

6. CORRIENTE INYECTADA A UN SISTEMA DE CONEXIÓN A TIERRA

Una de las principales variables en el diseño de un SCT es la corriente de falla, o fracción de ésta, que se inyecta al SCT y que tiene como camino de retorno hacia al fuente el terreno. Como principales fallas que pueden inyectar corriente al terreno se tiene la falla de una fase a tierra y de dos fases a tierra. Se ha hecho costumbre generalizada el estudio solo para el caso de una falla de una fase a tierra debido a que es la mas probable de ocurrir, de hecho las estadísticas indican que la falla que ocurre con mas frecuencia en los sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica es la falla de una fase a tierra. Por eso de aquí en adelante cuando se hable de corriente de falla se sobreentiende que se está refiriendo a la corriente de falla de una fase a tierra.

Antes de la publicación de la norma IEEE 80-1986 se utilizaba para el diseño de SCT la máxima corriente de falla de una fase a tierra obtenida en el punto de instalación del SCT. No se tomaba en cuenta los caminos alternos de retorno representados por los cables de guarda y las conexiones metálicas entre el punto de la falla y su punto de retorno a la fuente. A raíz de la profusa investigación llevada a cabo en la década de los años 70 se ha reconocido que ésta práctica conduce a diseños sobredimensionados. De acuerdo a la instalación eléctrica (subestación, torre de transmisión, etc.) donde el SCT va a cumplir sus funciones, pueden existir caminos alternos para el retorno por el terreno de la corriente de falla. Por esta razón se deben diferenciar los casos mas comunes para el camino de retorno de la corriente de falla:

- ❑ Subestaciones con circuitos sin conductores de guarda
- ❑ Subestaciones con circuitos con conductores de guarda

CASO 1: Subestaciones con circuitos sin conductores de guarda

En este tipo de instalaciones podemos considerar como ejemplo mas específico las subestaciones de distribución donde entran y salen circuitos aéreos sin conductores de guarda. Generalmente éstas subestaciones poseen transformadores en conexión $\Delta - Y$ con el neutro sólidamente conectado a tierra. Ver figura 6.1.

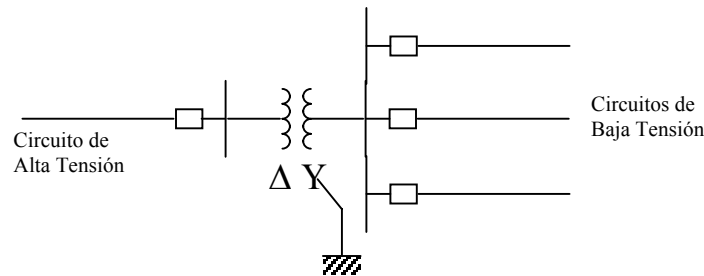


Fig. 6.1 Subestación de Distribución

Cuando una falla a tierra dentro de la subestación involucra un camino de retorno por medio de una estructura conductiva que esté conectada al SCT de la subestación, toda la corriente de falla retornará a través de éste camino. Ver figura 6.2. Bajo esta condición no existe corriente de falla o fracción de ésta que se inyecte al terreno, en consecuencia no existe un perfil de voltajes sobre el terreno que genere condiciones de riesgo para las personas. Sin embargo si alguna persona está en contacto con los conductores que transportan la corriente de fallo puede sufrir quemaduras por el calor generado en éstos conductores, ya que generalmente es el máximo valor de corriente de falla que se puede presentar en la subestación. Así mismo los conductores que tienen la responsabilidad de transportarla deben tener la capacidad de soportarla, sin perjuicio de sus características conductivas y/o mecánicas. De igual manera las conexiones auxiliares utilizadas para interconectar los equipos de la instalación al SCT y para la interconexión misma de los conductores que conforman el SCT.

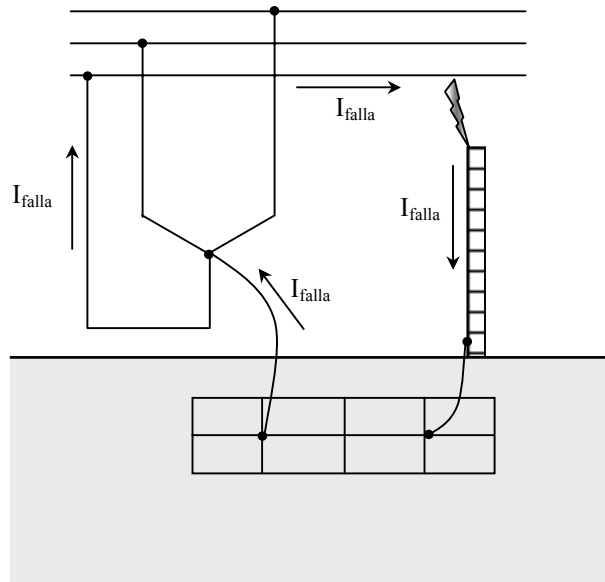


Fig. 6.2 Falla de una fase a tierra dentro de la subestación

Si la falla de una fase a tierra ocurre fuera de la subestación en la primera torre o poste de alguno de los circuitos conectados en el lado de baja tensión de la figura 6.1, la corriente de falla no tienen otra alternativa que retornar por el terreno por medio del SCT del poste o torre y del SCT de la subestación. Generalmente ésta es la condición que genera la máxima corriente que retorna por el terreno, si la falla ocurre en torres o postes subsiguientes se incrementa la impedancia agregada por el conductor de fase limitando el valor de la corriente.

