferentes tipos de fallos.

Para la red de secuencia positiva, la tensión del generador equivalente a la reducción en paralelo de los dos generadores originales, en la figura No.2.9 se denomina tensión de "prefallo" y se designa como V_f . Como antes del fallo no existen corrientes de secuencia negativa y cero, entonces dicha tensión de prefallo entre el punto "p" y la barra de referencia es cero, tanto en las redes de secuencia negativa como en las de secuencia cero, razón por la cual no aparecen fuerzas electromotrices en los diagramas equivalentes de Thévenin de dichas redes.

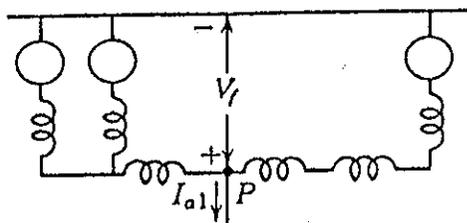
Escribiendo las ecuaciones 2.17, 2.18 y 2.19 en forma matricial y sustituyendo E_a por V_f se obtienen las ecuaciones que sirven de base para el cálculo por componentes simétricos de fallos asimétricos en sistemas eléctricos de potencia.

$$\begin{matrix} V_{a_0} = \\ V_{a_1} = \\ V_{a_2} = \end{matrix} \begin{bmatrix} 0 \\ V_f \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a_0} \\ I_{a_1} \\ I_{a_2} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

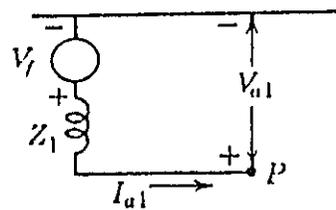
Para un **fallo de simple línea a tierra** las redes de secuencia se conectan en serie con respecto al punto de falla "p", para un **fallo de línea a línea**, las redes de secuencia se conectan en paralelo con respecto al punto de falla "p" al igual que para un **fallo de doble línea a tierra**, ver Fig. No.2.10.



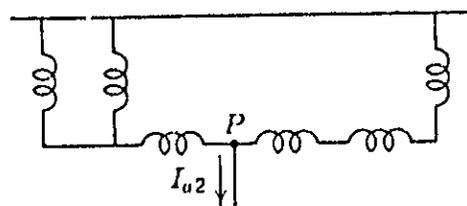
(a) Diagrama unifilar de un sistema trifásico equilibrado



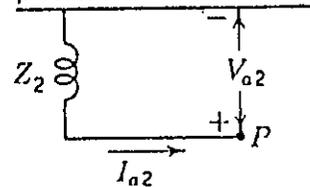
(b) Red de secuencia positiva.



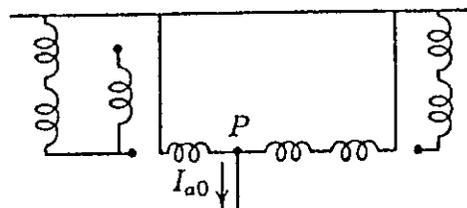
(c) Equivalente Thévenin de la red de secuencia positiva.



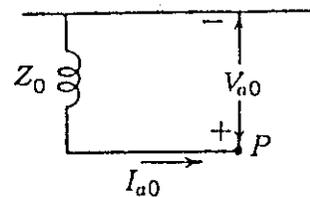
(d) Red de secuencia negativa



(e) Equivalente Thévenin de la red de secuencia negativa

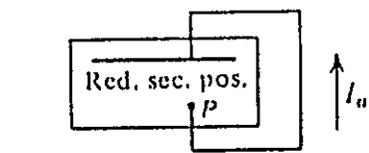


(f) Red de secuencia cero

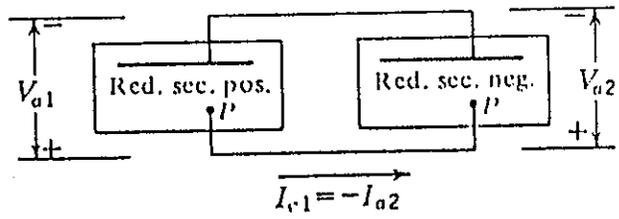


(g) Equivalente Thévenin de la red de secuencia cero

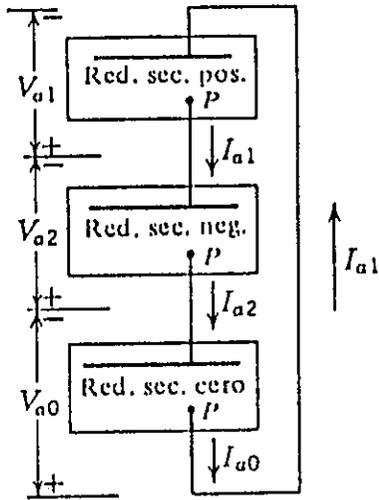
Fig.2.9 Redes de secuencia, circuitos equivalentes de Thévenin y diagrama unifilar de un sistema trifásico



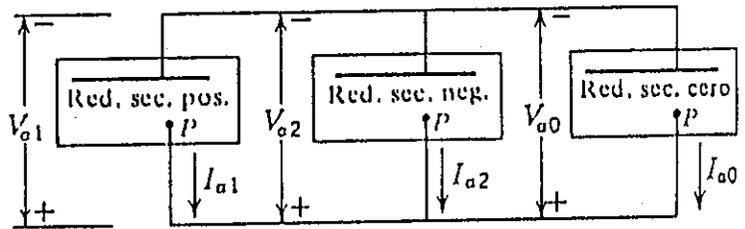
Fallo trifásico



Fallo de línea a línea



Fallo de simple línea a tierra



Fallo de doble línea a tierra

Fig.2.10 Simulación de varios tipos de fallas.

3. ANÁLISIS DE CORRIENTES DE NEUTRO

3.1 ANÁLISIS DE CORRIENTES DE NEUTRO EN SISTEMAS ELÉCTRICOS ATERRIZADOS Y NO ATERRIZADOS

Uno de los objetivos de un sistema de protección, es prevenir los efectos ocasionados por las fallas, lo que se logra mediante el apropiado diseño, instalación, operación y mantenimiento del equipo eléctrico y los sistemas de protección. Aún considerando lo anterior, existirá alguna probabilidad de falla debido a accidentes o fallas de aislamiento en cualquier instalación eléctrica y es por ello que la protección debe ser instalada con seguridad para aislar las fallas que puedan ocurrir.

Para una protección confiable de una falla a tierra de un sistema eléctrico, se requiere de un diseño coordinado, de una instalación apropiada y de una rutina de mantenimiento del siguiente equipo:

1. Equipo de protección eléctrico
2. Sistema de puesta a tierra
3. Puesta a tierra de gabinetes de los equipos.

1.- Equipo de protección eléctrico: Existen diferentes tipos de protección que son satisfactorios para la protección de una falla a tierra, algunos tipos comúnmente empleados son: fusibles, interruptores automáticos con relevadores de disparo, interruptores termomagnéticos y equipo de interrupción del sistema eléctrico activado por dispositivos detectores de corrientes de falla a tierra, etc. La selección y aplicación del equipo de protección eléctrico requiere un análisis detallado de cada sistema y circuito que va a ser protegido, incluyendo los arreglos de puesta a tierra de los elementos involucrados del sistema.

2.- Sistemas de puesta a tierra: Para aterrizar un sistema existen varias formas, entre las que se encuentran:

- **Con el neutral conectado a tierra:** Un conductor conecta el neutral del sistema a los electrodos de tierra.

- **Resistencia a tierra:** Una resistencia se conecta entre el conductor neutral del sistema y los electrodos de tierra.
- **Sin conexión a tierra:** Ninguno de los conductores del sistema trifásico (neutro aislado o flotante) es intencionalmente puesto a tierra.
- **Reactancia a tierra:** ver sección 4.4

3.- Puesta a tierra de gabinetes de los equipos: La puesta a tierra de los equipos, es la conexión simultánea de todos los gabinetes conductivos con los conductores de puesta a tierra. Estos conductores de puesta a tierra del equipo se requieren para que vayan conjuntamente con los conductores del circuito y provean un camino permanente de baja impedancia para la corriente de falla a tierra. En los sistemas con neutro conectado a tierra, los conductores de puesta a tierra del equipo están conectados al neutro del circuito y al sistema de conductores a tierra en puntos específicos, como se muestra en las figuras No. 3.1 y 3.2, páginas 23 y 24.

Los sistemas y sus conductores son puestos a tierra para limitar los voltajes debidos a descargas electroatmosféricas, sobretensiones de línea o contacto involuntario con líneas de alto voltaje y para estabilizar el voltaje a tierra en condiciones de operación normal. Los sistemas y sus conductores son sólidamente conectados a tierra para facilitar la operación de los dispositivos de protección por sobrecorriente, en caso de fallas a tierra.

Los conductores y electrodos de tierra que conectan los electrodos al neutro del sistema, no intentan conducir las corrientes de falla a tierra debidas a fallas en el equipo, canaletas o cualquier otro gabinete o caja que contenga conductores. En sistemas conectados sólidamente a tierra, la corriente de falla a tierra circula a través de los conductores de puesta a tierra del equipo desde un punto cualquiera en el sistema al punto de conexión entre ellos y el conductor de tierra del sistema como se ilustra en las figuras No.3.2 y 3.3. En sistemas de suministro de energía conectados sólidamente a tierra, la corriente de falla a tierra completa su recorrido a través de la conexión que existe entre el equipo de protección y el conductor aterrizado del sistema hacia el transformador de suministro, como se muestra en la figura No. 3.1.

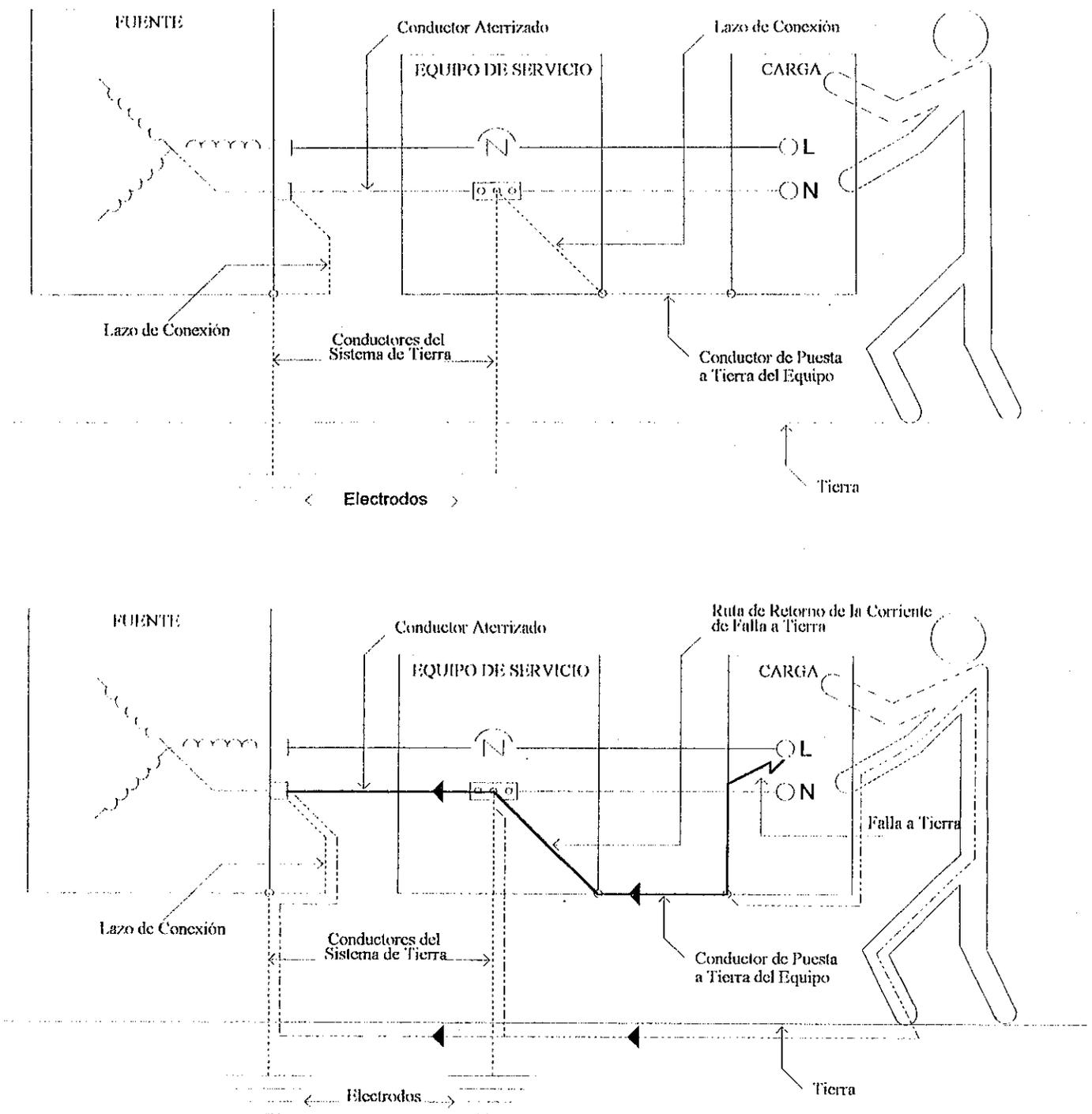


Fig. 3.1 Sistema y equipo de tierra para un aterrizaje sólido y conductor de puesta a tierra del equipo.

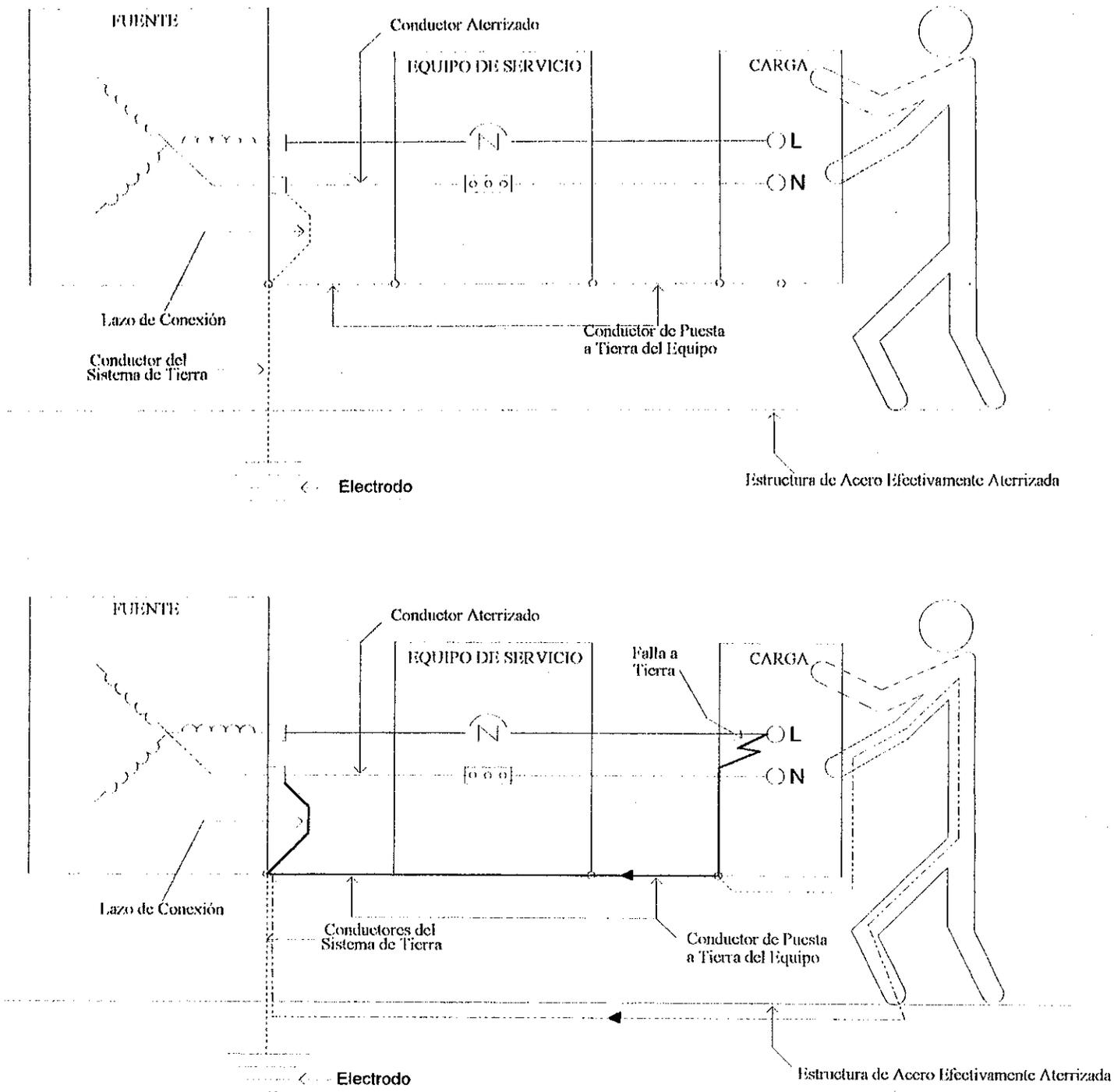


Fig. 3.2 Sistema y equipo de tierra para un aterrizaje sólido con circuito en derivación separado.

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central

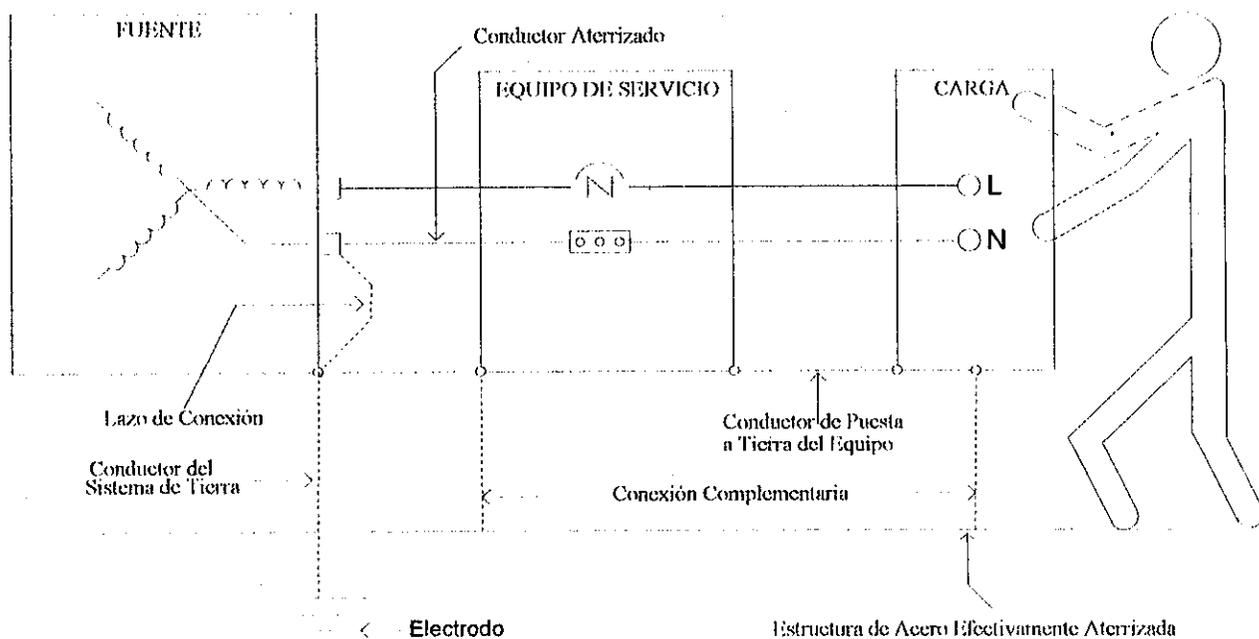


Fig. 3.3 Equipo complementario, consistente en conexión de cada gabinete al sistema de tierra.

Como puede observarse en las figuras presentadas, estamos hablando de un sistema de servicio suministrado y de un sistema en derivación separado, cada uno de ellos tiene sus fortalezas y debilidades como sistema, a continuación se hará una descripción breve de ellas.

Por ejemplo, en un sistema en derivación separado que no tenga equipo complementario de aterrizaje, puede darse el caso de que al presentarse una falla a tierra, la persona en contacto con algunos de los paneles no aterrizados sufra una descarga eléctrica.

Por existir más puestas a tierra en un sistema de servicio suministrado, se tienen más trayectorias para el flujo de corriente al momento de una falla, fenómeno que no se presenta en el sistema en derivación separada, a menos de que se utilice conexiones complementarias.

Los sistemas de puesta a tierra consistentes de redes interconectadas de los conductores de puesta a tierra de los gabinetes del equipo, desarrollan las siguientes funciones básicas:

1. Limitar en casos de fallas a tierra, el voltaje a tierra (voltaje de electrocución) en las partes metálicas expuestas no portadoras de corriente del equipo, canalización u otros gabinetes conductores.
2. Conducir con seguridad las corrientes de falla a tierra cuyas magnitudes permitan una rápida operación de los dispositivos de protección del circuito.

Con el fin de asegurar el cumplimiento de las funciones básicas mencionadas los conductores de puesta a tierra del equipo deben:

- a. Ser permanentes y continuos
- b. Tener suficiente capacidad para conducir con seguridad cualquier corriente de falla probable a que sean sometidos
- c. Mantener una impedancia suficientemente baja para limitar el voltaje a tierra a una magnitud segura y facilitar la operación de los dispositivos de protección del sistema.

Como se ilustra en las figuras No. 3.1 y 3.2, una persona que toca una caja conductiva en la cual se da una falla a tierra será protegida de una lesión eléctrica si los conductores de puesta a tierra del equipo, proveen un camino en derivación de suficiente baja impedancia para limitar la corriente a través del cuerpo de la persona a una magnitud segura. En los sistemas sólidamente conectados a tierra, la corriente de falla activa los dispositivos de protección del circuito para desenergizar automáticamente un circuito con falla y eliminar el riesgo de electrocución.

