

#### 4. CRITERIOS PARA EL MAXIMO VALOR DE RESISTENCIA A TIERRA

Tradicionalmente el máximo valor de resistencia a tierra se ha utilizado para especificar uno de los requisitos que debe satisfacer un SCT. Este valor como criterio único de diseño puede aceptarse en aquellas instalaciones donde la probabilidad que una persona esté en las inmediaciones sea muy baja, como por ejemplo las torres de líneas de transmisión que atraviesan zonas deshabitadas. No existe un valor de resistencia a tierra específico para cada tipo de instalación, lo que generalmente se conoce en la literatura son valores recomendados. El máximo valor permitido de resistencia a tierra será aquel que permita la circulación de corrientes de fallas a tierra de tal magnitud, que los dispositivos de protecciones seleccionado pueda detectar la falla y dar la orden correspondiente de alarma o disparo de los equipos de maniobra. Adicionalmente el valor de los sobrevoltajes originados por fallas a tierra depende de la resistencia a tierra de los sistemas de conexión a tierra en la fuente y en el punto de interés

En el caso de líneas de transmisión con cables de guarda el máximo valor de resistencia a tierra lo impone el nivel de aislamiento de la línea. Es oportuno aclarar que este valor de resistencia a tierra corresponde a la respuesta transitoria de un SCT a un impulso de corriente de forma especificada. El valor máximo se obtiene a partir del nivel de aislamiento y el valor pico de la fracción de la corriente de descarga de un rayo que se deriva a tierra cuando un rayo golpea a la estructura de apoyo de la línea.

#### Valor Máximo de Resistencia a Tierra Determinado por los Dispositivos de Protección

Cuando ocurre una falla de aislamiento que involucra un camino de retorno por el terreno la corriente de falla, o una fracción de esta, drena hacia el suelo por medio del SCT involucrado en el punto de la falla; y a su vez retorna a la fuente por medio del SCT local de la fuente.

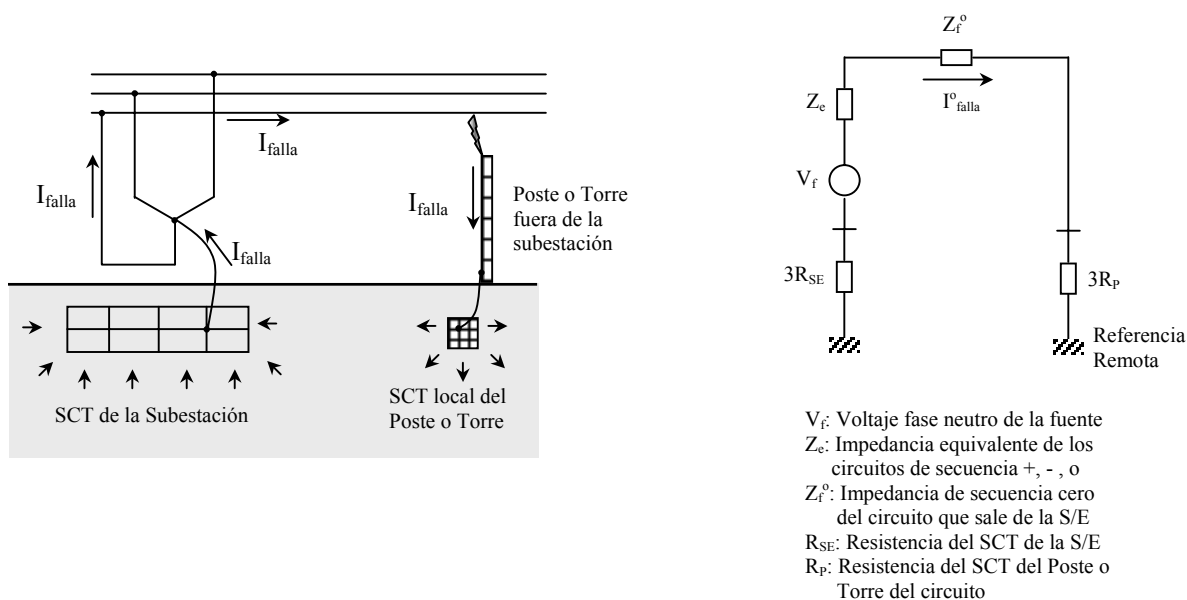


Fig. 4.1 Retorno de la corriente de falla por el suelo

En la figura 4.1 se ilustra como la resistencia a tierra de la fuente en la subestación y la resistencia a tierra local en el punto de falla intervienen limitando la corriente de falla. De acuerdo al circuito equivalente mostrado en la figura 4.1 la corriente de fallo está determinada mediante la siguiente expresión:

$$I_{falla}^o = \frac{V_f}{Z_e + Z_f^o + 3R_{SE} + 3.R_p} \quad (4.1)$$

Donde

$V_f$ : Voltaje fase neutro de la fuente

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

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

$R_{SE}$ : Resistencia del SCT de la S/E

$R_p$ : Resistencia del SCT del Poste o Torre del circuito

Aunque es costumbre para bajas frecuencias emplear el término de Resistencia a Tierra, éste se ajusta rigurosamente solo para corriente continua. En general debe reconocerse que un SCT presenta una impedancia a tierra.

Para un dispositivo de sobrecorriente ajustado para operar a un valor de corriente  $I_{op}$ , el máximo valor de la resistencia combinada ( $R_{SE} + R_p$ ) está determinado por:

$$\left| Z_e + Z_f^o + 3(R_{SE} + R_p) \right| \leq 3 \cdot \left| \frac{V_f}{I_{op}} \right| \quad (4.2)$$

### Valor Máximo de Resistencia a Tierra Determinado para Líneas de Transmisión con Conductores de Guarda

El fenómeno asociado a la descarga de rayos sobre líneas de transmisión de potencia eléctrica con conductores de guarda, es un fenómeno que involucra eventos electromagnéticos complejos con campos electromagnéticos que varían rápidamente con el tiempo, física de la descarga disruptiva en gases, además existir efectos no lineales como el desarrollo del efecto corona en los conductores, torres de la línea de transmisión; y especialmente el aspecto relacionado con la respuesta transitoria del Sistema de Conexión a Tierra(SCT) de la torre. Este último es dependiente de la intensidad de la corriente, frecuencia y puede estar sujeto al ionización del terreno adyacente al SCT. Cuando un rayo incide sobre una torre con su cable de guarda es importante estimar la respuesta en el tiempo del voltaje desarrollado en la torre con la finalidad de determinar el sobrevoltaje que puede aparecer en una cadena de aisladores que sostienen el conductor de fase. Si este sobrevoltaje iguala o supera la curva voltaje - tiempo del aislamiento de la línea entonces existe una probabilidad de ocurrencia de un arco superficial(flashover) sobre la cadena de aislamiento. En la medida que el sobrevoltaje generado por la corriente de descarga del rayo sea mayor, la probabilidad de falla se eleva.

El valor de resistencia a tierra del SCT de la torre interviene en la **Salida Forzada de Operación de la Línea** por descarga retroactiva (back - flashover). Entendiéndose por salida forzada de la línea la generación de un arco en el aislamiento de la línea que no se autoextingue, y que requiere una desconexión o salida de operación de la línea para poder extinguirse.

La evaluación del número de salidas forzadas por kilometro de línea y por año de operación, conocida como **Tasa de Salidas Forzadas(TSF)**, se puede hacer mediante el procedimiento propuesto en [1]. Para una línea de transmisión con conductor de guarda la tasa de salidas forzadas depende de dos hechos:

- ❑ Falla del apantallamiento provisto por el conductor de guarda que involucra al número de rayos que no son interceptados por el conductor de guarda y descargan sobre el conductor de fase provocando salidas forzadas de la línea.
- ❑ Descarga Retroactiva que ocurre cuando el conductor de guarda intercepta el rayo, pero la corriente en su camino de descarga de por la torre hacia el terreno genera un voltaje que se desarrolla en el tiempo en la cadena de aisladores. De acuerdo a la magnitud de la corriente y su forma de crecimiento hacia su valor máximo, éste voltaje puede provocar un arco y la respectiva salida forzada de la línea.

Para determinar estadísticamente la Tasa de Salidas Forzadas y evaluar la influencia de la resistencia a tierra del SCT de la torre se va a seguir la metodología propuesta en [1]. En primer lugar se debe determinar las

salidas forzadas debida a las fallas del apantallamiento, para poder discriminar las salidas forzadas originadas por la descarga retroactiva. Posteriormente se determinan las salidas forzadas debidas a las descargas retroactivas, donde sí interviene el valor de la resistencia a tierra del SCT de la torre.