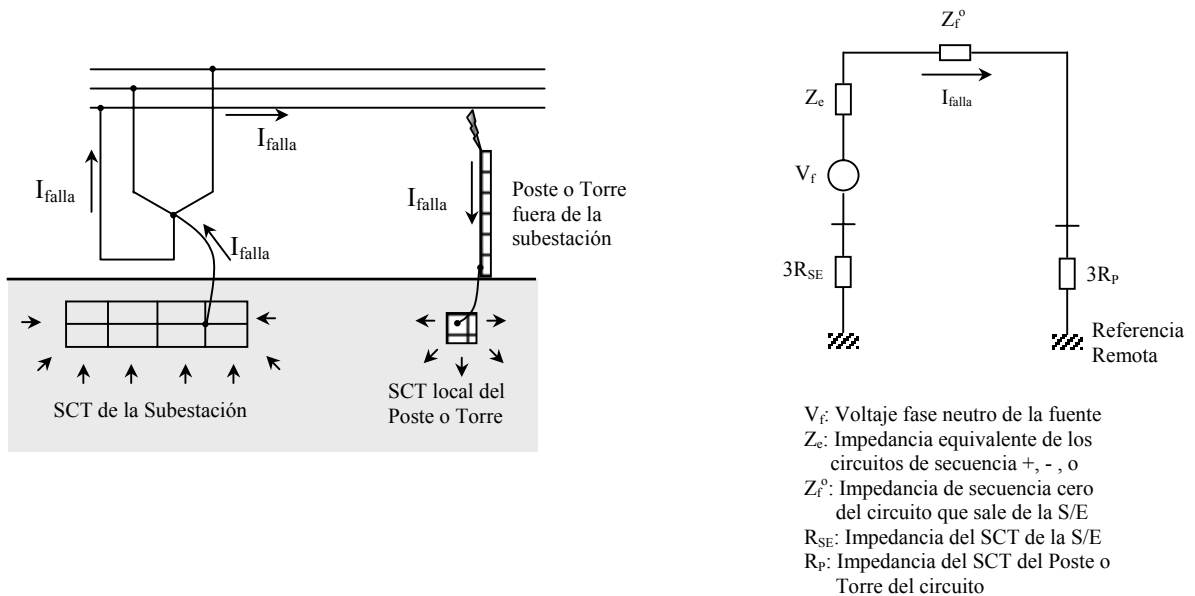


Fig. 6.3 Falla de una fase a tierra fuera de la subestación y circuito equivalente

En este caso toda la corriente de falla retorna por el terreno generando perfiles de voltaje sobre la superficie del terreno tanto en la subestación como en la inmediaciones de la torre o poste. Como el SCT de la torre o poste generalmente es de menores dimensiones que el SCT de la subestación, las condiciones de seguridad en las inmediaciones de la torre o poste son más críticas y se les debe prestar la atención adecuada. Para la determinación de la corriente de falla se debe considerar el efecto limitador sobre esta corriente que ejercen tanto la impedancia o *resistencia a tierra* del SCT del poste o torre y la impedancia del SCT de la subestación. De acuerdo al circuito mostrado en la figura 6.3 la corriente de falla de una fase a tierra estará determinada por:

$$I_{\text{falla}} = \frac{V_f}{Z_e + Z_f^0 + 3R_{SE} + 3R_P} \quad (6.1)$$

Donde:

V_f : Voltaje fase neutro de la fuente

Z_e : Impedancia equivalente de los circuitos de secuencia +, -, o

Z_f^0 : Impedancia de secuencia cero del circuito que sale de la S/E

R_{SE} : Impedancia o Resistencia a Tierra del SCT de la S/E

R_P : Impedancia o Resistencia a Tierra del SCT del Poste o Torre del circuito

En los cálculos de cortocircuito tradicionales se ha hecho costumbre generalizada no considerar el efecto limitador de las resistencias a tierra de los SCT involucrados en el camino de retorno de la corriente de falla. Esta costumbre da como resultados valores de corriente conservadores para la selección de los equipos de interrupción, maniobra y para la selección de la capacidad de corriente de cortocircuito de los conductores y conexiones de la instalación. Sin embargo desde el punto de vista de las protecciones los valores de R_{SE} y R_P pueden limitar las corrientes de falla a tierra a valores tales que retarden la operación de las protecciones, incluso llegando al extremo de inhibir la operación de las protecciones. Este aspecto es de importancia capital para la seguridad de personas especialmente en circuitos de transmisión o distribución que atraviesan zonas urbanas. En conclusión se debe garantizar que las protecciones, especialmente las de sobrecorriente, se coordinen y ajusten para que actúen bajo la condición de corriente de falla limitada por los valores de R_{SE} y R_P . Es importante reconocer que estos valores R_{SE} y R_P no tienen un valor único determinado, ellos son de naturaleza aleatoria ya que su valor depende de las variaciones de la resistividad del terreno de acuerdo a la época de sequía o de lluvias. Lo recomendable es tener información acerca de los valores de R_{SE} y R_P midiéndolas en diferentes épocas del año para obtener una muestra estadística de su valor y estimar el valor elevado más probable.

CASO 2: Subestaciones con circuitos que poseen conductores de guarda

Los conductores de guarda se utilizan en circuitos de transmisión y subtransmisión que operan a voltajes mayores o iguales a 69 kV. La presencia de los conductores de guarda en los circuitos que entran o salen de una subestación es beneficiosa desde el punto de vista de la fracción de la corriente de falla que retorna por el terreno hacia la fuente. Como es práctica generalizada el conductor de guarda se conecta a cada torre o poste del circuito, él cual está conectado a tierra mediante un SCT local; a su vez el conductor de guarda se conecta al SCT de la subestación de donde parte o llega el circuito. Por lo tanto cuando ocurre una falla de una fase a tierra en una torre o poste la corriente de falla tiene diferentes caminos de retorno hacia la fuente: el conductor de guarda y el terreno por medio de los SCT de la torre o poste bajo fallo y el SCT de la subestación. La mayor parte de la corriente retorna por el conductor de guarda, la fracción de la corriente de falla que retorna por el terreno depende de los valores de las resistencias o impedancias a tierra de los SCT de las torres y postes y del SCT de la subestación. Paradójicamente con la presencia del conductor de guarda valores elevados de las impedancias o resistencias a tierra de los SCT de los postes o torres son beneficiosos para el SCT de la subestación, ya que será menor la fracción de corriente de falla que retorne por el terreno. Sin embargo es ampliamente conocido que la efectividad del conductor de guarda para evitar la salida forzada del circuito por la descarga de un rayo sobre él, depende del valor transitorio de la resistencia a tierra del SCT de la torre o poste. Mientras este valor sea menor más efectiva es la protección brindada por el conductor de

guarda, su valor máximo está condicionado por el nivel de aislamiento del circuito. En la figura 6.4 se ilustra la distribución de la corriente de falla en una torre en un circuito con un conductor de guarda .

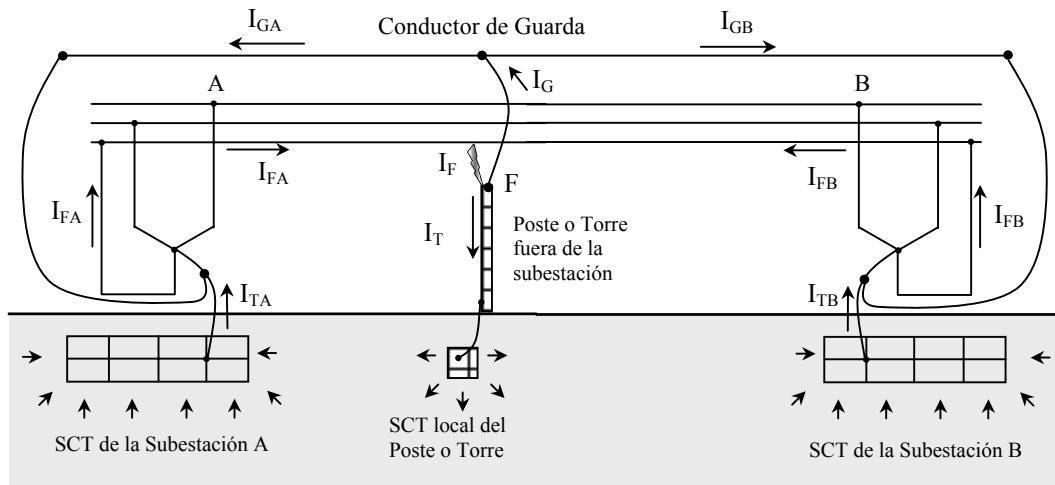


Fig. 6.4 Falla de una fase a tierra en la torre en un circuito con conductor de guarda

La corriente total de fallo I_F tiene dos vías para retornar a la fuente: mediante el conductor de guarda, y mediante el terreno a través de los postes o torres conectados al conductor de guarda. Las fuentes aportan cada una su contribución I_{FA} e I_{FB} a la corriente de fallo total I_F . Ésta última a su vez se divide en I_G e I_T . En cada punto de conexión entre el conductor de guarda y cada torre existirá una división de la corriente entre la torre y el conductor de guarda del vano subsiguiente. En la figura 6.5 se muestra el circuito equivalente de la fase bajo falla de la situación ilustrada en la figura 6.4