La misma disposición de los conductores de puesta a tierra del equipo deben ser proveídos para sistemas con neutro conectado a tierra, sistemas de tierra de alta resistencia y sistemas sin conexión a tierra. Esta disposición de los conductores de puesta a tierra, se requieren en los últimos dos sistemas descritos, para dar protección contra electrocución y para presentar un camino de baja impedancia para corrientes de falla de fase a fase, en el caso de que la primera falla a tierra no sea localizada y eliminada antes de que otra falla a tierra ocurra en una fase diferente del sistema.

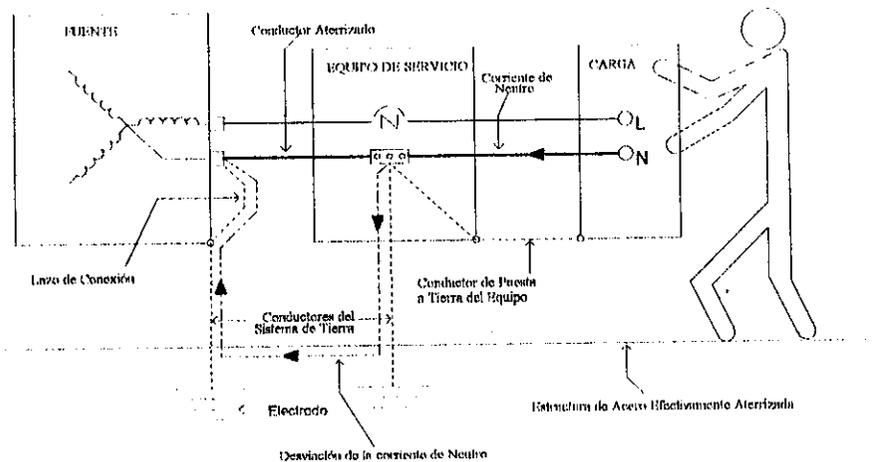


Fig. 3.4 Desviación de la corriente de neutro debido a los múltiples aterrizajes (del conductor de servicio de tierra) del sistema.

Los conductores de tierra del sistema y del equipo deben ser instalados y conectados del tal forma que puedan prevenir el flujo de una corriente indeseable a través de los conductores de tierra. A estas corrientes se les denomina ****corrientes indeseables a través de los conductores de tierra****.

Si el conductor de puesta a tierra (neutral) se conecta a los conductores de puesta a tierra del equipo en más de un punto, se establecerán trayectorias para las corrientes de neutro (ver figura 3.4). Estas corrientes neutrales desviadas que fluyen durante la operación normal del sistema por otros caminos que los destinados para los conductores de tierra (neutral) serán inconvenientes si ellas contribuyen con lo siguiente:

- a. Interferencia con la operación de dispositivos o sistemas que son sensibles a interferencia magnética, tales como: equipo electrónico, sistemas de comunicación, computación, etc.
- b. Interferencia con la apropiada detección y operación del equipo de protección de falla a tierra, por ejemplo, disparos innecesarios de protecciones de falla a tierra debida a estas corrientes indeseables
- c. Arcos de suficiente energía como para iniciar la ignición de materiales inflamables, por ejemplo, los producidos por falsos contactos de las puestas a tierra
- d. Detonación de explosivos durante su producción, almacenamiento o pruebas
- e. Sobrecalentamiento debido al calor generado en las canaletas, etc., como resultado de corrientes neutrales desviadas.

El conductor de puesta a tierra del transformador de suministro debe ser también aterrizado en el equipo de protección. Si el transformador está ubicado fuera del edificio, el conductor de puesta a tierra del sistema debe también ser conectado a tierra en el lado secundario del transformador de servicio, ya sea en el transformador o en algún lugar adelante del equipo de protección. Cualquier conductor neutral debe ser conectado a tierra en el lado de carga de los medios de desconexión del servicio.

La corriente neutral que se desvía y que se ilustra en la figura No. 3.4, se debe a múltiples conexiones a tierra del conductor de puesta a tierra del sistema. Donde exista una sola bajada del cableado de servicio conectada a un sólo juego de conductores de servicio, la corriente neutral desviada mostrada en la figura No.4, será normalmente de una magnitud insuficiente para ser considerada.

Las corrientes neutrales que se desvían y que son indeseables, son causadas frecuentemente por fallas de neutro a tierra no intencionales, como se muestra en la figura No. 3.5. Es decir que en el circuito existen otras trayectorias cerradas por las que puede fluir la corriente y no son precisamente las trayectorias por las que se tenía la intención de que fluyera una corriente de falla. Si hay corrientes neutrales que se desvían, debe sospecharse que existen fallas de neutro a tierra aunque éstas sean difíciles de localizar. Solamente se puede suponer que existen estas corrientes, por los efectos que producen.

Donde no se requiere alimentar cargas de fase a neutro, hay una tendencia creciente hacia la puesta a tierra a través de una resistencia alta para 400 y 600V en sistemas trifásicos de establecimientos industriales. Los sistemas de puesta a tierra que usan una alta resistencia, combina algunas de las ventajas de los sistemas sólidamente conectados a tierra y de los no conectados a tierra.

La corriente de falla a tierra es limitada por la resistencia de puesta a tierra, a una magnitud que permita la operación continua de un sistema, mientras la falla a tierra es localizada y removida. Sin embargo, si una falla a tierra no es localizada y removida antes de que ocurra otra falla a tierra en otra fase del sistema, la gran magnitud de la corriente de falla de fase a fase, circulará a través de los conductores de puesta a tierra del equipo y activará el equipo de protección del sistema eléctrico.

La probabilidad de que una segunda falla de fase a tierra se presente, depende de la magnitud de la corriente de fase a tierra original y de las condiciones físicas de la instalación, la incidencia de esta situación es el disparo de las protecciones del sistema.

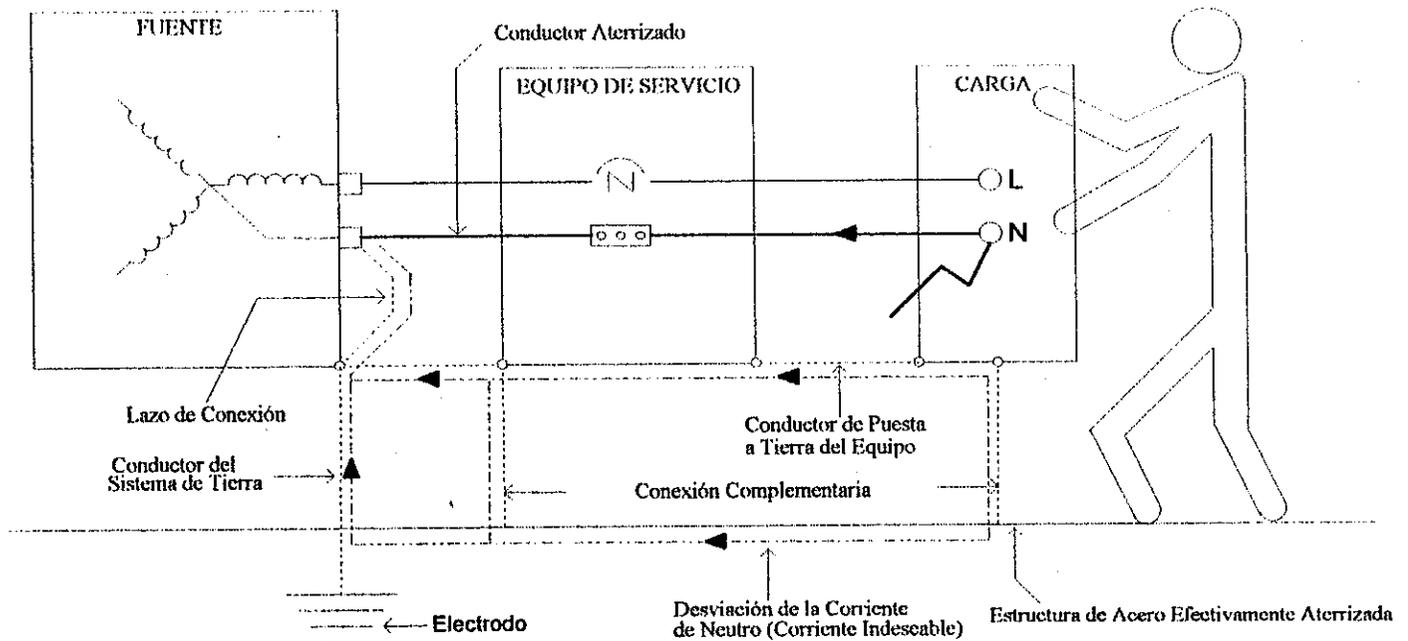


Fig. 3.5 Desviación de la corriente de neutro debido al aterrizaje no intencional de un conductor aterrizado.

Donde los conductores, canaletas y blindaje de cables son usados como puesta a tierra del equipo, todas las juntas y conexiones, deben estar apretadas para proveer un camino adecuado de conducción para las corrientes de falla a tierra. En circuitos que tengan conductores en paralelo en ductos múltiples, donde se use alambrado de cobre o aluminio como conductores de puesta a tierra del equipo, un equipo de conductores de puesta a tierra debe instalarse en cada conducto, ya que cada circuito debe tener su propio equipo de aterrizaje y no utilizar equipo suplementario, como estructuras metálicas o propiamente la tierra. El tamaño de cada conductor de puesta a tierra del equipo en paralelo es una función del rango de la protección de sobrecorriente del circuito.

Las conexiones básicas de puesta a tierra para sistemas derivados separadamente y de servicio suministrado con conexión sólidamente a tierra son ilustradas en la figura No. 3.6.

Los requerimientos de puesta a tierra para sistemas derivados separadamente y de servicio son similares pero hay tres diferencias importantes:

- Los conductores del sistema de puesta a tierra para un sistema derivado separadamente, deben ir conectados a tierra en un solo punto. El único punto de puesta a tierra podrá estar en la fuente del sistema derivado separadamente o delante de cualquier medio de desconexión del sistema o dispositivo de sobrecorriente. Si el medio principal de desconexión del sistema está cercano al generador o al transformador de suministro para un sistema derivado separadamente, la conexión de aterrizaje del conductor de puesta a tierra del sistema (neutral), podrá ser hecha en o adelante del medio de desconexión del sistema. El conductor de puesta a tierra del sistema para un servicio suministrado, debe ser puesto a tierra en el equipo de protección y en cualquier lugar en el secundario del transformador que suministra el servicio, si el transformador de suministro no está en el mismo edificio que el equipo de protección.

Los aterrizajes deben realizarse en la manera descrita, porque en un sistema de servicio suministrado el usuario no tiene acceso a la fuente de energía, de tal manera que el aterrizaje del equipo de protección garantiza una referencia a tierra para su instalación.

- El electrodo preferido de puesta a tierra para un sistema derivado separadamente es la estructura metálica más cercana, conectada efectivamente a tierra, que sea parte de la estructura más cercana de la tubería metálica de agua conectada efectivamente a tierra (esto es para sistemas eléctricos como máximo de 1000v), considerando que este método de aterrizaje ya no se utiliza, se recomienda hacer una red de tierra. El sistema de electrodos de puesta a tierra para un sistema de servicio suministrado debe ser de acuerdo con requerimientos de códigos establecidos, ver norma IEEE Std. 142-1972, Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems.
- En sistemas derivados separadamente sólidamente conectados a tierra, los conductores de puesta a tierra deben estar conectados al conductor de puesta a tierra del sistema y al conductor de electrodo de puesta a tierra, en o adelante, de los medios principales de desconexión del sistema o en el dispositivo de sobrecorriente. El conductor de puesta a tierra del equipo debe estar siempre conectado a la carcasa del transformador de suministro o del generador como se ilustra en la figura No. 3.6.

El conductor de puesta a tierra (neutral) puede usarse para conectar a tierra las partes metálicas del equipo no portadoras de corriente en el lado del suministro del medio de desconexión del servicio y puede servir también como el camino de retorno para la corriente de falla a tierra, desde el equipo de protección hasta el transformador de suministro. En los sistemas de servicio sólidamente conectados a tierra, los conductores de puesta a tierra del equipo deben conectarse al conductor del sistema de puesta a tierra y al conductor del electrodo de puesta a tierra del equipo de protección.

Un conductor de puesta a tierra (neutral) del circuito se permite que sea conectado sólidamente a tierra en la transferencia (no conmutado) del sistema. De aquí que se permita que un conductor de neutro sea interconectado sólidamente entre una fuente normal de servicio suministrado y un generador local, el cual sirve como una fuente de emergencia o de reserva. Ver figura No. 3.7.

El aterrizaje del neutro del generador mostrado en la figura No. 3.7 no debe hacerse, ya que no es recomendable aterrizar el neutro en el lado de la carga del medio de desconexión del servicio. Las múltiples puestas a tierra del neutro del circuito pueden causar indeseables corrientes neutrales que se desvían y pueden provocar que la corriente de falla a tierra fluya en caminos que puedan afectar desfavorablemente la operación del equipo de protección de falla a tierra.

En la figura No. 3.8, el aterrizaje del neutro del generador en cuestión, completa un camino conductivo para corrientes neutrales desviadas. La magnitud de esta corriente será una función de las impedancias relativas de los caminos de las corrientes de neutro y cuando el medio de desconexión del servicio esté provisto de protección de falla a tierra, esta corriente neutral desviada, puede afectar desfavorablemente la operación del equipo de protección de falla a tierra.

Donde la protección de falla a tierra es aplicada al alimentador desde un equipo de protección para una transferencia, la corriente de falla a tierra ilustrada en la figura No. 3.9, no podrá ser detectada con exactitud por un sensor de corriente de falla a tierra de secuencia cero del alimentador, además, las conexiones múltiples de puesta a tierra del neutro sólidamente interconectado,

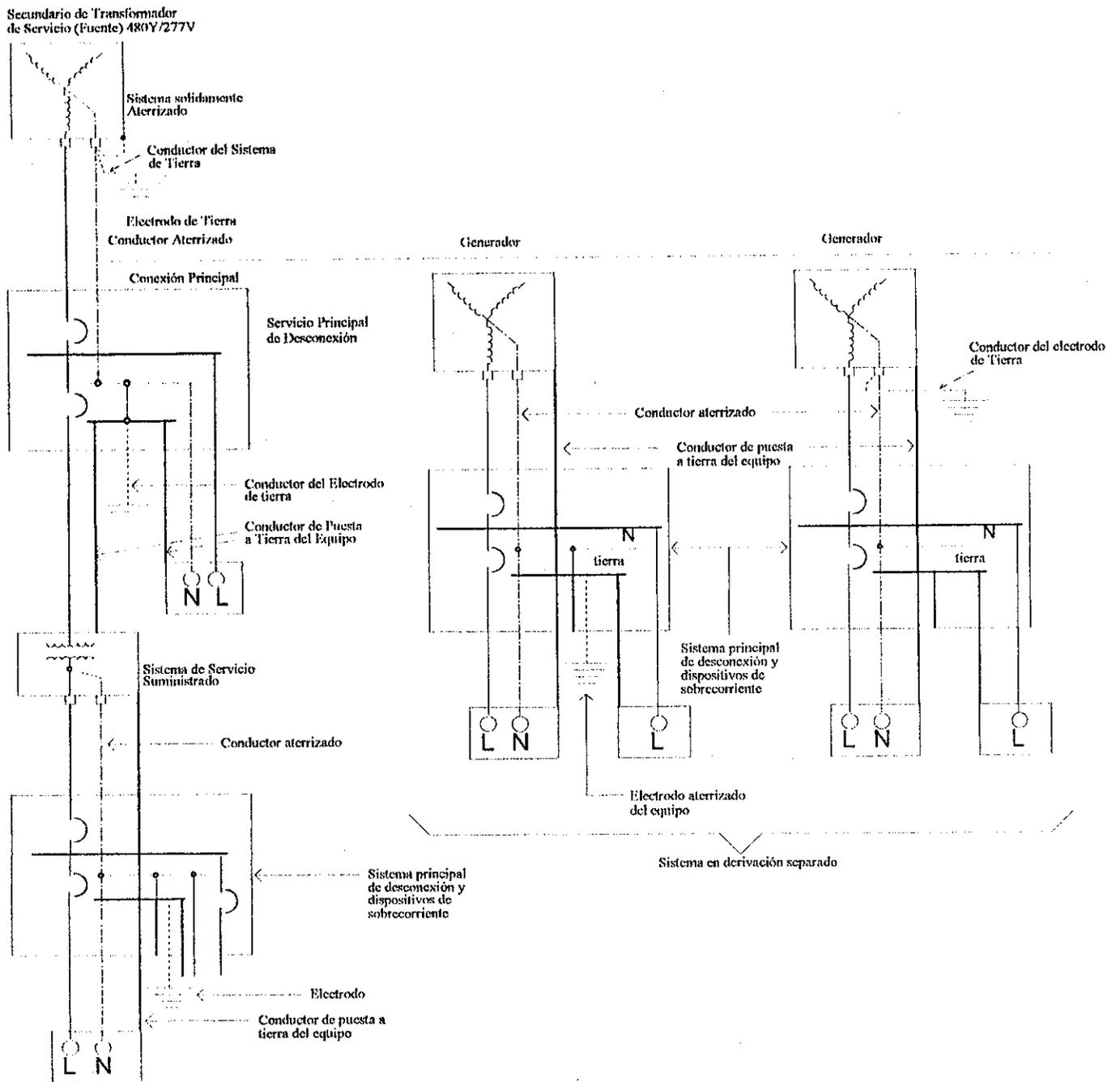


Fig. 3.6 Sistema y equipo de tierra para un sistema en derivación separado y servicio suministrado.

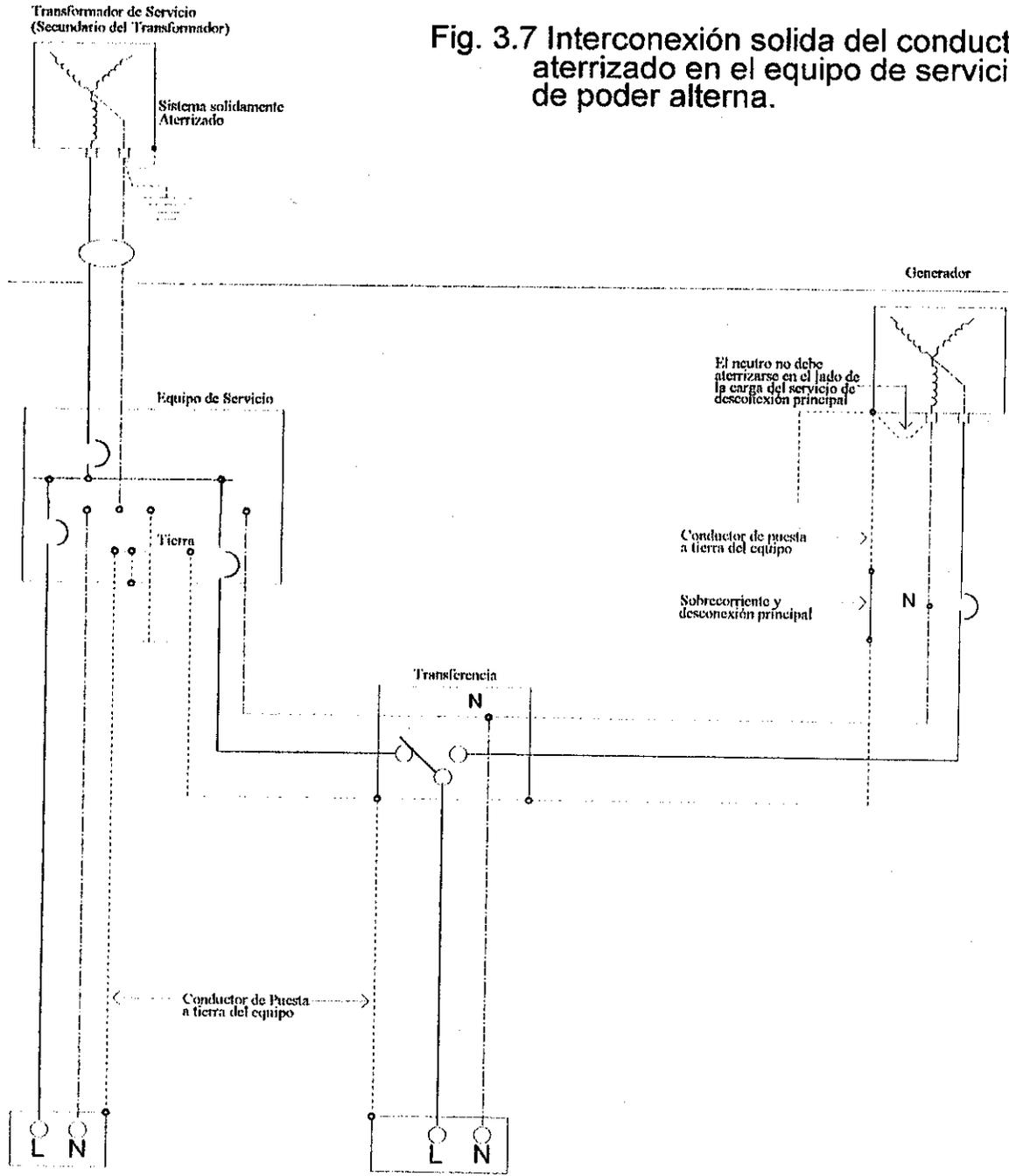


Fig. 3.7 Interconexión solida del conductor de neutro aterrizado en el equipo de servicio y fuente de poder alterna.