**Salidas Forzadas Debidas a Fallas del Apantallamiento**

El procedimiento a seguir está detallado paso por paso en [1] y se muestran a continuación:

**Paso 1: Geometría de la línea**

Es imprescindible conocer la geometría de la línea con datos precisos de ubicación de los conductores de fase y guarda, dimensiones de la torre y brazos de la misma. Es obvio que pueden existir diferentes tipos de torres en una línea de transmisión. Se puede tomar como relevante el tipo de torre más numeroso.

**Paso 2: Nivel Cerámico T Número de días tormenta/año**

El nivel cerámico es el número de día/año en el cual se oye al menos un trueno en un período de 24 horas. Cuando se oye un trueno se dice que es un día de tormenta.

**Paso 3: Número de Rayos que inciden sobre el terreno N**

Se reconoce que el nivel cerámico no discrimina si el trueno oído se debe a rayos entre nubes o a rayos nube - tierra. Las investigaciones hechas correlacionando los niveles cerámicos con la información proporcionada por redes de detección de rayos a tierra se ha podido establecer en primer lugar que el número de rayos que descargan nube – tierra es proporcional al nivel cerámico. Esta proporción se ha estimado entre 0,1T y 0,19T. En [1] se sugiere utilizar:

$$N = 0,12 T \text{ rayos a tierra/km}^2/\text{año} \tag{4.3}$$

**Paso 4: Calcule la altura media del Conductor de Guarda Y<sub>G</sub>**

$$Y_G = h_g - \frac{2}{3} f \tag{4.4}$$

$h_g$ : altura del conductor de guarda en la torre  
 $f$ : flecha del conductor de guarda

**Paso 5: Calcule el número de rayos que inciden sobre la línea N<sub>L</sub>**

Se ha definido una franja o “sombra de la línea” donde la probabilidad de incidencia de los rayos sobre la línea es elevada. Esta franja se define como se muestra en la figura 4.2.

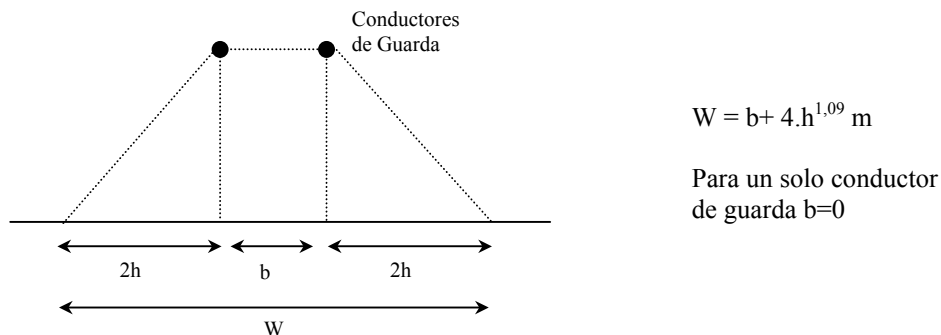


Fig. 4.2 Sombra de la línea para estimar el número de rayos que inciden sobre la línea

El número de rayos nube - tierra por año que intercepta la línea por cada 100 km de línea se determina mediante:

$$N_L = 0,012(b + 4.h^{1,09})T \quad (4.5)$$

La distancia b y la altura h se expresan en m.  $N_L$  en 4.5 determina el número de rayos que inciden sobre la línea por cada 100km/año

En general para una longitud en km L de la línea, diferente de 100 km, el número de rayos que inciden por año está determinado por:

$$N_L = 0,12(b + 4.h^{1,09})\frac{L.T}{1000} \quad (4.6)$$

**Paso 6: Conductor de Fase más expuesto a rayos y Voltaje de Arco Superficial de la Cadena de Aisladores  $V_C$  a  $6 \mu s$**

De la geometría de la línea seleccione los conductores de fase mas expuestos a incidencia de rayos y obtenga de las curvas voltaje – tiempo de la cadena de aisladores el voltaje de arco superficial (flashover) para un tiempo de  $6\mu s$ . Esta información se puede obtener del fabricante, o se puede obtener experimentalmente en un laboratorio de alta tensión.