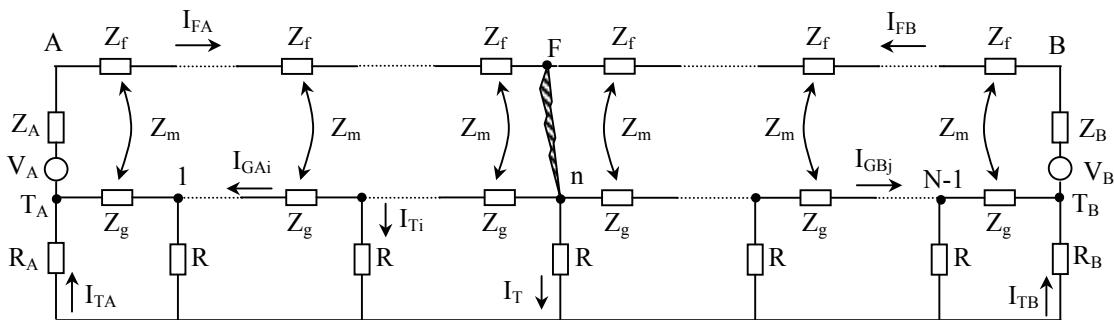


Fig. 6.5 Circuito equivalente de la fase bajo falla a tierra en la torre n

En la figura 6.5:

- Z_A, Z_B : Impedancias equivalentes de Thevenin en A y B respectivamente
- V_A, V_B : Voltaje de Thevenin en A y B respectivamente
- R_A, R_B : Resistencias a tierra de los SCT en A y B respectivamente
- R : Resistencia a tierra de las torres, se asume igual R para cada torre
- Z_f : Impedancia propia del conductor de fase por cada de vano Ω/vano
- Z_g : Impedancia propia del conductor de guarda por cada de vano Ω/vano
- Z_m : Impedancia mutua entre el conductor de fase y el conductor de guarda por cada de vano Ω/vano

Las corrientes de falla por cada vano del conductor de guarda y por cada torre son diferentes, debido a la derivación hacia el terreno de una fracción de la corriente del conductor de guarda por la conexión a tierra de la torre. La determinación de éstas corrientes y la corriente de falla que circula por el conductor de fase se complica por la presencia de las torres y el acoplamiento magnético mutuo Z_m entre el conductor de fase y el conductor de guarda. Es práctica común no tomar en cuenta el acoplamiento eléctrico entre estos dos conductores en este tipo de cálculos. Debido a la presencia del conductor de guarda, el cálculo de la corriente de falla en forma aproximada sin tomar en cuenta la presencia de las torres, arroja resultados muy similares a los obtenidos por el cálculo exacto tomando en consideración la conexión a tierra de las torres[2]. Esto se debe al hecho que gran parte de la corriente de falla retorna por el conductor de guarda por ser éste un camino de menor impedancia, y a que el acoplamiento magnético entre los conductores de fase y guarda es mas fuerte que el que existe entre el conductor de fase y el terreno. Por esta razón se va a partir de la premisa que las corrientes I_{FA} e I_{FB} ya se conocen de estudios de cortocircuito hechos en forma convencional.

Desde el punto de vista de seguridad para el diseño de SCT de la subestación A o B interesa determinar la corriente I_{TA} o I_{TB} que entra al SCT vía terreno. De igual forma para los SCT de las torres o postes interesa determinar la corriente I_T que se inyecta al terreno en la torre donde ocurre el fallo. Esto implica determinar la distribución de corrientes en la red circuital conformada por el cable de guarda y las torres. Desde el punto de vista de los componentes simétricos, los únicos componentes de corriente que entran a ésta red circuital son los componentes de secuencia cero. Por esta razón puede ser ventajoso estudiar la solución del problema de la distribución de corrientes mediante el método de los componentes simétricos. Asumiendo transposición total de la línea de transmisión se pueden determinar las impedancias serie de secuencia de la línea. Para cada fuente en los puntos A y B se deben conocer sus equivalentes de Thevenin en la respectiva secuencia. Así en componentes de secuencia se obtiene el circuito de la figura 6.6