Transformador de Servicio
(Secundario del Transformador)

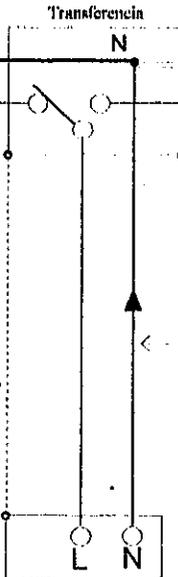
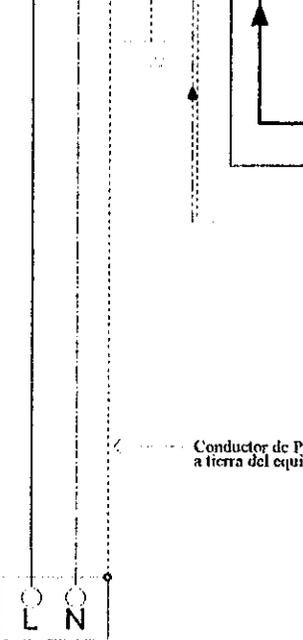
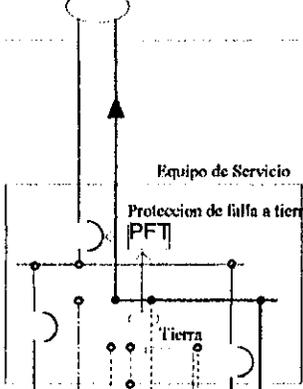
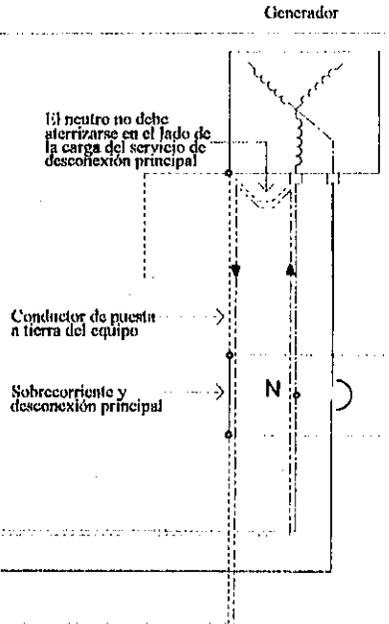


Fig. 3.8 Desviación de la corriente de neutro debido al aterrizaje del conductor de neutro en dos lugares.



Desviación de la corriente de neutro

Corriente normal de neutro

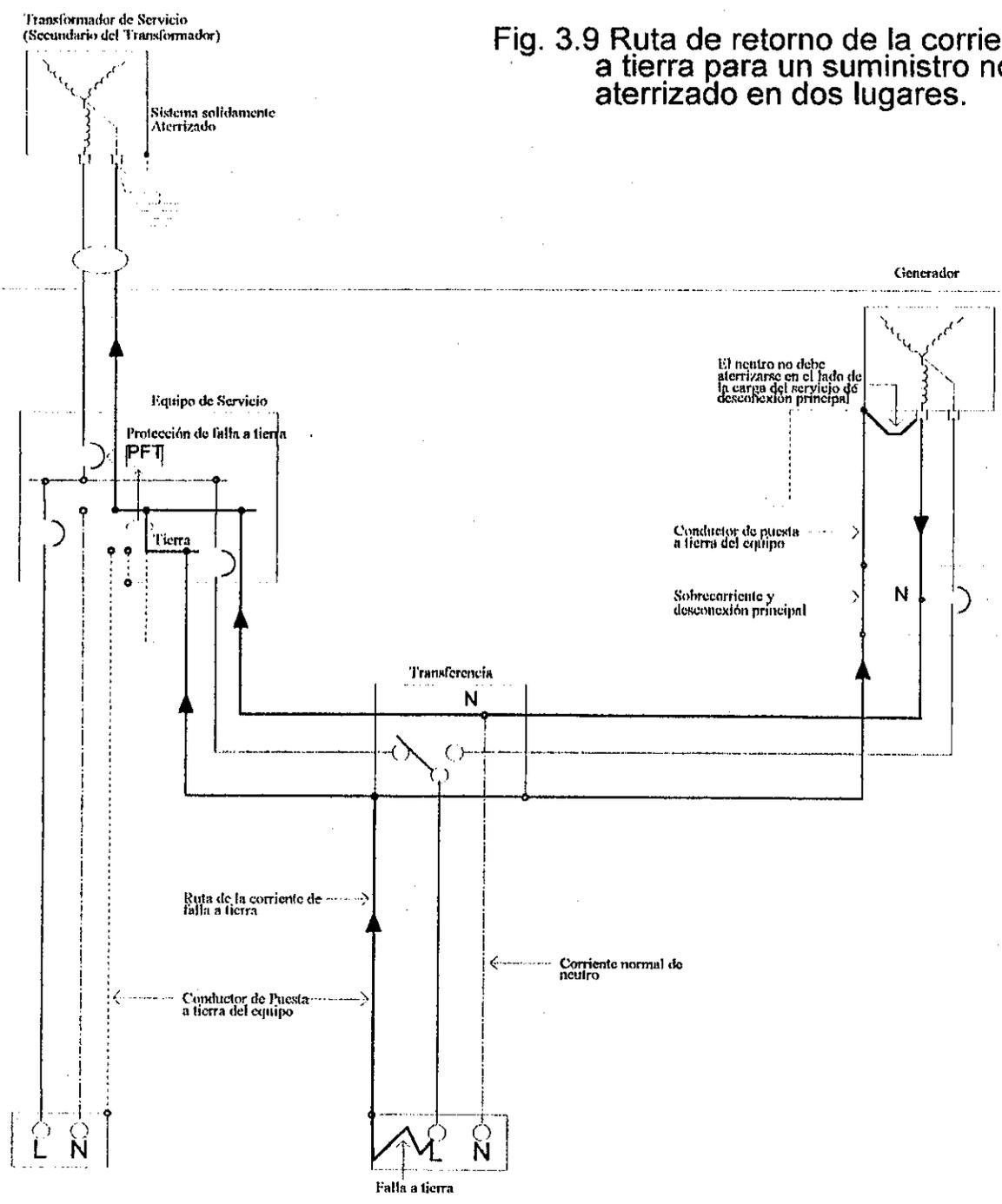


Fig. 3.9 Ruta de retorno de la corriente de falla a tierra para un suministro normal de neutro aterrizado en dos lugares.

permiten a una porción de la corriente de falla a tierra retornar a la fuente, fluyendo a través de la conexión a tierra del neutro del generador en cuestión y no ser detectada por el sensor de protección de falla a tierra en el equipo de protección. El medio principal de desconexión del servicio no se supone que se dispare por una falla a tierra en un circuito alimentador o ramal, así que éste no es un problema serio si el alimentador al conmutador de transferencia no tiene equipo de protección de falla a tierra que pueda ser activado.

En la figura No.3.10, las conexiones múltiples de puesta a tierra del neutral sólidamente interconectado, permiten que una porción de la corriente de falla a tierra retorne al generador para pasar a través del sensor de la protección de falla a tierra del equipo en servicio. Este arreglo puede resultar en un disparo del medio de desconexión del servicio por la alimentación de corriente de falla a tierra del lado del generador.

3.2 ANÁLISIS DE SOBREVOLTAJES EN SISTEMAS ELÉCTRICOS ATERRIZADOS Y NO ATERRIZADOS

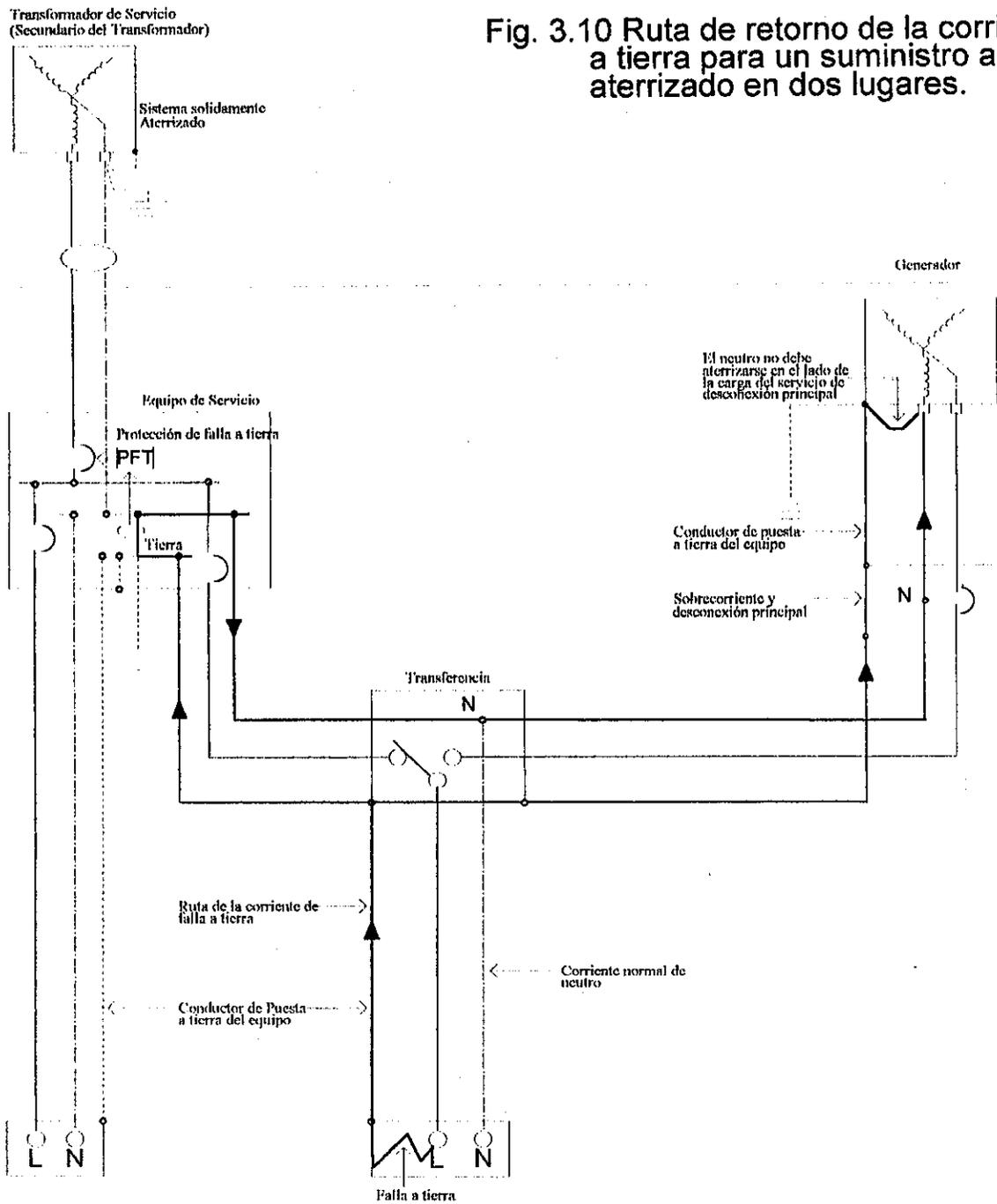
3.2.1 SOBREVOLTAJES DEL SISTEMA, causas y medidas de protección

El aislamiento eléctrico en sistemas energizados está continuamente bajo esfuerzos. Para hacer el uso más económico del aislamiento, los sobrevoltajes de operación deberán ser reprimidos lo más razonablemente rápido posible. La aplicación de aislamiento adicional para aceptar niveles más altos de sobrevoltaje ocasiona varias desventajas obvias: (1) incremento de costos (2) incremento de tamaño y peso (3) incremento de resistencia al flujo de calor de los conductores portadores de la corriente.

En el caso de un sistema de corriente alterna, el potencial eléctrico está variando substancialmente como un onda senoidal. La cresta de potencial podrá ser del 41% más grande que el valor RMS.

Bajo condiciones ideales, el esfuerzo de voltaje de línea a tierra, será menor que el voltaje de operación de línea a línea. En el caso de corriente directa o de corriente alterna monofásica, este voltaje ideal de línea a tierra deberá ser $E_{ll}/2$ o el 50% del valor de voltaje de línea a línea. Por ejemplo, en el caso de un sistema de corriente alterna trifásico conectado en estrella

Fig. 3.10 Ruta de retorno de la corriente de falla a tierra para un suministro alterno, y neutro aterrizado en dos lugares.



aterrizada, este voltaje ideal deberá ser $E_{ff}/\sqrt{3}$ o el 58% del valor de voltaje de línea a línea. Los sobrevoltajes generalmente son expresados como múltiplos de los esfuerzos de voltaje balanceados e ideales de sistemas trifásicos.

Los sistemas eléctricos están sujetos a diversos tipos de disturbios, los cuáles inevitablemente producen sobrevoltajes. Sin embargo, el ingeniero de campo tiene en su dominio diversos principios de diseño de sistemas, los cuales reprimirán grandemente la magnitud de los sobrevoltajes. Es importante mostrar que los sistemas de corriente alterna están sujetos a diversos tipos de sobrevoltaje que no se encuentran en sistemas de corriente directa, por consiguiente los sistemas de corriente alterna requieren de cuidadosas consideraciones en cuanto al problema de los sobrevoltajes.

El aislamiento eléctrico presenta el efecto de fatiga. El aislamiento podrá fallar, si éste se somete a repetidos o prolongados esfuerzos de voltaje, el cuál está lejos de estar por debajo de la habilidad de resistir un impulso individual. Uno puede concluir que una reducción ya sea en la duración o en la magnitud del esfuerzo de sobrevoltaje podrá resultar en general en una vida útil más prolongada.

FUENTES DE SOBREVOLTAJE

Hay diversas fuentes de sobrevoltajes de suficiente magnitud que pueden dañar el aislamiento de un sistema de distribución de potencia de corriente alterna industrial, los cuales pueden producirse por:

1. Estática
2. Contacto físico con un voltaje de sistema alto
3. Efectos de resonancia en circuitos capacitivos-inductivos en serie
4. Cortocircuitos intermitentes repetitivos
5. Maniobras de interrupción
6. Descargas electroatmosféricas

De estos, la mayoría son resultado de los efectos directos dentro del propio sistema eléctrico.

- **ESTÁTICA**

Soplidos de arena o polvo pueden llegar a cargarse elevadamente y comunicar un relativo alto voltaje a las partes expuestas de los conductores eléctricos que se encuentren más arriba. El mover cinchos en una polea no metálica, también puede desarrollar voltajes altos por estática que pueden ser comunicados a los conductores del sistema eléctrico si las carcasas del equipo que no están debidamente aterrizadas. El porcentaje de la carga eléctrica resultante de la estática comunicada a los conductores del sistema es bastante baja. Aún mejor, una alta resistencia conectada a tierra en el sistema eléctrico descargará estas corrientes estáticas a tierra tan rápidamente como sean recibidas con sobrevoltajes despreciables. Adicional a aterrizar el sistema de servicio eléctrico, es importante que las carcasas de maquinaria eléctrica y toda celda metálica que contenga conductores de circuitos eléctricos sean efectivamente aterrizados.

- **CONTACTO FÍSICO CON UN SISTEMA DE ALTO VOLTAJE**

Si los conductores de un circuito de alto voltaje llegan a estar en contacto con aquellos de bajo voltaje, entonces en el punto de contacto existirá el mismo potencial en ambos circuitos. Si el circuito de bajo voltaje no tiene su neutro aterrizado, su potencial se incrementará al valor de alto voltaje del sistema o ocurrirá un flasheo. Si el sistema de bajo voltaje es anclado a un potencial cercano a tierra por el uso de un neutro sólidamente aterrizado, valores altos de corriente pueden fluir del sistema de alto voltaje, pero aparecerá un voltaje mucho más bajo en el sistema de bajo voltaje que cuando se tiene un sistema de neutro aislado.

Haciendo uso de celdas y barreras metálicas las cuales separan los conductores del sistema de los diferentes potenciales, se previenen los contactos accidentales entre sistemas industriales de voltaje primario y secundario. En algunos casos, circuitos superiores tienen ambos voltajes primario y secundario en el mismo polo, pero sustanciales distancias reducen al mínimo el peligro de un contacto accidental. Se han tenido cruces ocasionales entre los circuitos de bajo y alto voltaje, y en otros algunos casos, se ha sabido de fallas ocurridas entre el primario y secundario de un transformador. Lo descrito anteriormente, puede

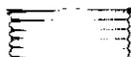
observarse en la siguiente figura No. 3.11. Este tipo de falla puede ser responsable de peligrosos sobrevoltajes en sistemas de bajo voltaje no aterrizados. La protección más efectiva contra este tipo de sobrevoltajes es aterrizar el sistema de bajo voltaje a un mínimo con una impedancia a tierra, lo suficiente para aceptar en el sistema de alto voltaje una máxima corriente de falla de línea a tierra sin influir en gran cantidad en el neutro del sistema de bajo voltaje.

- **EFFECTOS DE RESONANCIA EN CIRCUITOS INDUCTIVOS-CAPACITIVOS EN SERIE (limitados a sistemas de corriente alterna)**

Comúnmente los sistemas más sujetos a sobrevoltajes originados de estos efectos, son los sistemas de corriente alterna de neutro no aterrizado. Es importante reconocer que los sistemas de neutro no aterrizado son actualmente relacionados con aterrizajes y no independientes de éstos. Estos sistemas son no aterrizados en el sentido que no se realiza a propósito una interconexión a tierra pero cada elemento del sistema eléctrico incorpora alguna capacitancia a tierra, la cual constituye una inherente impedancia capacitiva interconectada entre los conductores del sistema eléctrico y tierra.

Cada sistema eléctrico no aterrizado contiene elementos esenciales, presentes en el diagrama mostrado en la figura No. 3.12. El comportamiento eléctrico a tierra, relativo de cualquiera de los conductores de fase puede ser determinado por el análisis de un simple circuito equivalente, como se indica en la segunda parte del diagrama de la figura No. 3.12.

En términos de este simple circuito equivalente, será posible entender rápidamente el efecto de conectar diferentes tipos de impedancia entre línea y tierra, tal como se muestra en la figura No. 3.13. Llega a ser evidente que la conexión de cualquier valor ya sea de resistencia o capacitancia entre una línea y tierra produce un sobrevoltaje no peligroso. El potencial en la fase a la cual la impedancia es conectada, progresivamente disminuye del valor normal a cero, ya que a medida que el valor de resistencia o capacitancia aumenta, la relación entre el voltaje en terminales y el voltaje generado disminuye, ver ecuaciones de la figura 3.13. El potencial a tierra de los conductores de las otras dos fases incrementarán a un valor pleno de línea a línea al mismo tiempo que el conductor



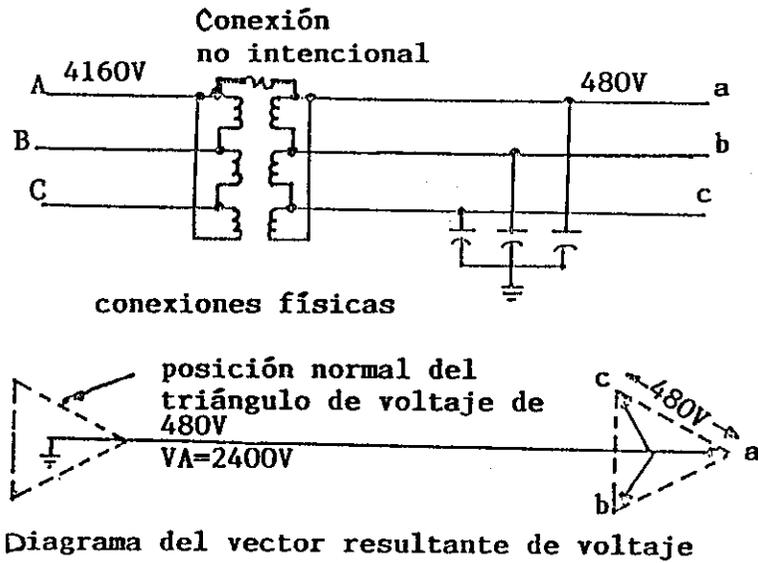


Fig. 3.11 Sobrevoltaje de un sistema no aterrizado en 480 voltios debido a un contacto con un sistema de alto voltaje.

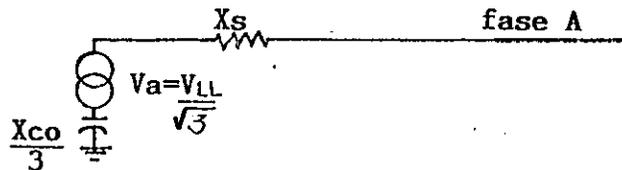
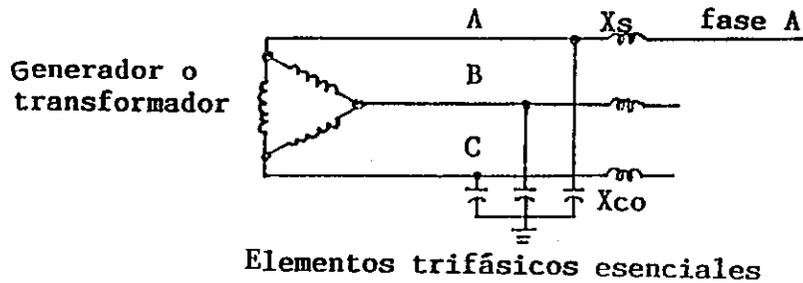


Fig. 3.12 Composición elemental de un sistema no aterrizado.

de la primera fase ha sido reducido a un potencial cero. Esto representa un sobrevoltaje de solamente un 73%, el cual no es peligrosamente elevado y el cual normalmente no producirá efectos dañinos a menos de que continúe por un período largo de tiempo.

Por otro lado, la conexión de una reactancia inductiva entre línea y tierra puede ser la responsable de la producción de serios sobrevoltajes a tierra. Es esta relación entre la reactancia inductiva de línea a tierra y la reactancia capacitiva total del sistema a tierra, la cual controla el grado de sobrevoltaje. El mayor sobrevoltaje ocurrirá cuando estas dos reactancias sean equivalentes, y en este punto, el voltaje puede llegar a ser diez veces el valor normal. Es significativo notar, sin embargo, que sobre un valor de reactancia de dos a uno, se podrán producir sobrevoltajes de tres o más veces el voltaje normal.

La conexión no intencional de una reactancia inductiva entre un conductor de fase y tierra, puede ocurrir en diferentes formas, algunas de las cuales se muestran en la figura No.3.14. La bobina magnética de operación de un contacto de arranque de un motor puede ser inadvertidamente conectado entre fase y tierra por un cortocircuito en el alambre de control, por medio de un botón eléctrico de una estación o por un accidente (desliz) con alguna herramienta de una persona de mantenimiento. En cualquier momento en que el valor de la reactancia inductiva, cae en una región de potencial de peligro indicada en la figura No.3.13, se producirán peligrosos sobrevoltajes a tierra, los cuales serán comunicados sobre todos los conductores metálicos del sistema de ese voltaje de operación.