**Paso 7: Calcule la altura media para el conductor de fase seleccionado en el paso 6**

$$Y_\phi = h - \frac{2}{3}f \quad (4.7)$$

h: altura del conductor de fase en la torre

f: flecha del conductor de fase

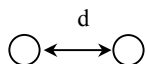
**Paso 8: Calcule el radio  $R_C$  del efecto corona alrededor del conductor**

Debido a la onda de voltaje asociada a la onda de corriente generada por la incidencia del rayo sobre el conductor de fase, se produce la ionización del volumen de aire alrededor del conductor de fase o **efecto corona** como se le conoce comúnmente. El efecto corona sobre el conductor se traduce como un incremento del radio del conductor lo cual afecta el valor de la impedancia característica del mismo. El radio  $R_C$  del efecto corona se extiende hasta un punto donde la intensidad del campo eléctrico decrece a un valor tal que no puede ionizar mas el aire. Este radio  $R_C$  se determina mediante la siguiente ecuación no lineal:

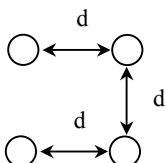
$$R_C \cdot \ln\left(\frac{2h}{R_C}\right) = \frac{V}{E_0} \quad (4.8)$$

Donde V es el voltaje aplicado al conductor de fase por la fracción de corriente de descarga del rayo que viaja por el conductor.  $E_0$  es el valor límite del campo eléctrico para el cual el radio  $R_C$  no crece mas, para  $E_0$  se asume un valor de 1500 kV/m. Para V en el conductor de fase se recomienda utilizar el voltaje de arco superficial de la cadena de aisladores para  $6\mu s$ ,  $V_{S6}$ . Para el conductor de guarda se recomienda un valor de V igual 1,8 veces el voltaje de arco superficial de la cadena para un tiempo de  $2\mu s$ ,  $V_{S2}$ .

**Paso 9: Para líneas con haces de conductores determine el radio equivalente del haz**



Radio equivalente =  $(d.r)^{0,5}$



Radio equivalente =  $1,09(d^3.r)^{0,25}$

r: radio de un conductor del haz

**Paso 10: Sume  $R_C$  al radio equivalente del haz, para aproximar el radio con el efecto corona  $R_{Cr}$ , si solo existe un conductor por fase  $R_{Cr} = R_C$ .**

**Paso 11: Determine la impedancia característica  $Z_{ii}$  del conductor de fase  $i$  tomando en cuenta el efecto corona.**

El efecto corona tiene mayor influencia sobre la capacitancia de los conductores, afectando en forma menor su inductancia. Para determinar la impedancia característica de un conductor tomando en cuenta el efecto corona se recomienda la siguiente expresión:

$$Z_{ii} = 60 \sqrt{\ln\left(\frac{2h_i}{r_i}\right) \cdot \ln\left(\frac{2h_i}{R_{Cri}}\right)} \quad (4.9)$$

Donde:

$h_i$ : altura del conductor

$r_i$ : radio del conductor

$R_{Cri}$ : Radio incluyendo el efecto corona

**Paso 12: Con  $V_{S6}$  y  $Z_{ii}$  determinada en el paso 11 determine la mínima corriente que puede producir un arco superficial cuando falla el apantallamiento**

$$I_{\min} = \frac{2 \cdot V_{S6}}{Z_{ii}} \quad (4.10)$$

**Paso 13: Determine la mínima distancia de descarga  $S$  en  $m$**

La distancia de descarga  $S$  es un concepto clave en la teoría de los modelos electrogeométricos. La idea principal es que en la medida que un rayo se acerca al terreno la influencia de los objetos en la superficie determina el punto u objeto de descarga. Esto se manifiesta con la distancia  $S$  del objeto. Esta distancia es función de la carga en el canal, y en consecuencia de la corriente, del rayo que se aproxima. Para determinar esta distancia  $S$  se recomienda la siguiente expresión:

$$S = 10 \cdot I^{0.65} \quad (4.11)$$

Mediante 4.11 se obtiene la distancia  $S$  en  $m$  con  $I$  en  $kA$ .  $I$  es el máximo valor de la corriente del rayo o valor pico.