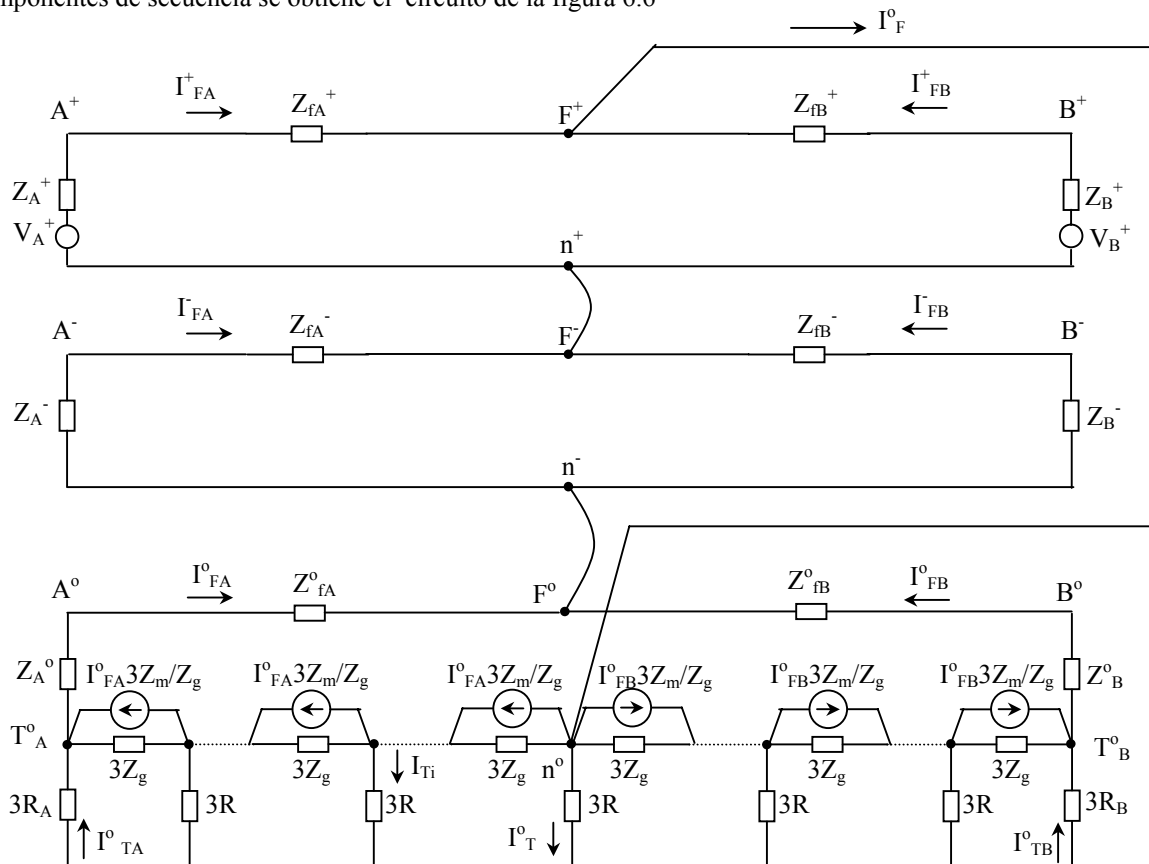


Fig. 6.6 Circuito de secuencias para una falla a tierra en la torre **n**

En la figura 6.6:

$Z_A^+, Z_B^+, Z_A^-, Z_B^-, Z_A^0, Z_B^0$: Impedancias equivalentes de Thevenin de secuencia positiva negativa y cero en A y B

$I_{FA}^+, I_{FB}^+, I_{FA}^-, I_{FB}^-, I_{FA}^0, I_{FB}^0$: Contribuciones de las corrientes de secuencia de ambos lados de la falla

$Z_{fA}^+, Z_{fB}^+, Z_{fA}^-, Z_{fB}^-, Z_{fA}^0, Z_{fB}^0$: Impedancias de secuencia de la línea de transmisión en la longitud del tramo de línea entre A(B) y F

Z_g : Impedancia del conductor de guarda en Ω /vano

Z_m : Impedancia mutua en Ω /vano entre el conductor de fase y el conductor de guarda asumiendo que la línea esta totalmente transpuesta.

R_A, R_B : Resistencias a tierra de los SCT en A y B respectivamente

R : Resistencia a tierra de las torres, se asume igual R para cada torre

Siguiendo el procedimiento de [2,4], el circuito de la figura 6.6 se puede reducir a una forma mas sencilla. En primer lugar en el punto F^+ se puede determinar un equivalente de Thevenin de secuencia positiva con su respectiva fuente. En el punto F^- se puede determinar una impedancia equivalente de Thevenin de secuencia negativa. En la red circuital del conductor de guarda se ha reemplazado el efecto mutuo de secuencia cero entre el conductor de guarda y el conductor de fase por una fuente de corriente. Partiendo de la premisa que se conocen las contribuciones de secuencia cero de ambos lados del punto de falla F^0 éstas fuentes de corrientes son conocidas. Como se puede observar todas las fuentes tienen la misma cantidad de corriente a cada lado, bajo la condición que todos los vanos sean de la misma longitud. Entonces el efecto de estas fuentes en el lado A^0 se puede reemplazar por una sola fuente de corriente entre T_A^0 y la torre de falla n como se muestra en la figura 6.7. De igual forma las fuentes de corriente entre T_B^0 y la torre de falla n