Los sobrevoltajes originados por estas causas pueden ser completamente restringidos por una relativamente baja resistencia de tierra en el neutro del sistema eléctrico. Un resistor de tierra del mismo valor de ohmios que el total de reactancia capacitiva de carga a tierra es suficiente para eliminar casi completamente los sobrevoltajes. Resulta evidente que ésta es una buena razón para adoptar sistemas eléctricos de neutro aterrizado con un valor menor de resistencia.

La figura No. 3.13 se ha trabajado bajo la suposición de que es una reactancia inductiva lineal. Si la reactancia incorpora un núcleo de hierro el cual durante el modo de operación que se ha considerado podría toparse con una saturación magnética, el funcionamiento será diferente. Bajo estas condiciones

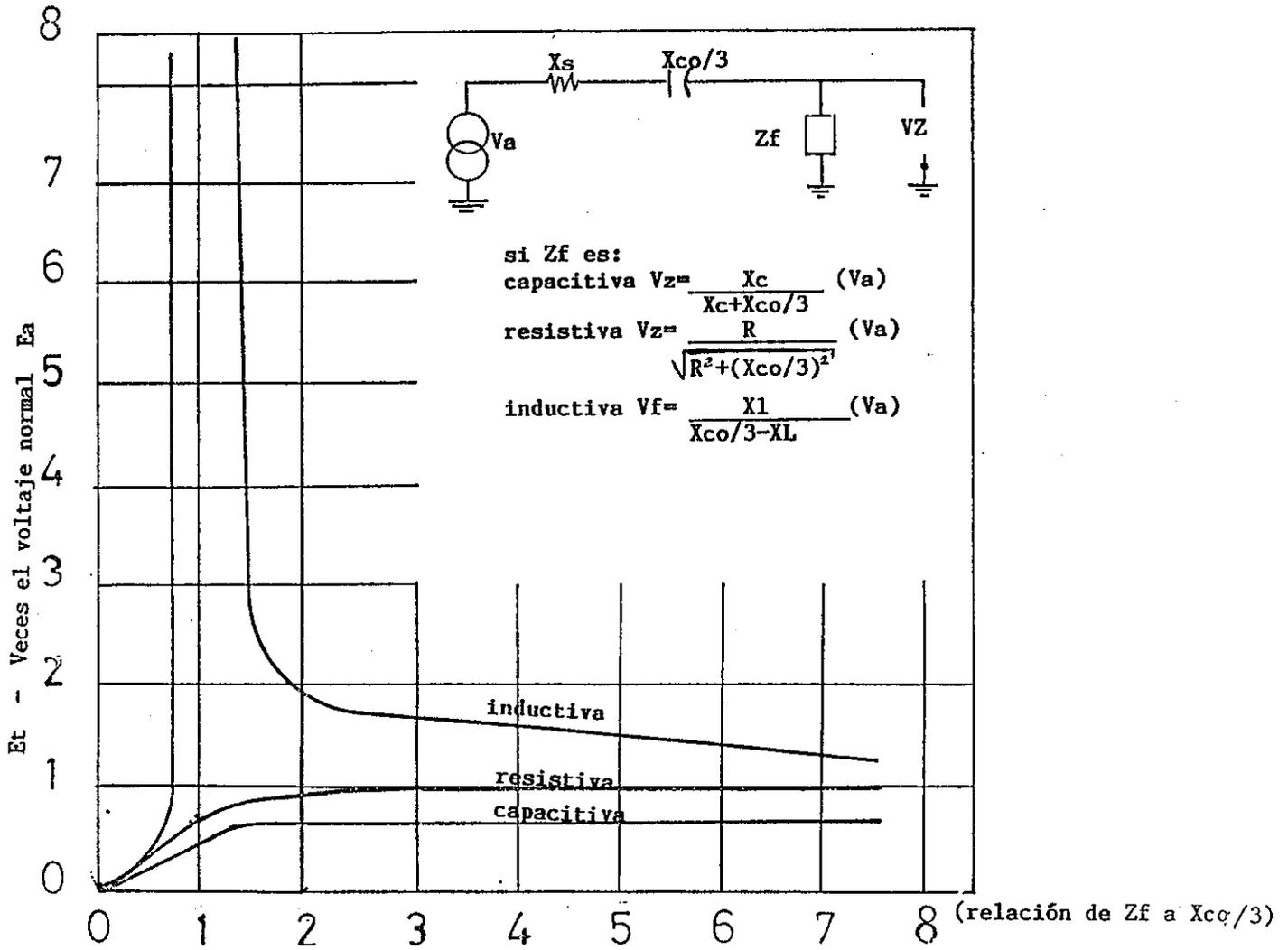


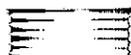
Fig. 3.13 Sobrevoltaje de un sistema no aterrizado resultantes de una alta reactancia inductiva conectada entre línea y tierra.

la reactancia efectiva del circuito inductivo puede llegar a ser más baja que la reactancia no saturada y el voltaje tendrá a oscilar automáticamente entre voltajes límites, los cuales producirán que la reactancia inductiva efectiva se iguale al valor de la reactancia capacitiva. Esta característica de operación ha sido llamada **ferroresonancia**. El máximo voltaje que desarrolla no puede ser tan elevado como el que se produciría por un reactor lineal, pero todavía en un exceso de dos a tres veces el normal. Sobrevoltajes substanciales pueden resultar por la ferroresonancia cuando la reactancia no saturada es varias veces la reactancia capacitiva a tierra.

La aplicación de transformadores de potencial conectados en estrella aterrizada, en sistemas no aterrizados con una conexión en el secundario estrella o delta abierta, pueden ser los responsables de sobrevoltajes peligrosos como un resultado de una acción de resonancia o ferroresonancia dado que la reactancia de magnetización de los transformadores de potencial llega a estar conectada de los conductores de fase a tierra. Estas oscilaciones en el voltaje del sistema no ocurrirán si el neutro del sistema eléctrico está aterrizado. Otras formas libres pueden obtenerse en las oscilaciones de voltaje, siempre con la operación de un sistema de neutro no aterrizado por el uso de transformadores de potencial con un rango de voltaje de línea a línea y la aplicación de resistores de disparo en los devanados secundarios, tal como se describe en la figura No.3.15

La implementación de capacitores en serie son ocasionalmente aplicados, particularmente en el caso de máquinas de gran tamaño, por su habilidad de reducir la demanda de KVA y mejorar el factor de potencia de operación casi a un valor igual a la unidad. Sin embargo, en sistemas de suministro de corriente alterna de neutro no aterrizado, estas soldaduras de capacitores en serie pueden presentar un definitivo peligro para el voltaje de dicho sistema. Durante la operación de soldadura el voltaje a través de ambos, los capacitores en serie y el primario del transformador de la soldadora, será de varias veces el rango de voltaje de línea a línea. Las relaciones de conexiones eléctricas físicas y el vector de voltaje asociado se indican en la figura No.3.16.

Si una falla a tierra ocurriera en la unión entre el capacitor en serie y el transformador de la soldadora (punto P), la ubicación del potencial a tierra tenderá a llegar a este punto de unión en lugar de ser el centro del triángulo de



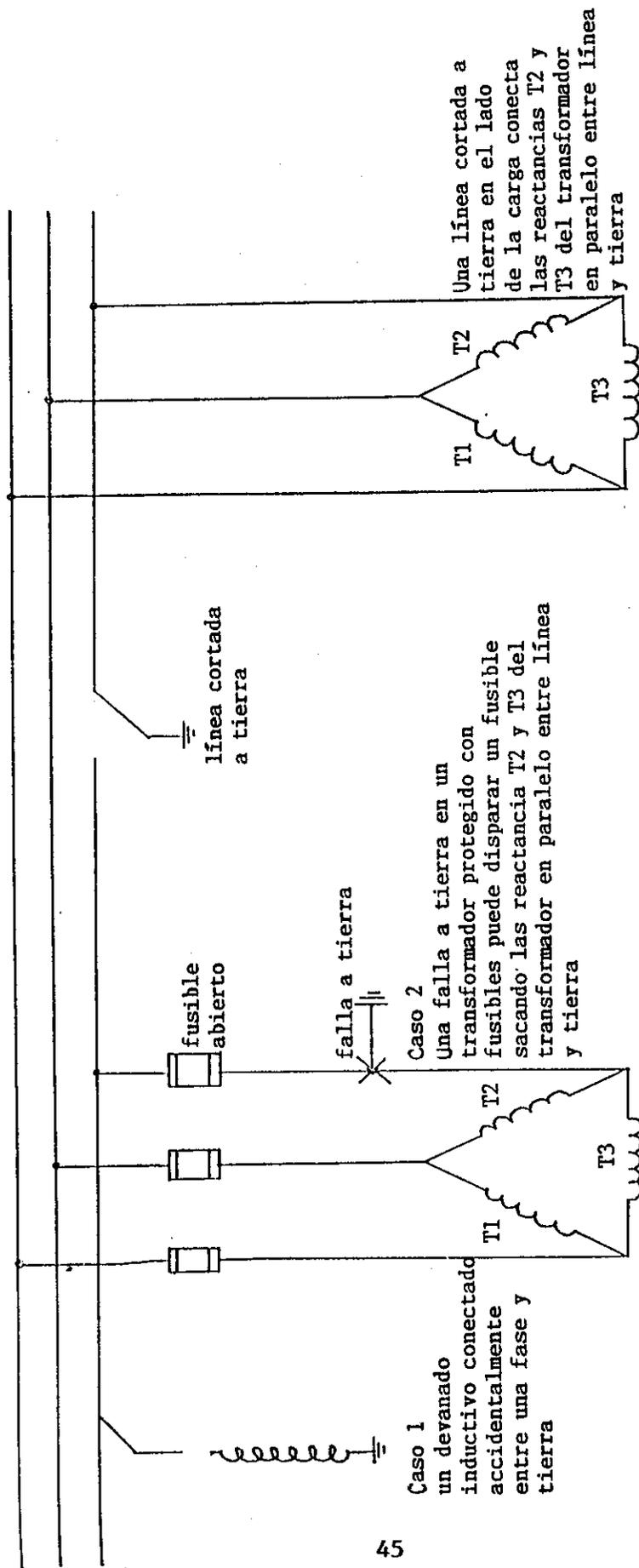


Fig. 3.14 Ejemplos de conexiones no intencionales de altas reactancias entre línea y tierra.

Sistema de neutro no aterrizado.

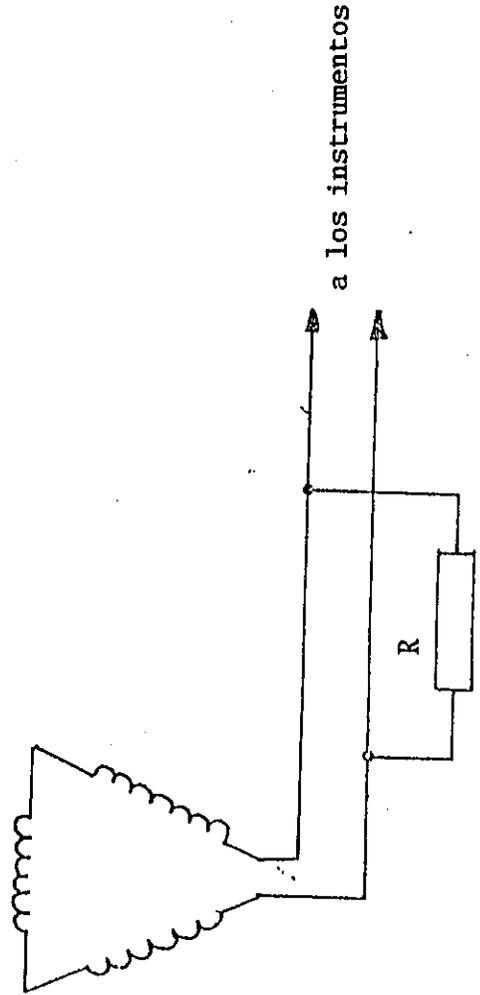
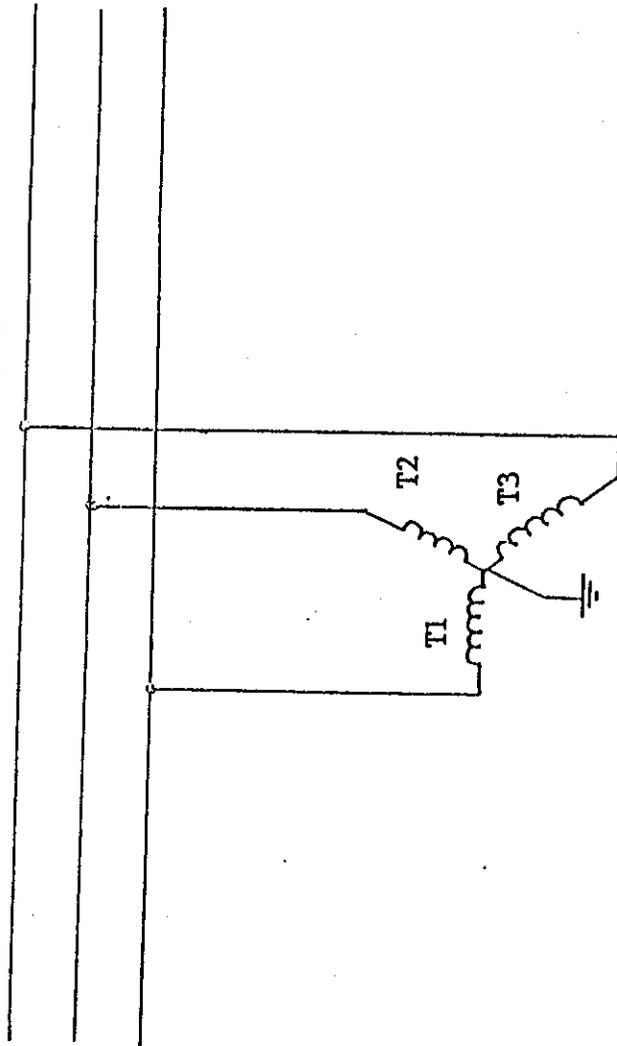
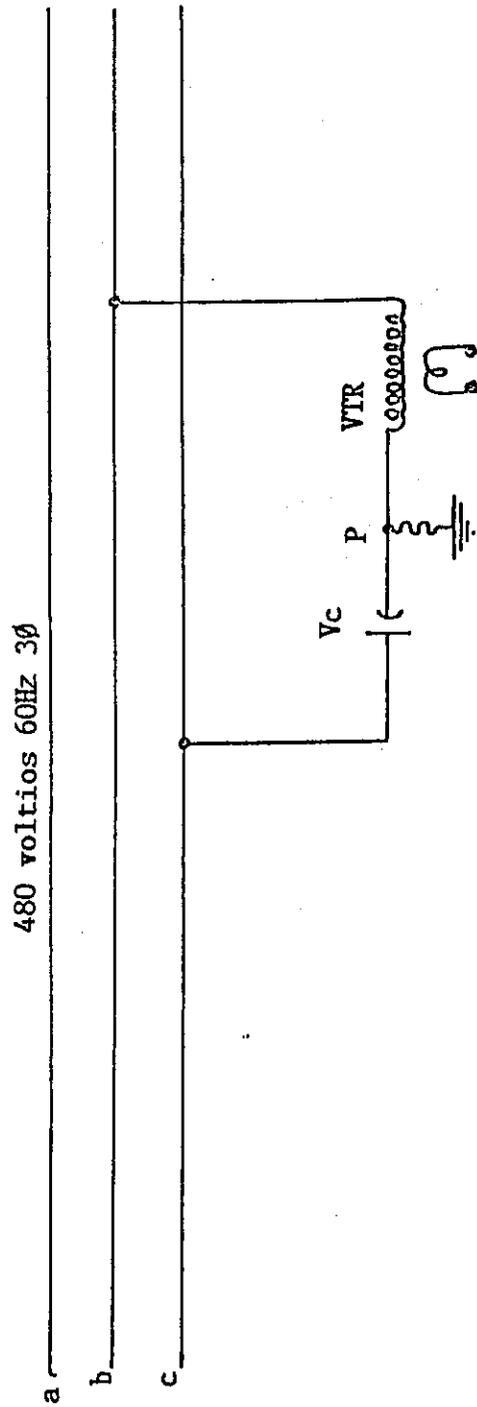


Fig. 3.15 Transformadores de potencial con estrella aterrizada y delta abierta para indicadores de tierra o detectores de voltajes de secuencia cero.



Cortacircuito no
intencional a tierra

Conexiones físicas

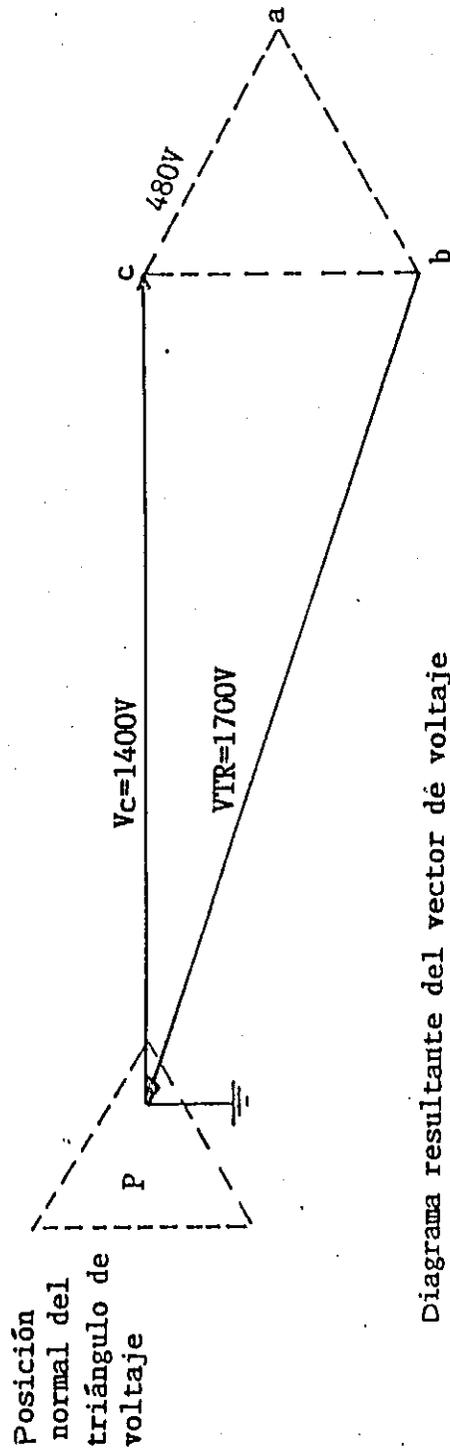


Diagrama resultante del vector de voltaje

Fig. 3.16 Sobrevoltajes en un sistema no aterrizado como resultado de un contacto a Tierra en una máquina soldadora con capacitor en serie.

voltajes del sistema de corriente alterna. La impedancia capacitiva total a tierra del sistema generalmente se esperará que sea alta en relación al valor de la soldadura del capacitor en serie y además prácticamente no ofrece ninguna oposición al cambio en la ubicación del potencial de tierra. En el caso ilustrado en la figura No.3.16, resulta evidente que el potencial del conductor de la fase A, puede elevarse cerca de los 2,000 voltios a tierra y será siete veces el voltaje normal. Como en otros casos, este sobrevoltaje es comunicado a todo el equipo interconectado metálicamente a este voltaje de operación en común.

Todos estos peligrosos sobrevoltajes inductivos-capacitivos resonantes pueden ser eliminados con el aterrizaje del neutro del sistema eléctrico.

- **FALLAS A TIERRA INTERMITENTES**

Substanciales sobrevoltajes pueden ser desarrollados en un sistema industrial de corriente alterna no aterrizado por el chisporroteo o por conexiones de fallas intermitentes a tierra. El carácter intermitente de una trayectoria de cortocircuito puede resultar de la vibración, la cual causa que un conductor eléctrico haga contacto intermitente con tierra, puede resultar de un esparcimiento de las partículas del conductor metálico fundido que intermitentemente establecen una trayectoria conductora a tierra, o como resultado de una sucesiva falla o del cierre del espacio separador entre el conductor y tierra. En el último caso, arreglando una separación entre el conductor y tierra, un progresivo incremento en el voltaje de falla a través de este vacío, es un elemento esencial en el origen de severos sobrevoltajes.

En condiciones de fallas a tierra intermitentes en sistemas no aterrizados de bajo voltaje se ha observado que crean sobrevoltajes de cinco a seis veces el voltaje normal común.

Los sistemas eléctricos los cuales son aterrizados por medio de una reactancia de valor óhmico muy alto (X_0 más de diez veces X_1) son también sujetos a sobrevoltajes, por el mismo mecanismo descrito hasta ahora, aunque actúan en una forma relativamente diferente.

Un entendimiento de la manera en que una conexión eléctrica discontinua puede ser responsable por la generación de sobrevoltajes, puede comprenderse mejor, examinando el caso de un chisporroteo o de una falla intermitente de línea a tierra en un sistema de neutro no aterrizado.

En la figura No.3.17 A, se muestra como podría operar el patrón del vector de voltaje de un sistema de corriente alterna trifásico bajo condiciones de balance normal. Los vectores de voltaje E_a , E_b y E_c rotan alrededor del neutro a la velocidad de sincronismo. El neutro eléctrico es un punto central de simetría y permanece constante al potencial de tierra si los voltajes individuales de fase son ondas fundamentales de frecuencia de forma senoidal.

Si se aterrizara el conductor de la fase A, el triángulo de voltajes del sistema se desplazará como se ilustra en la figura No.3.17 B. En la posición de fase ilustrada en la figura B, el voltaje de la fase A está a su valor máximo, instante en el cual la corriente de carga a tierra (90° adelantados del voltaje) está pasando a través de un valor cero. En el caso de que el cortocircuito contenga un pequeño vacío o arco, la corriente de arqueo podría llegar a ser extinguida a este punto. Se debe notar que la carga atrapada en la capacitancia de línea a tierra tenderá a mantener el triángulo de voltajes en la misma posición de desplazamiento. En otras palabras, el potencial de neutro (relativo a tierra) tenderá a mantenerse a un potencial de CD equivalente al valor de cresta de la onda de voltaje de CA. Lo que se quiere decir es que existirá una pequeña tendencia para cualquier voltaje de reaparecer a través del vacío en el cortocircuito inmediatamente seguido de una corriente cero, lo que ocurre en la figura B.