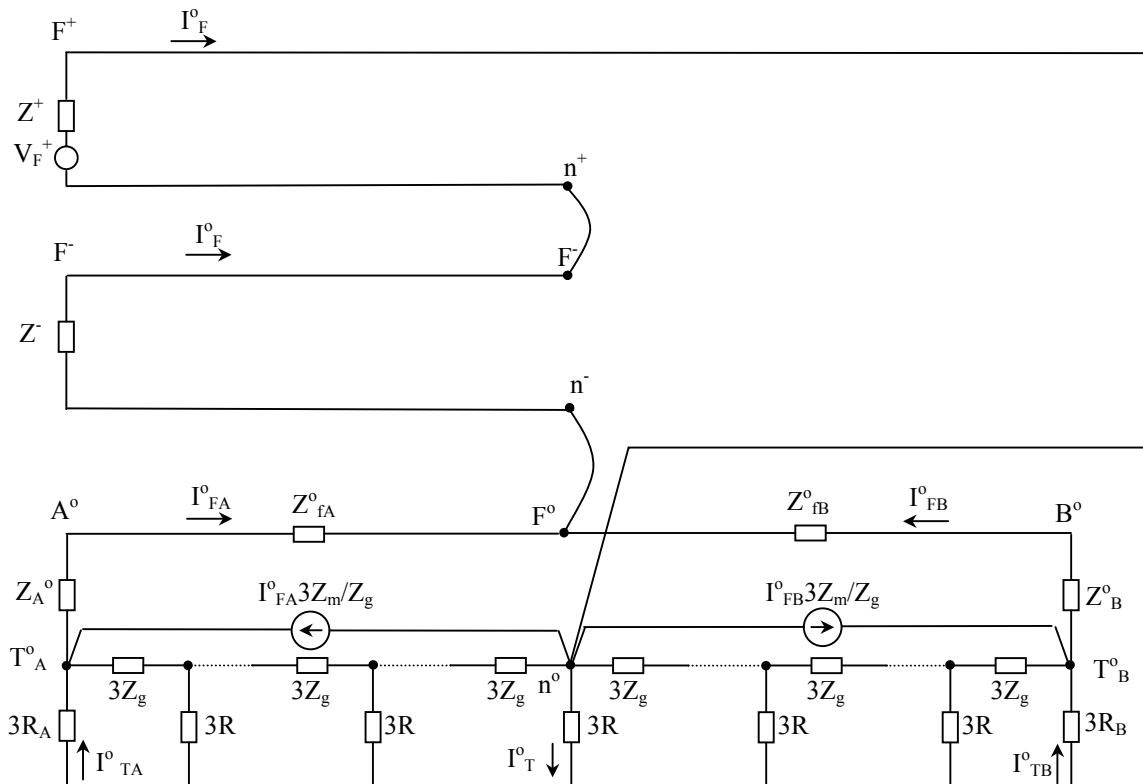


Fig. 6.7 Reducción del circuito de secuencias de la figura 6.6

En la figura 6.7:

Z^+ , Z^- : Impedancias equivalentes de Thevenin en F^+ y F^- .
 V^+ : Voltaje de Thevenin en F^+ .

La red circuital conformada por las resistencias a tierra de cada torre R y la impedancia del conductor de guarda por vano Z_g ha sido manejada en [3] como una red en escalera con parámetros discretos. Es posible representar la red en escalera a cada lado de la falla mediante un circuito en π [3]. Así es posible obtener una simplificación adicional del circuito de la figura 6.7. Ésta simplificación adicional se muestra en la figura 6.8

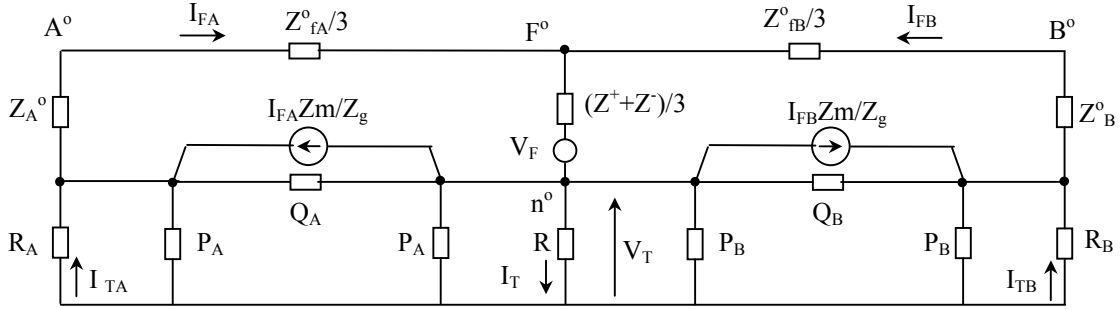


Fig. 6.8 Circuito simplificado de la figura 6.7

En el circuito de la figura 6.8:

Si T_A es el nodo 0 de la red en escalera, T_B el nodo N y n la torre bajo falla, entonces:

$$Q_A = \frac{k^{2n} - 1}{k^n + k^{n+1}} Z_\infty \quad (6.1)$$

$$P_A = \frac{k^n + 1}{k^n - k} Z_\infty \quad (6.2)$$

donde:

$$Z_\infty = \frac{Z_g}{2} + \sqrt{R Z_g + \frac{Z_g^2}{4}} \quad (6.3)$$

$$k = 1 + \frac{Z_\infty}{R} \quad (6.4)$$

Para determinar Q_B y P_B se utilizan las expresiones 6.1 y 6.2 pero sustituyendo n por $m = N - n$. Obsérvese que los valores P y Q son impedancias. Conocidos I_{FA} e I_{FB} a partir de un cálculo de cortocircuitos convencional, mediante la teoría de circuitos se pueden determinar las corrientes I_{TA} , I_{TB} e I_T , y el potencial V_T de la torre bajo falla.

Selección de Conductor y Conexiones por Capacidad de Corriente

La selección final del calibre del conductor y la máxima temperatura permitida en las conexiones se debe tomar en cuenta las siguientes consideraciones[1]:

- Cada elemento del Sistema de Conexión a Tierra: conductor, conexiones, etc., debe seleccionarse para una duración igual a la vida útil de la instalación.
- Cada punto de conexión de elementos del SCT debe tener la mínima resistencia de contacto posible. Por ello la tendencia moderna es la utilización de conexiones exotérmicas.
- Cada conductor y conexión debe tener la suficiente capacidad térmica y mecánica para soportar sin menoscabo de sus propiedades conductoras la máxima situación de corriente de falla - tiempo prevista.
- Los conductores y conexiones deben ser mecánicamente resistentes en alto grado para resistir impactos y tensiones mecánicas a los que pueden estar sometidos de una manera accidental.
- Los conductores y conexiones deben ser capaces de soportar el fenómeno de corrosión.

El material utilizado por excelencia para los conductores de un SCT es el cobre. El cobre tiene un nivel de conductividad alto además de ser resistente a la corrosión. Para barras verticales se utilizan barras de acero cubiertas con una capa de cobre que se coloca electrolíticamente sobre la superficie. No se recomiendan barras de cobre con chaquetas de cobre superpuestas mecánicamente sobre la barra de acero, porque en el momento de la instalación ésta chaqueta se deteriora fácilmente. Sin embargo debido a que el cobre es catódico respecto a la mayoría de los metales que pueden estar presentes en la instalación, tiende a formar células galvánicas con estructuras, tuberías etc., por lo que su presencia puede empeorar el ambiente corrosivo para los metales presentes diferentes de cobre, Para evitar el efecto corrosivo del cobre sobre otros metales se han utilizado diferentes alternativas que incluyen protección con materiales aislantes de las partes metálicas susceptibles a la corrosión o protección catódica. Existen experiencias de algunas compañías que han utilizado con éxito acero galvanizado para sus SCT.

El mínimo calibre del conductor se selecciona tomando en cuenta el efecto de calentamiento que tiene la corriente eléctrica sobre el material. El problema entonces es cuanta corriente circula por el conductor y por cuanto tiempo. Esta sería la fuente de generación de calor. Para los tiempos de despeje de la falla que se manejan se asume que prácticamente no existe intercambio de calor con el medio. La máxima corriente permitida por un conductor cilíndrico de sección A mm² se puede determinar mediante la siguiente fórmula[1]:

$$I = A \sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t \cdot \alpha_r \cdot \rho_r} \right) \ln \left(\frac{K_o + T_m}{K_o + T_a} \right)} \quad (6.5)$$

donde:

I: corriente rms en kA

A: sección transversal del conductor en mm²

T_m: Máxima temperatura permitida en el conductor o conexiones en °C

T_a: Temperatura ambiente en °C

T_r: Temperatura de referencia para constantes del material en °C

α_o: coeficiente térmico de la resistividad a 0 °C

α_r: coeficiente térmico de la resistividad a la temperatura de referencia T_r

ρ_r: Resistividad del material del conductor a la temperatura de referencia T_r en μΩ-cm

K_o: 1/α_o

t: tiempo de despeje de la falla (tiempo del relé más tiempo del interruptor) en segundos

TCAP: factor de capacidad térmica en J/cm³/°C

En la tabla 6.1 se dan los valores necesarios en 6.5 para diferentes materiales.