Sin embargo, durante la siguiente mitad de ciclo, la corriente alterna genera voltajes que invertirán sus polaridades (los vectores rotan 180°) los cuales pueden provocar que el patrón del vector de voltaje trifásico asuma la posición mostrada en la figura No.3.17 C (arriba). Notar que durante este intervalo de medio ciclo, el potencial de la fase A, ha progresivamente incrementado de un valor cero a cerca de dos veces el voltaje de cresta de línea a neutro, relativo al potencial de tierra. Este valor de potencial de línea a tierra de la fase A, puede ser suficiente para romper el vacío en el circuito de falla a tierra y restablecer la conexión entre la fase A y tierra. Si es así, el potencial de la fase A tenderá a caer al potencial de tierra.



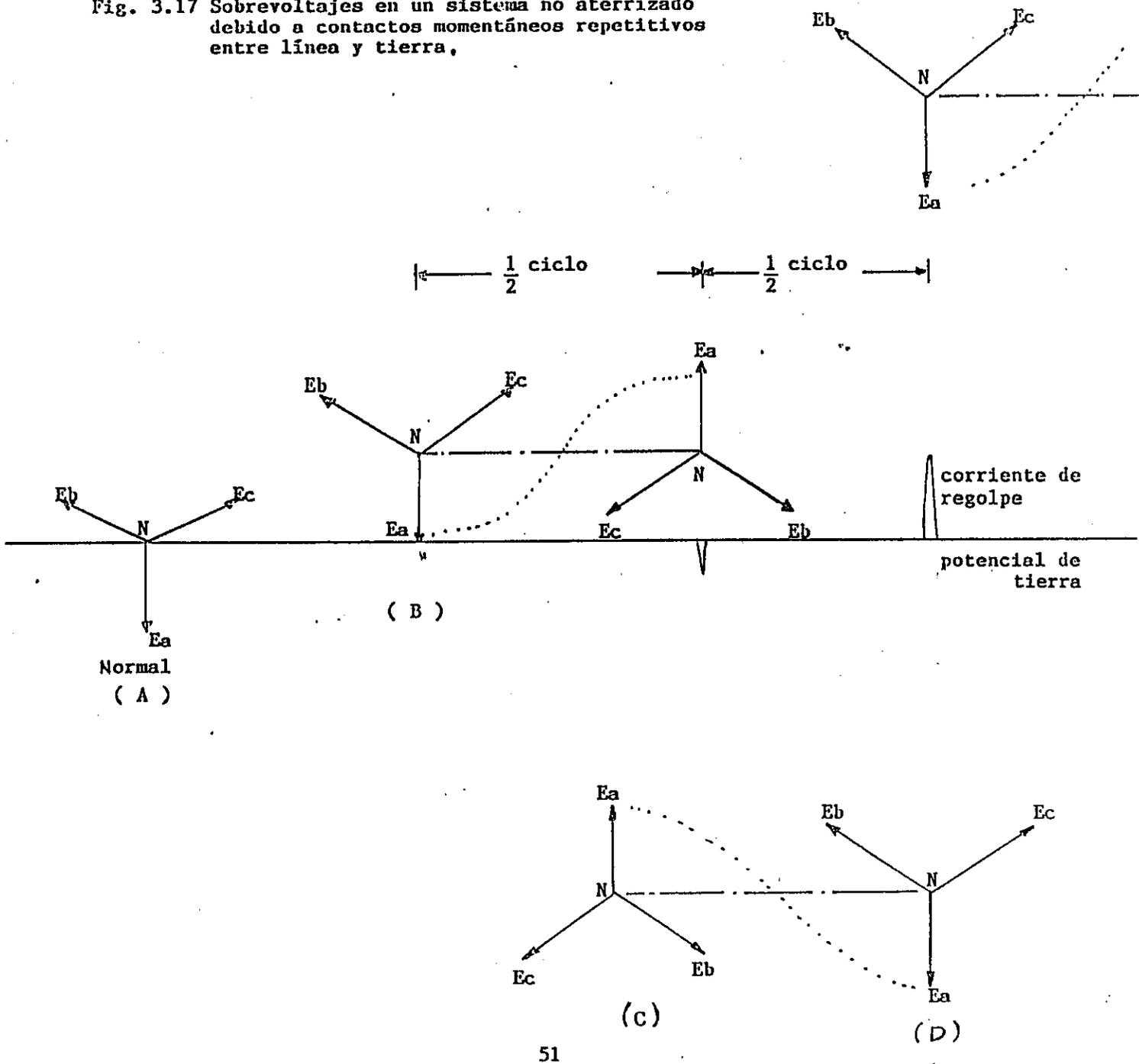
Inevitablemente existirán algunas reactancias del sistema en el conductor de la fase A al punto de cortocircuito a tierra, el cual podrá resultar en una oscilación del potencial del conductor de la fase A entre más 2 y menos 2 por ciento a una probable frecuencia de 20 a 100 veces la normal. Si el cortocircuito consiste de una conexión metálica sólida, esta oscilación decaerá a cero, dejando al conductor de la fase A a un potencial de tierra. Notar que asociada con esta oscilación transitoria de alta frecuencia corresponderá una corriente transitoria de carga a tierra. Esta corriente transitoria de carga a tierra, o corriente de restricción, otra vez alcanzará un valor de cero cuando el voltaje del sistema oscile a su máximo en una dirección negativa, como se muestra en la figura No. 3.17 C (abajo). Además se proporciona una oportunidad para que el vacío en el cortocircuito a tierra se vuelva a limpiar. Si esto no sucede, una carga es otra vez atrapada en la capacitancia del sistema a tierra en el sistema neutral.

En el curso del siguiente medio ciclo, el sistema del vector de voltaje, otra vez rotará 180° , causando que el potencial del conductor de la fase A a tierra se eleve de menos dos a menos cuatro como se indica en la transición de la parte baja de la figura 3.17 C, a la parte baja de la figura No.3.17 D. Este incremento de voltaje a través del vacío de corto circuito puede resultar nuevamente en una restricción, en cuyo caso el triángulo de voltaje tenderá a desplazarse en la posición positiva en forma de una oscilación de alta frecuencia entre los límites de potencial de menos cuatro a más cuatro, la cual, en la presencia de una conexión metálica sólida gradualmente decaerá a cero.

En la explicación de este mecanismo se debe notar que todas las condiciones han sido favorables para la creación de un posible alto voltaje de golpe en el menor tiempo posible. El golpe se ha asumido que ocurrirá al tiempo que se recobre el máximo voltaje de recuperación, pero no antes. Así mismo se ha asumido que una limpieza ocurrirá a la primera corriente cero que se obtenga después del golpe.

Bajo estas condiciones un potencial de línea a tierra de cinco veces el normal se ha desarrollado en menos de dos ciclos. En casos prácticos, el golpe puede ocurrir antes que el voltaje máximo de recuperación sea alcanzado y varios ciclos de oscilación transitoria puedan tomar lugar antes que sea limpiado el cortocircuito.

Fig. 3.17 Sobrevoltajes en un sistema no aterrizado debido a contactos momentáneos repetitivos entre línea y tierra,



Mientras que en teoría puede ser posible el incremento progresivo de voltaje de línea a tierra por regolpes sucesivos, sin que el límite de esfuerzo dieléctrico incremente progresivamente mediciones de voltaje en sistemas actuales, indican que niveles de voltaje de cinco a seis veces el normal son raramente excedidos.

El origen de sobrevoltajes de regolpe-repetitivos o de aterrizajes intermitentes pueden ser enteramente eliminados por un sistema efectivo de neutro aterrizado. El aterrizaje por medio de resistencia con una resistencia de falla a tierra de cualquier valor arriba de la corriente de carga de línea a tierra resultará efectiva. Por otras varias razones resulta evidente que la disposición de valores altos de corriente de falla a tierra serán deseables.

Si la reactancia a tierra es contemplada (esta aplicación raramente se encuentra en sistemas industriales) es importante mantener la reactancia del circuito de aterrizaje suficientemente baja para que la relación de X_0 no sea más de diez veces X_1 . Si el valor de la reactancia de aterrizaje es excedido se da la oportunidad de que otra acción de regolpe-repetitivo pueda causar sobrevoltajes a tierra.

- **MANIOBRAS DE INTERRUPCIÓN**

La operación con circuitos de interrupción produce cambios abruptos en los parámetros del circuito y son los responsables de la creación de sobrevoltajes aunque generalmente éstos, son de corta duración. Es importante reconocer que los interruptores normales de corriente alterna ofrecen una oposición pequeña al flujo de corriente del circuito durante el curso de la corriente, pero actúan reconstruyendo rápidos esfuerzos dieléctricos durante la circulación de una corriente de secuencia cero y previenen el reestablecimiento del flujo de corriente durante el siguiente medio ciclo.

Una de las primeras consideraciones que hay que realizar para comprender porqué se generan sobrevoltajes, es la cantidad de cambio en el voltaje que tiende a aparecer a través de los contactos, si éstos son operados a la posición de abiertos. Debe considerarse además, que la magnitud de estos sobrevoltajes dependerá de las condiciones de operación del sistema, pueden presentarse cuando se da una falla de cortocircuito de línea a línea; es posible también que



se presenten sobrevoltajes en maniobras de interrupción en las líneas de algún interruptor cercano con un autotransformador conectado en estrella y la fuente más severa de sobrevoltajes por maniobras de interrupción está asociada con la separación de dos secciones del sistema, las cuales han llegado a perder el sincronismo y son maniobradas cuando los voltajes generados en las dos secciones están fuera de fase cerca a los 180° .

- **DESCARGAS ELECTROATMOSFÉRICAS**

Los sobrevoltajes más altos a los que puede verse sometida una planta industrial, son aquellos producidos por descargas electroatmosféricas.

A pesar de que estas descargas pueden caer directamente a las terminales exteriores del equipo eléctrico, esto generalmente se evita con una apropiada protección. Además, los sobrevoltajes usualmente llegan al equipo (tanto exterior como interior) a través de líneas aéreas expuestas, las cuales frecuentemente suministran energía a la planta y/o la distribuyen.

Los relámpagos o descargas, también pueden producir un sobrevoltaje en las líneas de transmisión por un impacto directo en la línea o por inducción electrostática del golpe a tierra en la vecindad de la línea.

A pesar que las irrupciones de voltaje producidas por relámpagos son de gran magnitud, su duración es bastante corta. Típicamente, el voltaje se eleva muy rápidamente a un máximo o valor cresta y después decae muy lentamente, alcanzando el cincuenta por ciento del valor cresta de 20 a 150 microsegundos. La irrupción de voltaje producida por el relámpago en la línea de transmisión, no aparece simultáneamente en todos los puntos de la línea, en su lugar, éste aparece en un intervalo de tiempo sucesivo dependiente de la distancia del lugar de impacto.

4. CARACTERÍSTICAS DE UN SISTEMA ATERRIZADO Y MÉTODOS DE ATERRIZAJE DE NEUTRO

4.1 CARACTERÍSTICAS DE UN SISTEMA ATERRIZADO

El término **sistema no aterrizado** se utiliza para identificar un sistema en el cual no hay una conexión intencional entre el neutro del sistema y tierra. Sin embargo en cualquier sistema práctico siempre existirá un acople capacitivo entre los conductores del sistema y tierra, por lo tanto el llamado **sistema no aterrizado**, es en realidad un sistema aterrizado capacitivamente en virtud de la capacitancia distribuida de los conductores del sistema a tierra.

Cuando el neutro de un sistema no está aterrizado y se realiza una maniobra de interrupción en un circuito con una falla de línea a tierra, es posible que aparezcan destructivos sobrevoltajes transitorios de línea a tierra, cuya magnitud sea varias veces el voltaje normal. Por experiencia se ha podido comprobar que estos sobrevoltajes pueden causar fallas de aislamiento en otros lugares del sistema además del punto donde ocurrió la falla. También, una falla de línea a tierra en un circuito puede provocar daños al equipo e interrupción del servicio eléctrico en otro circuito del sistema eléctrico de potencia, esta misma condición puede ocurrir por la repetición de un arco en una falla de arqueo de línea a tierra; la condición descrita, se ilustra en la figura No. 4.1

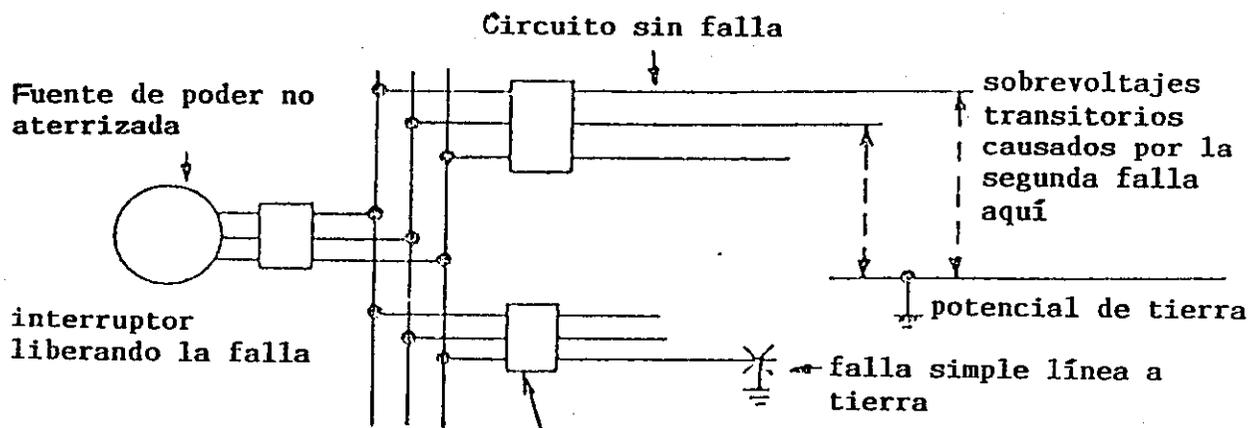


Fig.4.1 Sobrevoltajes transitorios debidos a la interrupción (liberación) de una falla a tierra en un sistema no aterrizado.

En un sistema con neutro no aterrizado, una segunda falla a tierra puede ocurrir en otra fase antes de que la primera falla sea removida, esta segunda falla puede estar en el mismo circuito que la falla original o en otro circuito siempre del mismo sistema de potencia. En cualquiera de los casos la resultante de una falla de línea a línea podrá activar los relés o los circuitos de disparo y disparar otro circuito o ambos circuitos, además, una falla individual a tierra de relativa poca importancia puede eventualmente resultar en un daño considerable debido a la relativa alta corriente de falla de línea a línea y la interrupción de uno o ambos circuitos del sistema eléctrico de potencia, esta condición se describe en la figura No. 4.2

Cuando el neutro de un sistema no está aterrizado, una falla a tierra en una de las fases causa que a través del sistema, entre tierra y las otras dos fases que no fallaron, aparezca un voltaje pleno de línea a línea del sistema eléctrico de potencia; este voltaje es del 73% arriba del voltaje normal. La figura No. 4.3 ilustra el incremento del voltaje de línea a tierra debido a una falla a tierra. Usualmente, el aislamiento entre cada línea y tierra se diseñan para resistir el voltaje pleno de línea a línea, sin embargo si este voltaje es aplicado por periodos largos, esto puede provocar una falla en el aislamiento ya sea porque éste tenga algún grado de deterioro (envejecimiento) o se vea sometido a condiciones de servicio severas.

La falla de línea a tierra en un sistema eléctrico de potencia con neutro no aterrizado causa una corriente muy pequeña de falla a tierra, que fluye a través de la capacitancia de los cables, transformadores y otros equipos eléctricos del sistema. Esta corriente puede tener una magnitud desde unos pocos amperios hasta 25 o más, en sistemas eléctricos de potencia grandes. En general, esta corriente no es suficiente para hacer que actúen los dispositivos de protección, pero puede hacer un daño considerable si se deja circular por periodos de tiempo prolongados.

Los detectores de fallas a tierra en un sistema eléctrico con neutro no aterrizado, indican la existencia de una falla a tierra pero no pueden proporcionar la localización de dicha falla, existen algunos dispositivos para poder determinar con aproximación la localización de una falla a tierra y aunque son de gran ayuda no siempre proporcionan una respuesta completa, por lo que algunas veces es requerido que para localizar y remover la falla sea removido el alimentador para la reparación; los dispositivos descritos, no son efectivos para prevenir la ocurrencia de fallas.

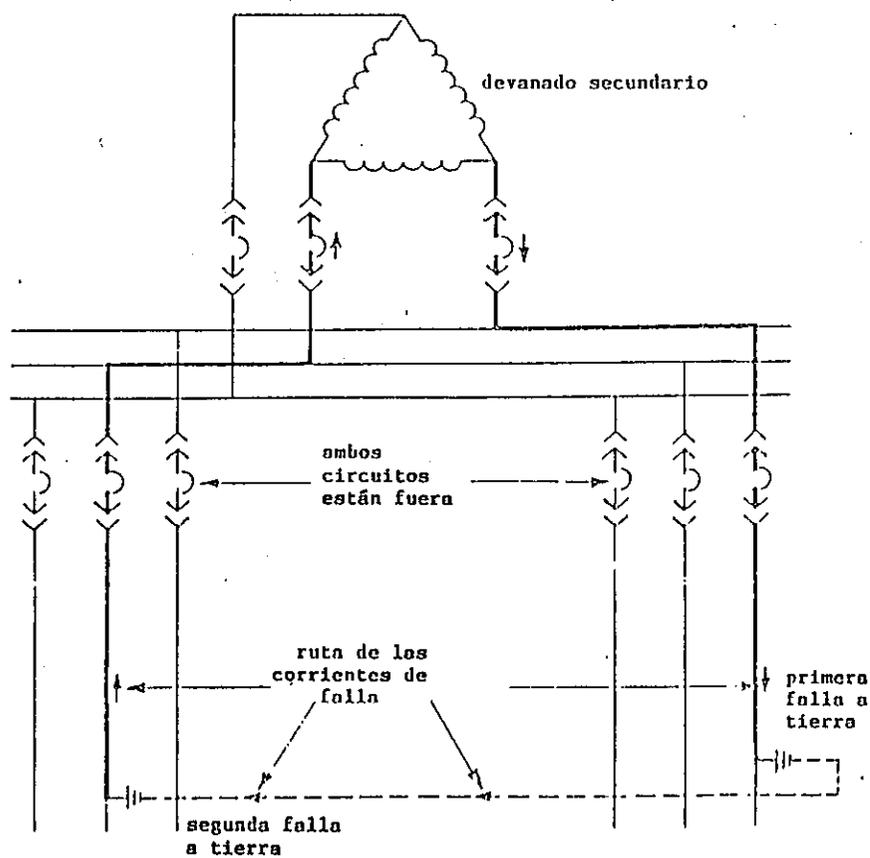


Fig. 4.2 Las fallas de doble línea a tierra en un sistema no aterrizado resultan en la salida de dos circuitos y en corrientes de falla de nivel alto que pueden causar daños severos en el equipo

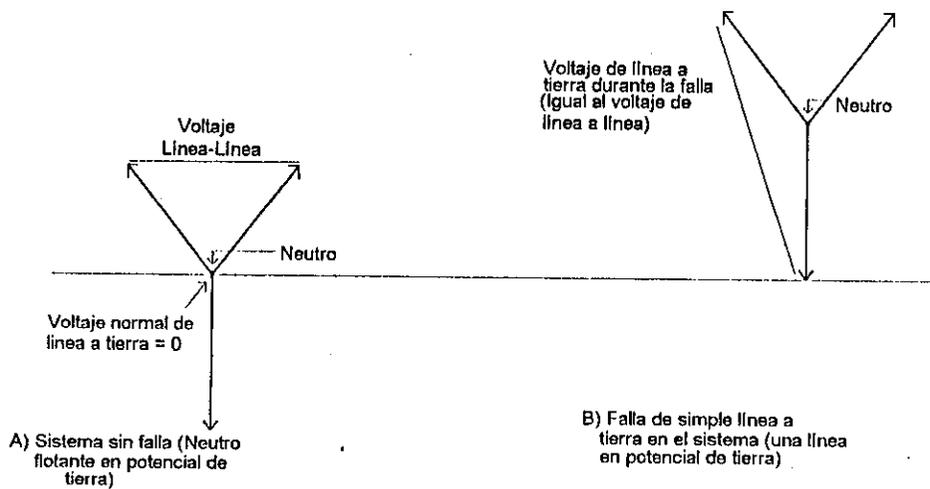


Fig. 4.3 Efecto en el voltaje de línea a tierra de una falla de línea a tierra en un sistema no aterrizado.

El problema de localizar una falla en un sistema con neutro no aterrizado, se ilustra en la Figura No.4.4.

Para localizar una falla a tierra, el primer paso es abrir los alimentadores secundarios uno a la vez, lo cual mostrará en qué alimentador ocurre la falla. Después de descubrir en qué alimentador secundario está la falla, se abren los interruptores uno a la vez y, finalmente, los motores y la carga son desconectados uno a la vez. Si este proceso de búsqueda se hace en horas de producción en la industria puede notarse rápidamente las pérdidas que produce la búsqueda de una falla en un sistema eléctrico no aterrizado. Esto, en contraste con lo que sucede en un sistema con neutro aterrizado, en donde sólo el motor "A" sería disparado sin que ninguna otra máquina sea interferida ni ninguna otra parte del sistema.

Un segundo aterrizaje puede ocurrir en la misma fase pero en diferente ubicación, esto hace más difícil su localización, debido a que el operador tiene que abrir todos los circuitos e ir cerrando uno por uno hasta descubrir en que circuito ocurre la falla. En un sistema eléctrico no aterrizado al momento de localizarse una falla a tierra, ésta puede esperar en el sistema, sin afectar la producción, hasta que se considere conveniente. Por experiencia se ha demostrado que en un sistema eléctrico no aterrizado es común que ocurra una doble falla a tierra, debido a que ésta ocurre antes de que el operador libere la primera falla, ya que ésta puede esperar.