Tabla 6.1 Constantes de materiales[1]

Material	Conductividad del material(%)	α_r a 20 °C	K_o a 20 °C	Temperatura de fusión (°C)	ρ_r a 20 °C ($\mu\Omega$ -cm)	TCAP ($J/cm^3/^\circ C$)
Standard Annealed Soft Copper Wire	100	0,00393	234	1083	1,7241	3,422
Commercial Hard Drawn Cooper Wire	97,0	0,00381	242	1084	1,7774	3,422
Copper-Clad Steel Core Wire	40,0	0,00378	245	1084/1300	4,397	3,846
Copper-Clad Steel Core Wire	30,0	0,00378	245	1084/1300	5,862	3,846
Commercial EC Aluminum Wire	61,0	0,00403	228	657	2,862	2,556
Aluminum Alloy Wire 5005	53,5	0,00353	263	660	3,2226	2,598
Aluminum Alloy Wire 6201	52,5	0,00347	268	660	3,2840	2,598
Aluminum-Clad Steel Core Wire	20,3	0,00360	258	660/1300	8,4805	2,670
Zinc coated Steel Core Wire	8,5	0,00320	293	419/1300	20,1	3,931
Stainless Steel No. 304	2,4	0,00130	749	1400	72,0	1,032

La máxima temperatura permitida T_m depende del tipo de conexión utilizada. Para conexiones mecánicas no se recomienda una temperatura mayor de 250-350 °C. Las conexiones exotérmicas se funden prácticamente con el conductor, por lo tanto son consideradas como parte misma del conductor con idénticas características.

La corriente de falla que debe estimarse para los conductores y conexiones es la máxima corriente posible que pueda circular por ellos. En este caso la máxima corriente posible se consigue para una falla a tierra dentro de la instalación que va a retornar por los conductores y conexiones del SCT

Efecto de la Asimetría de la corriente de Falla

Los cálculos de cortocircuito generalmente se hacen asumiendo la reactancia subtransitoria de los generadores sincrónicos, y tomando en cuenta la contribución de los motores de inducción durante eeste periodo subtransitorio. Por lo tanto un cálculo de cortocircuito suministra la corriente subtransitoria simétrica de 60 Hz. Dependiendo del momento al cual ocurre el cortocircuito puede existir un componente de corriente continua superpuesto sobre la corriente simétrica, que produce la asimetría asociada a las corrientes de cortocircuito en circuitos inductivos. Existe un momento de naturaleza aleatoria para el cual el componente de continua tiene un valor máximo produciendo la máxima asimetría en el punto de falla. Para tomar en cuenta el efecto de la corriente asimétrica sobre una persona, el IEEE-80-1986 ha definido un valor de corriente

simétrico con la misma energía de la corriente asimétrica en un periodo de tiempo determinado. De esta forma propone la siguiente expresión para determinar ésta corriente simétrica equivalente I_F :

$$I_F = I_f \cdot D_f \quad (6.6)$$

Donde D_f se le denomina **Factor de Decremento de la Corriente Asimétrica** y se determina mediante la siguiente expresión:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} (1 - e^{-t_f/T_a})} \quad (6.7)$$

Donde:

t_f : tiempo de duración de la falla en s

T_a : Constante subtransitoria equivalente del sistema en el punto de falla igual a $X/(120\pi R)$

La relación X/R para T_a es la relación equivalente vista desde el punto de la falla con las reactancias subtransitorias de las máquinas sincrónicas. Valores típicos de X/R oscilan entre 10 y 20 para Sistemas de Potencia en Alta Tensión (>115 kV). En la medida que el nivel de voltaje baja la relación X/R disminuye. Para tiempos de falla mayores o iguales a 0,5 s el periodo subtransitorio ha expirado y la corriente de cortocircuito ha decaído al periodo transitorio compensando el efecto de asimetría del componente de corriente continua, por lo tanto un valor del lado conservador para $D_f = 1,0$ es suficiente.

La corriente I_F es la corriente que se debe utilizar para determinar el perfil de voltajes generado por el SCT cuando ésta corriente retorna por el terreno hacia la fuente.

Corrientes de Diseño a Largo Plazo

En general las corrientes de cortocircuito varían en el tiempo debido a las modificaciones topológicas que sufre la red de interconexiones del sistema de potencia y al incremento de la capacidad de generación. En consecuencia todo diseño de un Sistema de Conexión a Tierra debe hacerse con la corriente de cortocircuito prevista a largo plazo donde se incluyan los posibles cambios previstos a futuro.

Referencias

- [1] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding ANSI/IEEE Std. 80-1986, New York, IEEE/Wiley, 1986.
- [2] L. Popovic: "Practical Method for Evaluating Ground Fault Current Distribution in Station, Towers and Ground Wires", IEEE trans. on Power Delivery, vol. 13, No. 1, pp.123-128, January 1998.
- [3] L. Popovic: "General Equations of the Line by Discrete Parameters, Par I – Steady State", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 6, No. 1, pp.123-128, January 1991.
- [4] S. Sobral, V. Costa, M. Campos y D. Mukhedkar: "Dimensioning of Nearby Substations Interconnected Ground Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 3, No. 4, pp.1605-1614, October 1988