4.2 COMO ATERRIZAR EL NEUTRO

La ejecución de los empalmes deben ser resistentes a fin de que puedan soportar los esfuerzos mecánicos que se pudieran presentar. El empalme se realizará con soldadura fuerte o autógena, o utilizando unos adecuados y fuertes bornes. La segunda solución es preferible por ser de ejecución más fácil y rápida, en particular si se tienen en cuenta las exigencias de la red. La construcción de los bornes debe ser tal, que asegure una superficie de contacto útil de 200 mm (cuadrados) cuando menos, empleándose para apretarlos uno o más pernos de diámetro no inferior a 10 mm. Tanto los bornes como los pernos serán de acero galvanizado, de cobre endurecido o de acero inoxidable. Se admite también el uso de pernos con recubrimiento electrolítico de zinc, siempre y cuando después de su colocación, se proceda a aplicar una cuidadosa capa de pintura sobre los mismos.

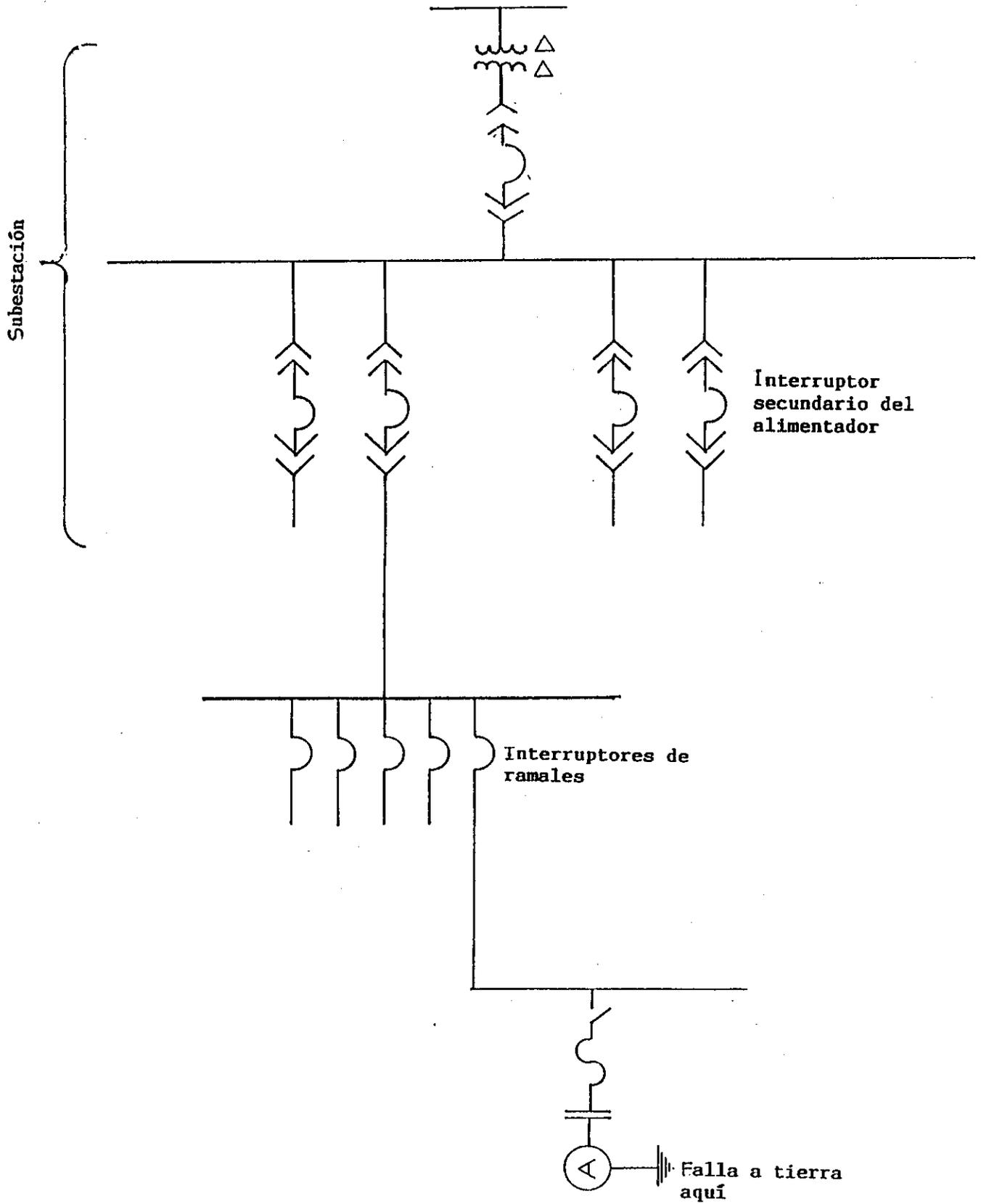


Fig. 4.4 Sistema no aterrizado de bajo voltaje con una falla de simple línea a tierra en un circuito.

Se efectuará una minuciosa elección de los materiales a fin de evitar que se formen pares galvánicos entre ellos. Recordar que el contacto entre dos metales distintos en un ambiente húmedo, puede dar lugar a la corrosión de uno de ellos (zinc-cobre, hierro-cobre), consultar artículo 100 del NEC (National Electrical Code).

4.3 BANCOS DE TRANSFORMADORES DE TIERRA

La función principal de estos bancos de tierra, es conectar a tierra el neutro de un sistema y proporcionar un circuito de retorno a la corriente de cortocircuito de fase a tierra. Si en un sistema eléctrico de potencia con neutro no aterrizado, por ejemplo, un circuito alimentado desde la delta de un transformador de potencia, se presenta una falla de línea a tierra, no existirá camino de regreso para la corriente de cortocircuito. Dicho sistema de potencia podrá seguir en operación pero con las otras dos fases con una elevación de su tensión a un valor de $\sqrt{3}$ veces el valor de la tensión nominal entre fases, esto ocasiona una sobretensión permanente a la frecuencia del sistema, la cual afecta al transformador y al sistema. Para evitar esta situación, hay que considerar un camino extra para la corriente de regreso de tierra, dicho camino se obtiene al conectar un transformador especial llamado banco de transformadores de tierra. Existen dos tipos de bancos de tierra:

1. Transformador con conexión estrella-delta
2. Transformador con conexión zig-zag

1. *Transformador de tierra, con conexión estrella en lado de alta tensión y conexión delta en baja tensión, cuyo neutro es puesto a tierra en el lado de alta tensión.*

En este transformador, la conexión delta debe ser cerrada para proveer una trayectoria para la corriente de secuencia cero, pero podrá trabajar para cualquier rango de voltaje, además, podrá usarse para alimentar o no alimentar carga. El devanado conectado en estrella debe estar al mismo voltaje que el circuito que se va a aterrizar y debe tener su conexión de neutro fuera del tanque para conectarse sólidamente a tierra.

2. *Transformador con conexión zig-zag.*

Es un transformador con diseño especial para banco de tierra, cuya impedancia en secuencia positiva es muy alta y en secuencia cero es baja; el

neutro que sale del tanque a través de una boquilla, se conecta sólidamente a tierra, dicho neutro debe soportar durante un minuto aproximadamente 1.800 amperios. La figura No.4.5 muestra el alambrado de un transformador tipo zig-zag.

Para los dos tipos de transformadores de bancos de tierra, las terminales del lado de estrella se conectan a la red alimentada por la delta, mientras que el neutro se conecta a la red de tierra del sistema eléctrico de potencia pudiéndose instalar en éste, un transformador de corriente que energiza las protecciones automáticas cuando se producen fallas a tierra en el sistema de potencia.

4.4 MÉTODOS DE ATERRIZAJE DE NEUTRO

Existen seis métodos de aterrizaje, figura No.4.6, los cuales se describen a continuación son:

1. No aterrizado
2. Sólidamente aterrizado
3. Aterrizaje a través de resistencia
4. Aterrizaje a través de reactancia
5. Neutralizador de falla a tierra
6. Puesta a tierra por medio de un transformador de distribución alimentando en su secundario a un resistor.

• SÓLIDAMENTE ATERRIZADO

Un sistema de potencia está sólidamente aterrizado cuando el neutro de un generador, transformador de potencia o el neutro de un transformador de tierra es conectado directamente a la red de tierra de la subestación como se muestra en la figura No.4.7. Debido a que la reactancia del generador o transformador aterrizado está en serie con el circuito de neutro, el aterrizaje sólido no puede ser considerado como un circuito de impedancia cero. Si la reactancia del generador o del transformador es muy grande, los objetivos buscados con el aterrizaje, principalmente, librarse de sobrevoltajes transitorios, no podrán ser alcanzados. Además, será necesario determinar el grado de aterrizaje en que se encuentra el sistema. Una buena guía, es comparar la magnitud de la corriente de

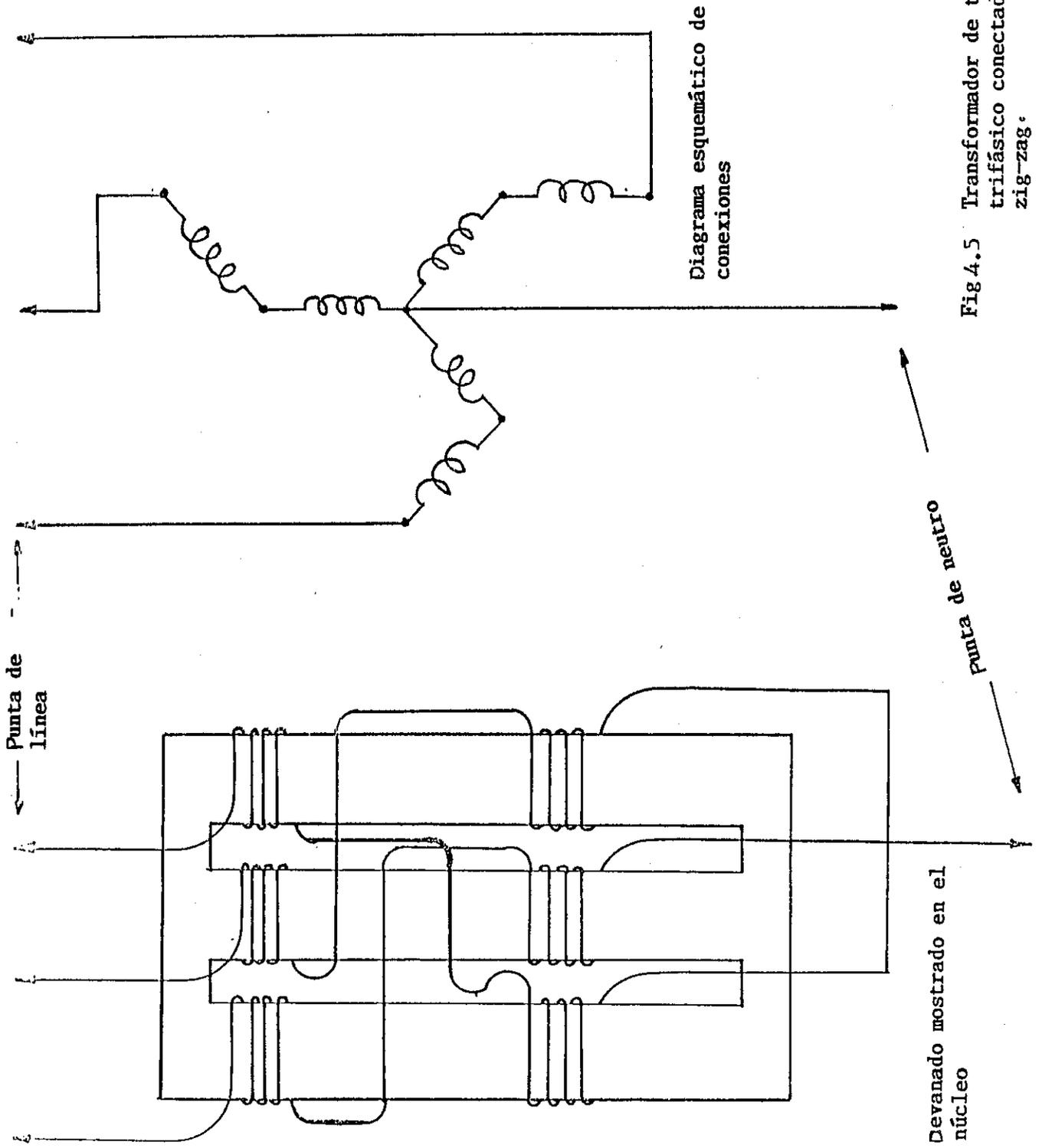


Fig.4.5 Transformador de tierra trifásico conectado en zig-zag.

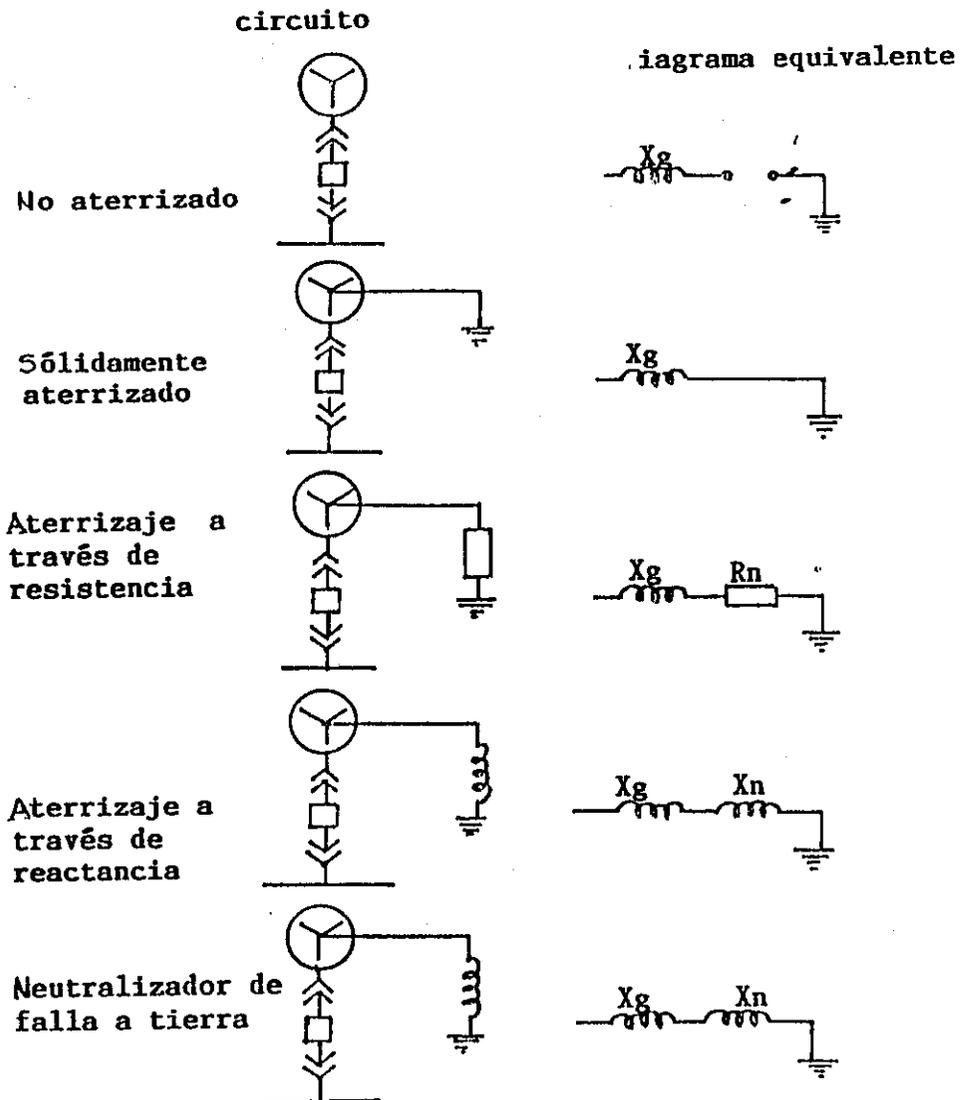


Fig. 4.6 Métodos de aterrizaje de neutro

X_g = reactancia del generador o transformador utilizada para el aterrizaje

X_n = reactancia del reactor de aterrizaje

R_n = resistencia del resistor de aterrizaje.

falla a tierra con la corriente de falla del sistema trifásico, mientras más alta sea la relación de la corriente de falla a tierra respecto a la corriente trifásica, más sólidamente aterrizado es el sistema. Para casi todos los sistemas sólidamente aterrizados (también los sistemas aterrizados a través de reactancia), es necesario que las corrientes de falla a tierra estén en un rango de 25 a 100% de la corriente de falla trifásica para prevenir el desarrollo de altos sobrevoltajes transitorios. Esto puede significar valores efectivos de corrientes simétricas de falla a tierra del orden de 10,000 a 40,000 amperios. Por ejemplo en la barra de 69,000 voltios de la subestación de Escuintla cuando están en línea las Barcasas, Tampa, Sidegua, Vapor 2 de Escuintla, Gas 5 de Escuintla y Gas 3; el orden de magnitud del cortocircuito es de 25,000 amperios.

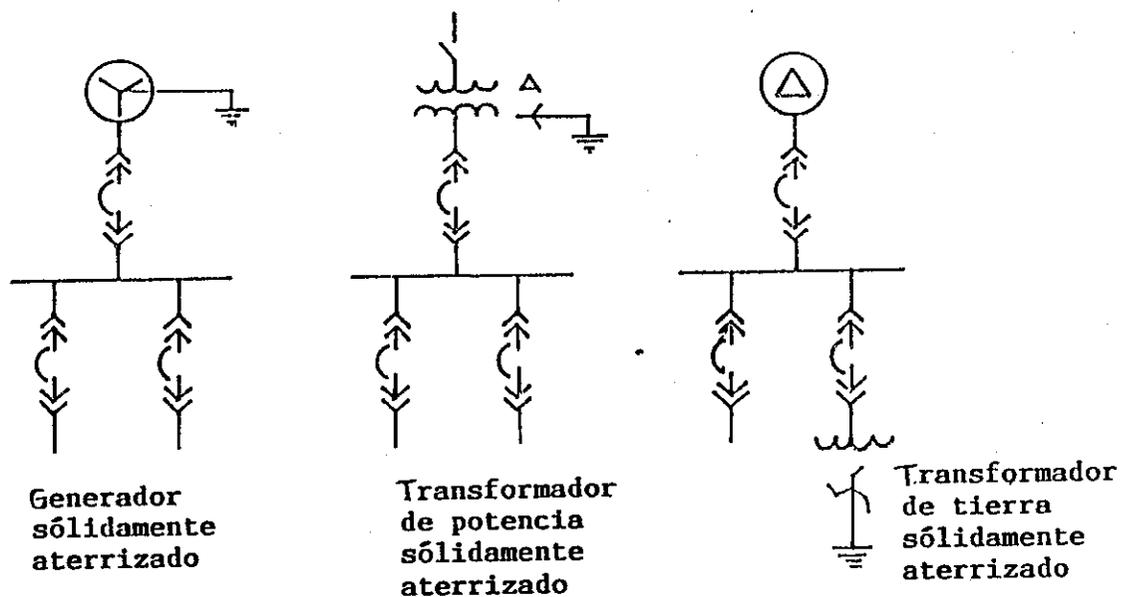


Fig. 4.7 Métodos de aterrizaje sólido del neutro de un sistema trifásico.

El aterrizaje directo de un generador sin una impedancia externa puede causar que la corriente de falla a tierra del generador exceda la máxima corriente trifásica de falla que el generador puede librar y exceda la corriente de cortocircuito para la cual los devanados usualmente son reforzados. Esto en función de los análisis de corrientes hechos en el capítulo anterior. Consecuentemente, en casos donde el aterrizaje sólido de un sistema está indicado, los generadores pueden ser aterrizados a través de un reactor que tenga un valor

óhmico bajo, el cual limitará la corriente de falla a un valor no más grande que la corriente trifásica de falla. En el caso de un sistema trifásico de cuatro hilos, limitar la corriente de falla a tierra a un 100% de la corriente trifásica de falla es usualmente práctico, sin interferir con la operación del sistema de cuatro hilos. Los pararrayos para sistemas de neutro aterrizado pueden ser aplicados cuando el sistema está aterrizado a través de una impedancia baja para prevenir el desplazamiento del neutro del sistema respecto a la tierra, más allá de los límites especificados. En este caso, la máxima impedancia puede expresarse en términos de la corriente mínima de falla a tierra. Esta corriente puede ser al menos del 60% de la corriente trifásica de cortocircuito para aplicaciones de pararrayos de neutro aterrizado.

- **ATERRIZAJE A TRAVÉS DE UNA RESISTENCIA**

En aterrizajes con resistencias, el neutro es conectado a tierra a través de uno o más resistores, como se muestra en la figura No.4.8. En este método, con los valores óhmicos del resistor normalmente usados, los voltajes de línea a tierra que existen durante una falla de línea a tierra son casi los mismos que para un sistema no aterrizado (excepto los sobrevoltajes transitorios). Esto se ilustra en la figura No.4.9. Un sistema debidamente aterrizado por una resistencia, no está sujeto a sobrevoltajes transitorios destructivos. Para sistemas de 15 KV para abajo, aterrizados a través de una resistencia, tales sobrevoltajes ordinariamente no serán de una naturaleza seria, a menos de que la resistencia sea tan alta que limite la corriente de falla a tierra a una fracción pequeña de 1% de la corriente trifásica de falla del sistema (por ejemplo, menos que la corriente de carga del sistema). Esta excesiva corriente de tierra (usualmente bien abajo de los 50 amperios) está muy lejos de ser la corriente normalmente usada en aterrizajes a través de un resistor. Los sistemas de aterrizaje a través de resistores como ya se describió, pueden usar pararrayos para circuitos de neutro no aterrizado, donde estos dispositivos son requeridos. Las razones para limitar la corriente por medio de un aterrizaje de neutro a través de resistencia son las siguientes:

1. Reducir los efectos de incendio y fundición (derretimiento) en equipo eléctrico dañado tal como: interruptores, cables y máquinas rotativas
2. Reducir los esfuerzos mecánicos en circuitos y aparatos que transportan la corriente de falla

3. Reducir los golpes eléctricos que dañan al personal
4. Reducir la bajada momentánea del voltaje de línea ocasionada por la ocurrencia y liberación de una falla a tierra.

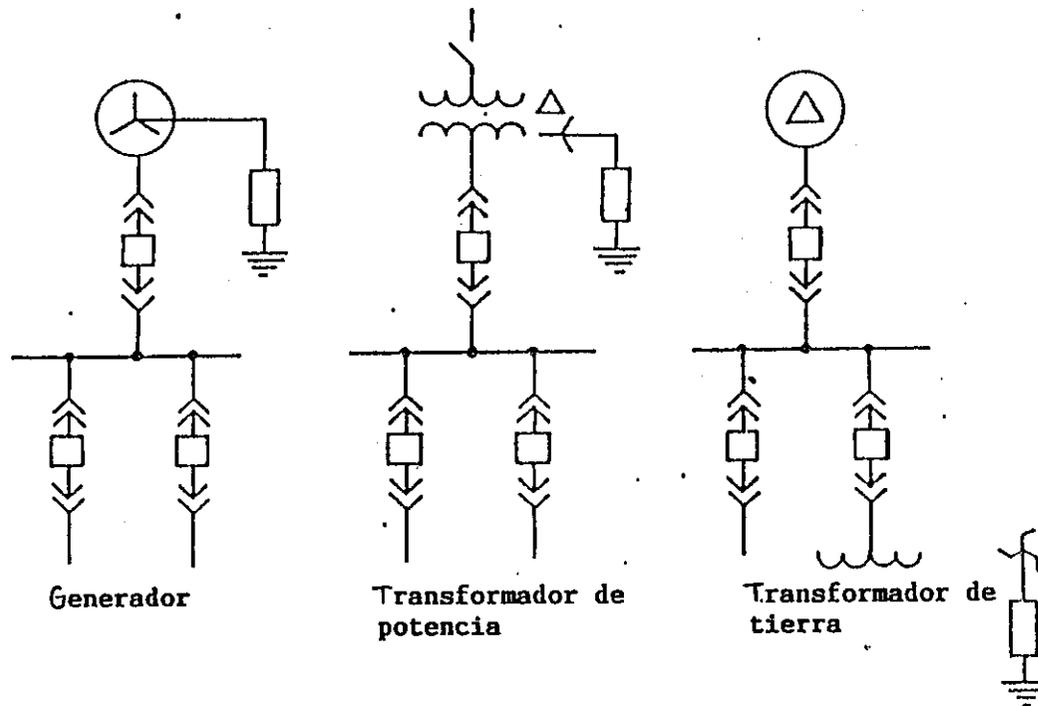


Fig. 4.8 Métodos de aterrizaje de neutro a través de resistencia en sistemas trifásicos.

• ATERRIZAJE A TRAVÉS DE REACTANCIA

El término de aterrizaje a través de reactancia, describe el caso en el cual un reactor es conectado entre el neutro de la máquina y la tierra como se muestra en la figura No.4.6. La magnitud de la reactancia en el circuito de neutro determina que tan **sólidamente** el sistema es aterrizado y por consiguiente que características tendrá. Dado que la corriente de falla, puede fluir en el sistema aterrizado por reactancia es una función de la reactancia de neutro, la magnitud de la corriente de falla a tierra es usada frecuentemente como un criterio para las varias características del sistema, más que la reactancia de neutro directamente.

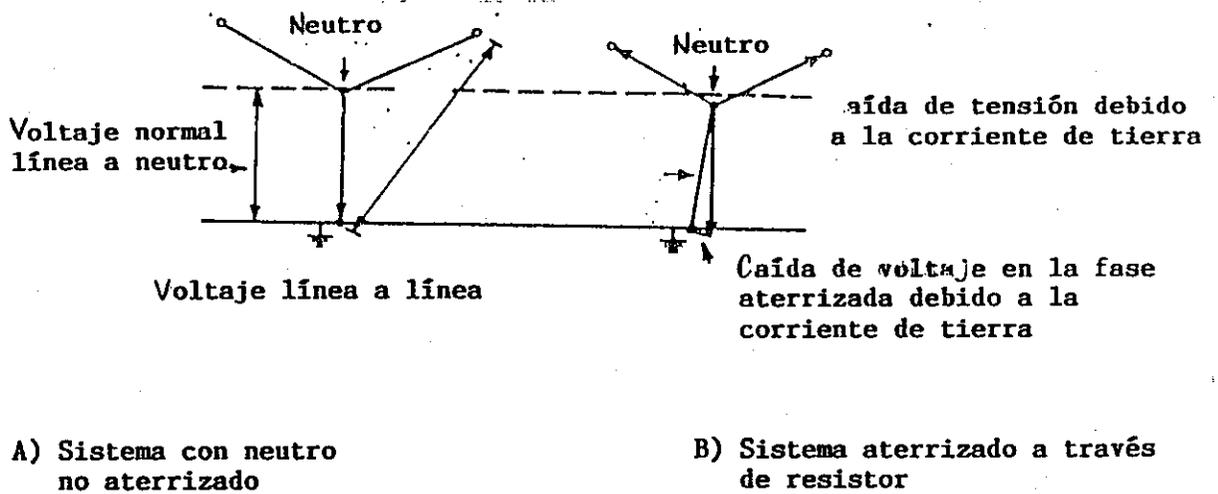


Fig.4.9 Diagrama de voltaje de un sistema durante la ocurrencia de una falla simple de línea a tierra.

En la práctica, el aterrizaje por reactancia es generalmente usado únicamente en el caso citado bajo el título de **aterrizaje sólido** en el cual el neutro de un generador va a ser conectado directamente a tierra. En este suceso, puede ser necesario añadir un reactor de bajo valor para limitar la corriente de falla a tierra disponible a través del generador, a un valor no mayor que la corriente trifásica de falla contribuida por el generador. Las características de un sistema aterrizado por reactancia, dependen de la magnitud de corriente de falla a tierra en cualquier punto del sistema. Si un sistema va a ser aterrizado a través de un reactor, la corriente de falla a tierra disponible deberá ser al menos el 25% de la corriente de falla trifásica.

Esta corriente es considerablemente mayor que la corriente de falla mínima deseable en un sistema aterrizado por una resistencia; por lo tanto, un aterrizaje con reactor usualmente no se considera una alternativa para un aterrizaje con resistencia.

• NEUTRALIZADOR DE FALLA A TIERRA

Un neutralizador de falla a tierra es un reactor conectado entre el neutro de un sistema y tierra debe tener una selección especial, relativamente de un valor de reactancia alto. Una falla de línea a tierra causa que el voltaje de línea a neutro sea

impreso a través del neutralizador, el cual pasa como una corriente inductiva I_n (figura No.4.10). Esta corriente está 180° fuera de fase y es aproximadamente equivalente en magnitud (cuando el neutralizador es armonizado al sistema) a la resultante de las corrientes de carga de las dos fases donde no hubo falla, I_b e I_c . Las componentes inductiva y capacitiva de la corriente del neutralizador y el remanente de la corriente en la falla, se deben a la resistencia, fugas en el aislamiento y efecto corona. Esta corriente es relativamente pequeña, y como está en fase con el voltaje de línea a neutro, la corriente y el voltaje pasan a través de un valor cero en el mismo instante. De aquí que el arco es extinguido sin restricción y las descargas disruptivas son eliminadas sin remover de servicio la sección de la línea dañada.

Para sistemas en los cuales las fallas sean relativamente frecuentes, los neutralizadores de falla a tierra pueden ser muy útiles porque ellos reducen el número de operaciones innecesarias del interruptor del circuito requeridas para remover fallas, además de mejorar la continuidad del servicio. Estos neutralizadores han sido usados principalmente en sistemas arriba de 15 KV consistentes esencialmente por líneas de transmisión aéreas. Algunos pocos neutralizadores han sido usados para limitar la corriente de falla a tierra sustancialmente a un valor cero, cuando una falla a tierra ocurre en un sistema grande de neutro no aterrizado de 69KV, los sobrevoltajes son reducidos también en comparación con un sistema no aterrizado. Esto sin embargo, es una segunda opción para un aterrizaje de resistencia, el cual provee una señal de falla a tierra para desconectar el circuito que falló. Debe notarse sin embargo, que las fallas en aislamientos sólidos, tal como papel, barnices y gomas, no son autorrecuperables como el flasheo de un aislador que son y no son extinguidos por el uso de un neutralizador de falla a tierra, como pueden ser los flasheos de una línea abierta. En algunos casos, donde no se han realizado las consideraciones deseables por los operadores de la planta para disparar un circuito por la ocurrencia de una falla a tierra, se han hecho arreglos especiales para limitar el daño debido al flujo de corriente de carga y todavía poder localizar fácilmente el alimentador de la falla. Un esquema para realizar lo descrito anteriormente, es usar un neutralizador de falla a tierra en el neutro para limitar la corriente de falla a tierra y reducir las variaciones por interrupción de circuitos a valores seguros. Se arregla conectar en paralelo un resistor con el neutralizador cuando se desea pasar suficiente corriente de falla a tierra para hacer que los relés den una señal de disparo del interruptor

del alimentador dañado, como se ilustra en la figura No.4.11. A causa de la corriente a ser conmutada, un interruptor de un circuito de potencia podrá usarse para conmutar el resistor. El resistor y el conmutador son seleccionados como si solamente el resistor fuera el usado. Este esquema es caro y solamente es usado en casos muy especiales.

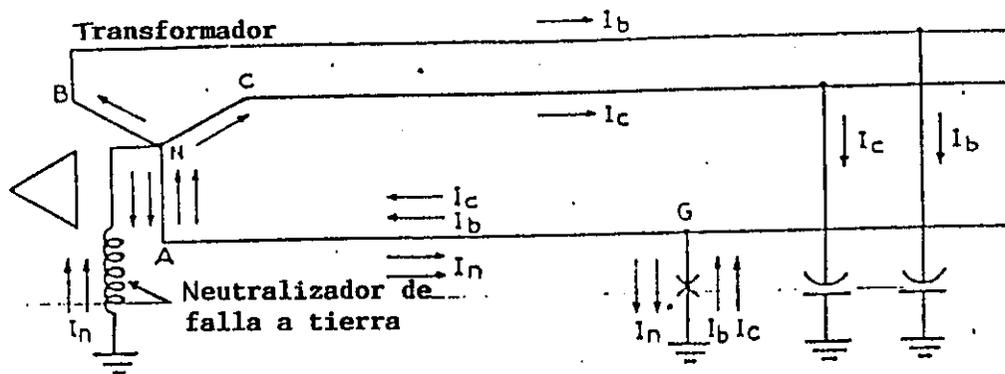


Fig. 4.10 Muestra de las corrientes de falla a tierra en un sistema aterrizado a través de neutralizador de falla a tierra.

En un grado limitado se han usado neutralizadores de falla a tierra solo en sistemas que tienen las siguientes características:

1. En sistemas grandes que tienen únicamente dos transformadores de corriente por circuito por razones de costos de inversión
2. Donde el interruptor es tal que la adición de un tercer transformador de corriente y de un relé de sobrecorriente residual involucran una considerable inversión
3. En sistemas que tengan una corriente de carga fuerte, en cuyo caso se pueden dañar las máquinas si se presenta una falla a tierra y el sistema se deja no aterrizado
4. En sistemas susceptibles de arcos a tierra, por ejemplo líneas aéreas.

Un neutralizador de falla a tierra sumado a un resistor de aterrizaje es también aplicable para sistemas que presentan las condiciones descritas anteriormente, excepto si el transformador de corriente y el relé residual son obligatorios. Una de las características de un sistema aterrizado resonante es el cuidado que debe tomarse para mantener el neutralizador de falla a tierra en armonía con la capacitancia del sistema para minimizar el desarrollo de sobrevoltajes transitorios. Además, donde secciones del sistema son conmutadas en encendido y apagado, será necesario ajustar la reactancia del neutro cambiando las etapas del neutralizador.

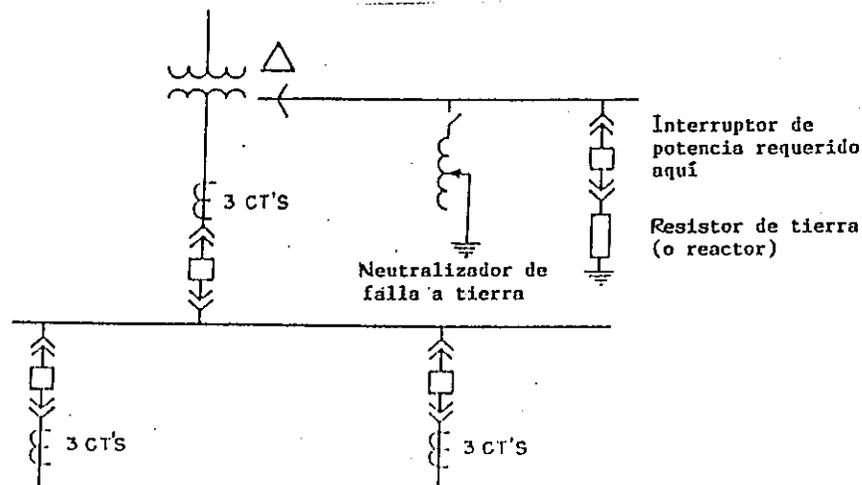


Fig. 4.11 Tres transformadores de corriente y relé de tierra requeridos por cada circuito en una aplicación especial del neutralizador de falla a tierra.

- **PUESTA A TIERRA POR MEDIO DE UN TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN**

Este método consiste en conectar el devanado primario de un transformador de distribución entre el neutro del generador y tierra. En paralelo se conecta en el devanado secundario de este transformador un resistor y si se desea, un relé de disparo o de alarma. El tamaño del transformador y del resistor, dependen de la corriente de carga que se presente en el caso de una falla de línea a tierra. Esta corriente de carga puede obtenerse sumando las capacitancias de los varios componentes del circuito y determinando la corriente que fluye si una fase es aterrizada. Ver esquema de conexión en la figura No.4.12

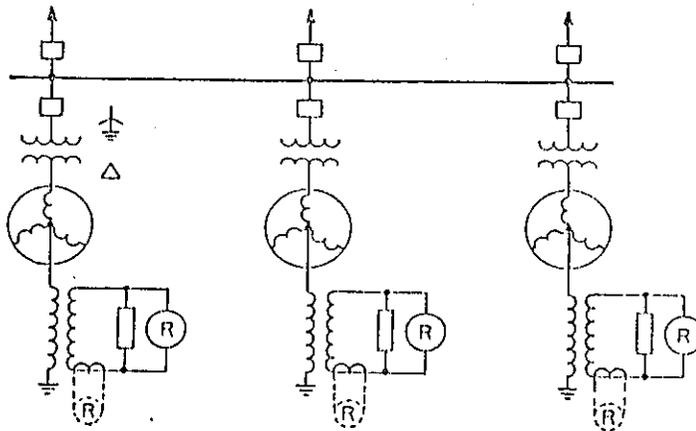


Fig. 4.12 Esquema de aterrizaje para una unidad de un sistema.

Una de las ventajas de un aterrizaje con un transformador de distribución es que en lugar de aterrizar con un reactor de una gran resistencia, se utiliza un transformador de bajada y un resistor de un valor de resistencia pequeño. Entre otras ventajas se tiene que se disminuye la posibilidad del fenómeno de la ferresonancia, se evita que se presenten sobrevoltajes transitorios por maniobras de interrupción, de arqueo, etc.

5. ANÁLISIS Y APLICACIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS NO ATERRIZADOS EN LA INDUSTRIA

5.1 ESTUDIO Y ANÁLISIS DE SISTEMAS ELÉCTRICOS NO ATERRIZADOS EN LA INDUSTRIA

DIAGRAMA UNIFILAR VIGUA

El sistema eléctrico de la empresa Vidrería de Guatemala, S.A. (VIGUA, S.A.) está conectado al anillo de 69 KV de la EEGSA, tiene un pórtico de medición general y dentro de las instalaciones, una línea de 69 KV propia, de la cual pasando por sus respectivos KPF, se derivan las acometidas de las cuatro subestaciones principales que actualmente posee VIGUA. El hecho de que exista dicha línea de 69 KV presenta la ventaja de que pueden desenergizar individualmente cada una de sus subestaciones sin afectar a las demás. Esta ventaja es de gran utilidad para los mantenimientos preventivos o correctivos de dichas subestaciones ya que la carga de la subestación fuera de servicio puede distribuirse en las otras tres que quedan energizadas. Dentro de sus instalaciones se encuentran dos generadores de 2.5 KW conexión estrella aterrizada y varias subestaciones descritas a continuación: la subestación No.1 consiste en un banco de transformadores de 3x500 KVA conexión delta-delta, 69,000/440 V, la subestación No.4 esta conformada por un transformador trifásico de 10-14 MVA conexión delta-estrella aterrizada, 69,000/440 V, la subestación No.3 conformada por un transformador trifásico de 2,500 KVA, conexión delta-estrella flotante, 69,000/4,160 voltios, la subestación No.2 formada por un banco de transformadores de 3x500 KVA con conexión delta-delta, 69,000/480 V y dos subestaciones de Servicios Generales consistentes cada una de un transformador de 1,250 KVA, conexión delta-estrella flotante, 4,160/480 V.

El sistema eléctrico de VIGUA, S.A. es un sistema eléctrico no aterrizado, presenta el inconveniente de que en él, es difícil de localizar fallas a tierra. En un transformador de 1,250 KVA, 4,160/480 V con conexión delta-estrella flotante se



presentó una falla a tierra. Para poder localizarla, fue necesario sacar fuera de servicio a varias cargas por medio de sus interruptores de protección hasta determinar en qué ramal se encontraba la falla. Se midió el voltaje de fase a fase en la estrella del transformador y se registró un valor de 480 V, pero al medirse el voltaje de fase a neutro se registró un valor de 1,600 V, lo cual muestra los sobrevoltajes a los que se puede ver expuesto un sistema no aterrizado. La falla se debió al perforamiento del aislamiento de uno de los conductores y para corregir dicha falla, se cortó el tramo de conductor en mal estado y se empalmó cable nuevo, quedando de esta forma corregida la falla.

Como fue necesario sacar fuera de servicio a varias cargas para la localización de la falla, VIGUA, tuvo que parar su producción en algunos sectores, lo que significó grandes pérdidas económicas para ellos.

VIGUA alimenta sus dos hornos con un sistema flotante, durante el proceso de la fabricación de botellas, el vidrio se transporta líquido por una tubería que lo conduce hacia los moldes, si el sistema fuera aterrizado, al momento de presentarse una falla y activarse las protecciones, el horno se desenergiza y todo el vidrio se enfría y solidifica, lo cual se traduciría en pérdidas millonarias. Es por esta razón, que ellos prefieren un sistema no aterrizado en el cual se pueda mantener energizado el horno aunque se tenga una falla a tierra por localizar y limpiar.

5.2 APLICACIÓN DE BANCOS DE TRANSFORMADORES DE TIERRA EN SISTEMAS NO ATERRIZADOS

Un transformador de tierra puede conectarse al sistema de tal manera que el sistema siempre este aterrizado. En la figura No. 5.1 A, se muestra un transformador de tierra con un breaker de línea individual para una conexión directa al bus principal del sistema.

La figura No.5.1 B, muestra lo que significa conectar un transformador de tierra a un sistema sin el breaker de línea individual. En este caso, el transformador de tierra es conectado entre el banco de transformación principal y su breaker. Si los transformadores de tierra son conectados como se muestra en la figura No. 5.1 B, habrá solo un transformador de tierra por cada banco conectado en delta que suministra potencia al sistema o suficiente para asegurar al menos el tener siempre un transformador de tierra en el sistema.

En la aplicación de transformadores de tierra, el primer paso es revisar el voltaje del sistema y el nivel de la corriente de falla para determinar si el sistema debe ser sólidamente aterrizado o aterrizado a través de un resistor.

5.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE UN SISTEMA ELÉCTRICO ATERRIZADO Y NO ATERRIZADO

Las ventajas de operar un sistema de potencia industrial aterrizado, comparado con la operación de un sistema no aterrizado, pueden ser una o más de las siguientes:

1. Reducción de gastos de operación y mantenimiento:

- a. Reducción en la magnitud de los sobrevoltajes transitorios
- b. Mejora en la protección contra rayos (descargas electroatmósfericas)
- c. Simplificación de la localización de una falla a tierra
- d. Mejoramiento del sistema y equipo de protección de falla.

2. **Mejoramiento en la confiabilidad del sistema**, es decir que las fallas y perturbaciones en el sistema son más fáciles de localizar y corregir.

3. Mayor seguridad para el personal y el equipo, es decir se evitan sobrevoltajes en el equipo y se logran protecciones para el personal

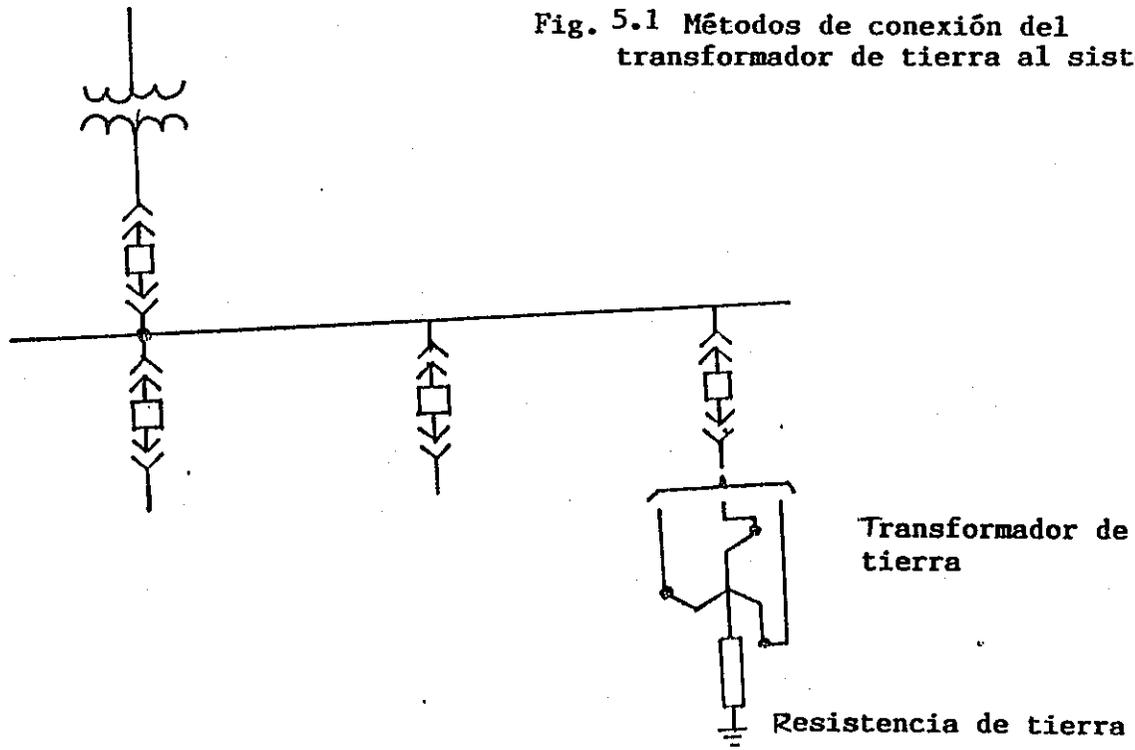
La importancia relativa de estas ventajas varía con la clase de voltaje del sistema y en menor grado con las condiciones de operación del mismo.

En cuanto a la aplicación de pararrayos en sistemas aterrizados y no aterrizados, se encuentran en la industria, pararrayos cuyos diseños ofrecen mejor resistencia a sobrevoltajes imprevistos y bajas descargas de voltaje en comparación con otros diseños. Estas características pueden permitir al usuario, aplicar una unidad con un rango de MCOV (máximo voltaje de operación continua) más pequeño. El criterio de aplicación más importante de los pararrayos es el voltaje máximo que puede ser continuamente aplicado.

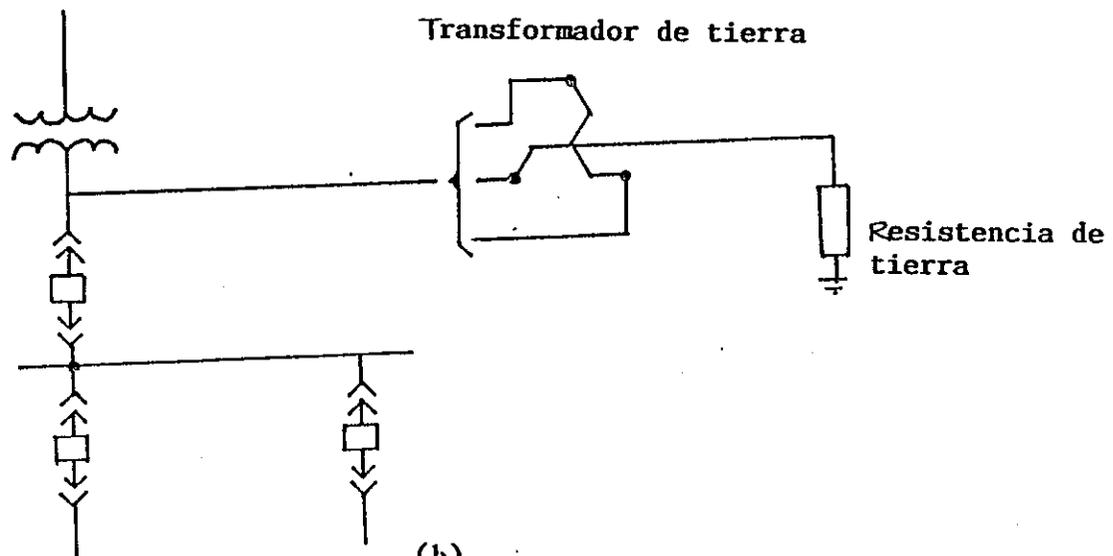
Para algunos casos de aplicación normal, para sistemas con neutro efectivamente aterrizado, será suficiente conocer el voltaje máximo continuo y dividir este valor dentro de $\sqrt{3}$ para conocer el MCOV adecuado. Por ejemplo, un sistema de 138 KV usualmente tiene un voltaje máximo continuo de 145 KV rms. Dividiendo 145 KV entre $\sqrt{3}$, tenemos un valor de voltaje de 84 KV de línea a neutro. El pararrayos adecuado para esta aplicación deberá tener un MCOV igual a 84 KV, prescindiendo de un coeficiente de aterrizaje que generalmente se usa en sistemas no aterrizados o aterrizados por una impedancia.

En sistemas no aterrizados o aterrizados por una impedancia cuando ocurre una falla y ésta espera ser removida en un intervalo de tiempo máximo de 30 minutos, el mínimo MCOV para el pararrayos, será el voltaje máximo de línea a línea del sistema, dividido 1.25 (coeficiente de aterrizaje). Para operaciones prolongadas bajo condiciones de falla sobre las 2,000 horas, el mínimo MCOV del pararrayos, es el voltaje máximo de línea a línea dividido 1.11 (coeficiente de aterrizaje).

Fig. 5.1 Métodos de conexión del transformador de tierra al sistema.



(a)



(b)

En general sistemas abajo de los 15 KV en plantas industriales no se ven expuestos a rayos, por lo tanto la ventaja que se gana de un mejoramiento en la protección por medio del uso de pararrayos con neutro aterrizado, éste no es un factor importante frecuentemente.

Cuando las plantas industriales utilizan un voltaje arriba de los 15 KV, estos circuitos se ven frecuentemente expuestos a rayos, por lo que el uso de una impedancia baja en el sistema de aterrizaje de neutro para permitir el uso de pararrayos de neutro aterrizado, es definitivamente ventajoso.

Voltajes abajo de los 15 KV son más comúnmente usados en plantas industriales y son los voltajes más altos a los cuales las máquinas rotativas son ordinariamente conectados. Es en estos sistemas, que las ventajas de un sistema de neutro aterrizado se obtienen en mayor grado. Minimizar el daño en el punto de falla es usualmente más importante que mejorar la protección contra rayos.

Las razones de las ventajas provienen de las características de operación del sistema de neutro aterrizado comparado, con el sistema de neutro no aterrizado. Una mejor protección puede ser obtenida en un sistema con neutro aterrizado porque la protección del relé diferencial de motores, generadores y transformadores se mejora en un sistema de neutro aterrizado.

Si el neutro del sistema es no aterrizado, la protección contra aterrizajes en los devanados de las máquinas por porcentaje de los relés diferenciales, está provista únicamente sobre la ocurrencia de un segundo aterrizaje en otra fase del sistema, mientras que en un sistema con neutro aterrizado, el porcentaje del relé diferencial operará para una falla individual a tierra en la zona de protección.

Los relés de sobrecorriente de fase en un sistema eléctrico de potencia son ajustados a un valor de corriente arriba del rango de corriente de plena carga del circuito, puesto que la corriente de carga fluye a través de los mismos transformadores de corriente y relés, así como lo hace la corriente de falla. Sin

embargo, los relés de falla a tierra pueden ser ajustados para operar a una corriente de plena carga considerablemente menor, puesto que la corriente de carga no pasa a través de ellos en un sistema de potencia industrial trifásico normal, con cargas trifásicas. Esta es la característica de los relés de aterrizaje que permiten el uso de una corriente de falla a tierra baja, asociada con el resistor de aterrizaje.

Los relés de sobrecorriente de fase usualmente tienen ajustes de taps de 4 a 16 amperios mientras que los relés de aterrizaje tiene taps de ajuste bajo de 0.5 a 2 amperios ó de 1.5 a 6 amperios. En otros casos, el costo de un sistema de neutro aterrizado puede ser incrementado por el costo del equipo de aterrizaje el cual, en la mayoría de los casos, en un rango de 2.4 a 13.8 KV, es un resistor de aterrizaje. Este costo no es generalmente significativo.

La experiencia de operadores, quienes han trabajado con sistemas de neutro aterrizado y no aterrizado, han revelado que el porcentaje de falla es sustancialmente menor y el tiempo fuera de servicio del sistema, es menor en sistemas eléctricos aterrizados. Esto resulta del hecho de que los sobrevoltajes transitorios son grandemente reducidos en sistemas de neutro aterrizado. Debido a que el aterrizaje reduce estos sobrevoltajes, la vida del aislamiento del sistema eléctrico se incrementará y las interrupciones en la continuidad del servicio del sistema disminuirán. Aún cuando los sobrevoltajes de un sistema de neutro no aterrizado pueden no ser suficientemente altos para causar múltiples fallas, cada vez que sucede una falla a tierra, la aplicación repetitiva de éstos sobrevoltajes pueden debilitar el aislamiento y causar un porcentaje mayor de falla que en un sistema de neutro aterrizado.

CARACTERÍSTICAS DE UN SISTEMA ELÉCTRICO ATERRIZADO DE BAJA TENSIÓN

SISTEMA ATERRIZADO	SISTEMA NO ATERRIZADO	Referencia
SEGURIDAD:		
En cualquier tiempo (siempre) solamente se tienen 277 voltios a tierra. (Se asume un buen aterrizaje y un voltaje máximo de 480 voltios de línea a línea.)	Cuando el sistema no está aterrizado, generalmente se miden 277 voltios de fase a tierra. Si una fase está aterrizada, en las otras dos fases se medirá un voltaje de 480 voltios.	
El voltaje en el sistema está limitado a 277 voltios cuando ocurre una falla del primario al secundario en transformadores suministro en el sistema.	En fallas entre los devanados de primario y secundario del transformador, el voltaje en el secundario del sistema puede ser tan alto como el voltaje primario.	Sección 3.2.1 página 38
En una falla a tierra en el circuito de control, sólo puede pasar el 58% del voltaje de línea en una bobina de un contactor conectado de línea a línea.	Una falla a tierra en el cableado del circuito de control igualmente pone un voltaje pleno en las bobinas cercanas al contactor.	Sección 3.2.1 y figura 3.11 página 35 y 38
CONFIABILIDAD DEL SERVICIO:		
Las fallas a tierra son rápidamente localizadas y reparadas. El sistema no necesita salir fuera de servicio para encontrar la falla a tierra. Minimiza sobrevoltajes transitorios en el sistema. Aterrizajes flotantes son bastante improbables.	Parte o todo el sistema debe ser sacado de servicio para encontrar la falla a tierra. Si las fallas a tierra no son removidas, puede presentarse una segunda falla. Probables aterrizajes flotantes o de arqueo.	Sección 4.1 página 53
COSTOS DE MANTENIMIENTO		
Fallas a tierra son fácilmente encontradas. Existe suspensión de inmediato.	Gastos de tiempo buscando fallas a tierra. No existe suspensión de inmediato.	Sección 5.3 página 73

CARACTERÍSTICAS DE SISTEMAS CON VARIOS MÉTODOS DE ATERRIZAJE

	No aterrizado	Aterrizaje esencialmente sólido	A través de reactancias	Neutralizador de falla a tierra	A través de Resistencia
	Sólido	Bajo valor de reactor	Alto valor de reactor		Resistencia
Corriente de falla de fase a tierra en porcentaje de la corriente trifásica	Menor que 1%	Varía puede ser 100% o más	5 a 25%	Corriente de falla cercana a cero	5 a 20%
Sobrevoltajes transitorios	Muy altos	No excesivos	Muy altos	Muy altos	Muy altos
Liberación automática de la zona de falla	No	Si	Si	No	Si
Pararrayos	Tipo neutro no aterrizado	Aplicación en sistema no aterrizado	Tipo neutro no aterrizado	Tipo neutro no aterrizado	Tipo neutro no aterrizado
Observaciones	No recomendable debido a sobrevoltajes y a la no liberación de la falla	Generalmente usado en sistemas de 600 V o menos	No usado debido a los excesivos sobrevoltajes	El más apropiado para líneas aéreas de alto voltaje	Generalmente usado en sistemas industriales de 24 a 15 KV

6. ANÁLISIS Y OPERACIÓN DE FUENTES NO ATERRIZADAS EN SISTEMAS ATERRIZADOS

6.1 OPERACIÓN DE FUENTES NO ATERRIZADAS EN SISTEMAS ATERRIZADOS

Al presentarse una falla en un sistema eléctrico de potencia con neutro sólidamente aterrizado, dicho sistema estará protegido contra la sobrecorriente asociada a la falla, mientras que el generador con neutro flotante, que sirve como fuente de emergencia, dependiendo de la conexión del mismo (estrella o delta) y de la fase en la cual se presenta la falla (A,B,C), el devanado del generador sufre por calentamiento hasta el punto de poder fundirse, ahora bien, si dicho devanado soporta el sobrecalentamiento existirán problemas mecánicos por el aumento de la fuerza centrífuga en el devanado de la falla; si aún así, el devanado soporta la corriente de falla y el exceso de fuerza centrífuga en él, puede ocurrir desbalance mecánico en el giro del rotor. Lo anterior sucedería si el generador de emergencia con neutro flotante que alimenta un sistema eléctrico aterrizado, no está protegido o tiene la calibración de sus protecciones en cero, por conveniencia para la continuidad del servicio y a la vez derivado de las prioridades que el usuario tenga en el sistema eléctrico.

6.2 ANÁLISIS DE FUENTES NO ATERRIZADAS EN SISTEMAS ATERRIZADOS

La primera consideración en el diseño de sistemas de potencia de emergencia y de reserva, es satisfacer las necesidades de continuidad del servicio eléctrico del usuario. El sistema de puesta a tierra utilizado y la disposición de los conductores de puesta a tierra del equipo y el sistema, afectarán la continuidad del servicio.

Los conductores de puesta a tierra y las conexiones deben disponerse de tal forma que las corrientes de fuga neutrales indeseables no existan y las corrientes de

falla a tierra circulen en caminos predecibles de baja impedancia, los cuales protegerán al personal de una electrocución y asegurará una adecuada operación del equipo de protección del sistema eléctrico.

Donde se necesite alimentar cargas de fase a neutro, los sistemas deben ir conectados sólidamente a tierra. Sin embargo, los sistemas de 600 y 480 V, pueden ir conectados a tierra por medio de una alta resistencia y no aterrizarlos cuando no se alimente cargas de fase a neutro.

Los sistemas puestos a tierra por una alta resistencia o los no puestos a tierra, pueden proveer un mayor grado de continuidad de servicio que los sistemas conectados sólidamente a tierra.

Donde se empleen conductores conectados a tierra como conductores del circuito en sistemas que tengan fuentes de potencia de emergencia o de reserva, el arreglo de conexión a tierra debe ser planificado cuidadosamente para evitar corrientes de fuga indeseables. Por ejemplo, corrientes de fuga neutrales y de falla a tierra en caminos conductivos no planeados e indefinidos, pueden causar errores serios de detección en el equipo de protección de falla a tierra. Una cita de prevención explica: *“donde el medio de desconexión del servicio provea de protección de falla a tierra y la interconexión sea hecha con otro sistema de suministro a través de un dispositivo de transferencia, algunos dispositivos pueden ser requeridos para asegurar una apropiada detección de falla a tierra por el equipo de protección de falla a tierra”*. (National Electrical Code, NEC, artículo 230-95)

6.3 RIESGOS DE LA UTILIZACIÓN DE FUENTES NO ATERRIZADAS EN SISTEMAS ATERRIZADOS

La utilización de fuentes no aterrizadas (generadores de emergencia) que alimenten sistemas eléctricos aterrizados depende en gran parte de las prioridades, que

del sistema eléctrico tenga el usuario. A veces el mejor diseño técnico de un sistema eléctrico de potencia con generadores de emergencia no aterrizados, tomando muy en cuenta las protecciones del sistema aterrizado y de la fuente de emergencia (generador) con neutro flotante, resulta no ser la mejor opción para el usuario del sistema eléctrico en general. Por ejemplo, en la mayoría de los hospitales que tienen generadores de emergencia, las calibraciones de las protecciones de los mismos están en cero debido a que al interrumpirse el servicio eléctrico que lo alimenta, el generador de emergencia es la única fuente de energía eléctrica con la cual se puede alimentar el sistema del hospital, razón por la cual debe tenerse plena seguridad y confianza de que dicho generador no saldrá del sistema por disparo de una protección del mismo, ya que esto implicaría grandes pérdidas materiales siendo aún peor las pérdidas humanas que por falta de electricidad puedan ocurrir. En este caso se prefiere desproteger el generador de emergencia de cualquier falla que pueda ocurrir en el sistema eléctrico que alimenta, (falla a tierra, doble línea a tierra, etc.), sufriendo el generador los daños asociados a los diferentes tipos de falla que puedan ocurrir, a dejar sin energía el sistema del hospital. De tal manera que se arriesga el generador de emergencia ya que es menor el grado de riesgo comparado con lo que sucedería si éste sale del sistema por protección del mismo. Lo descrito anteriormente se puede considerar un riesgo externo al sistema. Uno de los riesgos internos que se dan en el sistema, se presenta cuando se da una falla de tal magnitud que saca al sistema externo que abastece la instalación y el generador entra a operar.

6.4 PROTECCIÓN DE FUENTES NO ATERRIZADAS EN SISTEMAS ATERRIZADOS

Un generador de emergencia (independientemente de ser con neutro aterrizado o flotante) debe estar protegido contra lo siguiente:

1. Potencia inversa
2. Alta o baja frecuencia
3. Sobrecorrientes
4. Sobrevoltajes generados por rechazos de carga

En el caso de un generador de emergencia con neutro flotante, la calibración de las protecciones están en cero (en hospitales, industrias, etc.) como se explicó en el tema anterior.

CONCLUSIONES

1. En un sistema con neutro no aterrizado, una segunda falla a tierra puede ocurrir en otra fase del sistema antes de que la primera falla sea removida, esta segunda falla puede estar en el mismo circuito que la falla original o en otro circuito diferente del sistema, lo que produce una corriente de falla de fase a fase de gran magnitud que circulará a través de los conductores de puesta a tierra del equipo y activará el equipo de protección del sistema eléctrico.
2. La experiencia de operación con sistemas eléctricos aterrizados y no aterrizados, ha revelado que el porcentaje de falla es sustancialmente menor y el tiempo de fuera de servicio del sistema disminuye, en sistemas eléctricos aterrizados que en los no aterrizados.
3. Ventajas de un sistema aterrizado: menores costos de operación y mantenimiento, facilidad en la detección de fallas o perturbaciones del sistema y mayor seguridad para el personal y el equipo.
4. Los sistemas y sus conductores son puestos a tierra para limitar los voltajes debidos a descargas electroatmosféricas, sobretensiones de línea o contacto involuntario con líneas de alto voltaje y para estabilizar el voltaje a tierra en condiciones de operación normal.
5. Los sistemas y sus conductores son sólidamente conectados a tierra para facilitar la operación de los dispositivos de protección por sobrecorriente en caso de fallas a tierra.

6. La instalación de transformadores de potencial conectados en estrella aterrizada en sistemas no aterrizados, con una conexión en el secundario estrella o delta abierta, pueden ser los responsables de sobrevoltajes peligrosos como resultado de una acción de resonancia o ferresonancia, dado que la reactancia de magnetización de los transformadores de potencial llega a estar conectada a los conductores de fase a tierra.

7. Las múltiples puestas a tierra del neutro del circuito pueden causar indeseables corrientes neutrales que se desvíen y que provoquen que la corriente de falla a tierra, fluya por caminos que puedan afectar desfavorablemente la operación del equipo de protección de falla a tierra.

RECOMENDACIONES

1. Para un sistema de servicio suministrado hay que aterrizar el neutro del sistema en equipo de protección principal de la instalación eléctrica para asegurar una buena referencia a tierra, debido a que el usuario no tiene acceso al secundario del transformador que lo abastece de energía.
2. El neutro no debe conectarse a tierra en el lado de la carga, para evitar que se presenten corrientes de neutro indeseables.
3. Para prolongar la vida útil del equipo, reducir mediante la adecuada protección, la duración y/o la magnitud del esfuerzo de sobrevoltaje al que se ve sometido el aislamiento de un equipo.
4. Los conductores de puesta a tierra deben cumplir con las siguientes funciones básicas: tener suficiente capacidad para conducir con seguridad cualquier corriente de falla probable a que sean sometidos y tener una impedancia suficientemente baja para limitar el voltaje a tierra.
5. Analizar la aplicación de un sistema no aterrizado ya que estos presentan la característica de que al presentarse una falla, el sistema no se desenergiza y ello es muy útil en industrias que trabajan con procesos continuos, hornos, etc.
6. Se recomienda analizar para cada aplicación el pararrayos indicado considerando a la vez, si éste será instalado en un sistema aterrizado o no aterrizado, ya que existen coeficientes de aterrizaje para calcular los rangos de MCOV con los cuales se debe trabajar.



BIBLIOGRAFIA

1. Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg. **Power generation, operation and control.** USA: s.d.e.
2. Anderson M, Paul. **Analysis of faulted power systems, tomo I y II.**
USA: The Iowa State University Press/Ames, 1973.
3. Bishop, Jhon G. **Electrical maintenance hints, General Maintenance**
Volume 1. s.d.e.
4. Cisneros Chávez, Salvador. **Operación de sistemas de potencia eléctrica.**
Guatemala: ediciones del sector eléctrico, s.a.
5. Guerrero C., Rafael. **Cálculo de fallas en sistemas de potencia, s.d.e., 1978.**
6. Kaufman, R.H. and Halberg, Maynard N. **Sistem overvoltajes causes and protective measures. Chapter 5.**
s.d.e.
7. **National electrical code.** USA: editorial NFPA, 1987.
8. Olle I., Elgerd. **Electric energy systems theory: an introduction.**
México: McGraw-Hill, s.a.
9. S.D. Myers, J.J. Kelly, R.H. Parrish. **A guide to transformer maintenance.**
USA: s.d.e.
10. Westinghouse Electric Corporation. **Electrical transmission and distribution reference book.** USA: Central Station Engineers, s.a.

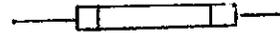
ANEXO

A continuación se hace mención de algunos símbolos normalizados usados en diagramas unifilares.

Transformador de potencia
de dos devanados



Fusible



Transformador de corriente



Transformador de tensión



Interruptor de circuitos de potencia en aceite



Interruptor de circuito de aire



Conexión trifásica en delta



Conexión trifásica en estrella



Conexión trifásica en estrella con neutro a tierra