**Paso 14: Seleccione el valor  $\beta$  de la línea**

Para este valor  $\beta$  se recomienda:

$\beta=1.0$  para líneas de Alto Voltaje

$\beta=0,8$  para líneas de Extra Alto Voltaje

$\beta=0,67$  para líneas de Ultra Alto Voltaje

Este factor  $\beta$  toma en cuenta la fuerte atracción sobre los rayos que el terreno ofrece por su amplitud, que es completamente diferente de la atracción que pueda ofrecer un conductor suspendido a una altura determinada sobre el terreno.

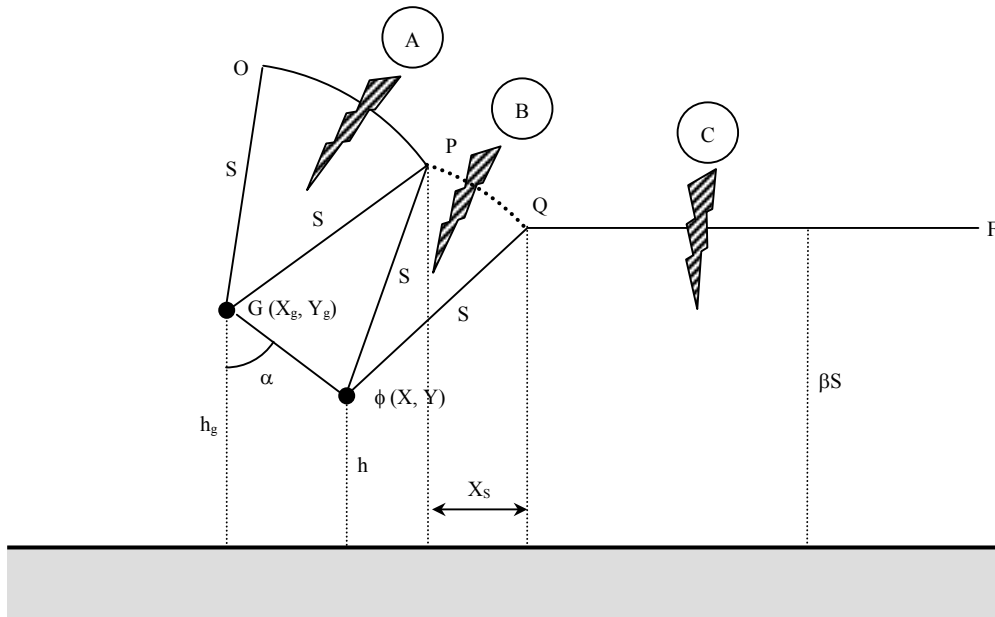


Fig. 4.3 Modelo Electrogeométrico para falla del apantallamiento

**Paso 15: Determine  $X_{gE}$  para obtener apantallamiento efectivo**

En referencia a la figura 4.2, **apantallamiento efectivo** significa reducir el espacio  $X_s$  a cero colocando apropiadamente el conductor de guarda G. Para conseguir esto la coordenada  $X_g$  se determina mediante la siguiente fórmula:

$$X_{gE} = \sqrt{S^2 - (\beta S - Y)^2} - \sqrt{S^2 - (\beta S - Y_g)^2} \quad (4.12)$$

**Paso 16: Determine el ángulo  $\alpha_E$  de apantallamiento efectivo**

$$\alpha = \arctg\left(\frac{X_g}{Y - Y_g}\right) \quad (4.13)$$

El ángulo de apantallamiento efectivo  $\alpha_E$  se calcula con  $X_{gE}$  obtenida mediante (4.12). Si el ángulo  $\alpha$  en la geometría de la línea es menor que  $\alpha_E$  entonces la línea está efectivamente apantallada, si este es el caso entonces no se esperan fallas de apantallamiento  $NS=0$ , y se puede proceder a estimar las salidas forzadas por descarga retroactiva. Si  $\alpha > \alpha_E$  entonces se esperan salidas forzadas por apantallamiento no efectivo y se prosigue con el paso 17 si se mantiene la geometría inicial de la línea.

**Paso 17: Determine  $X_s$ , espacio no cubierto por el apantallamiento**

La zona no cubierta por el apantallamiento  $X_s$  se puede determinar a partir de la geometría de la figura 4.2:

$$X_s = S[\text{Cos}\theta + \text{Sen}(\alpha_s - \omega)] \quad (4.14)$$

Donde:

$$\theta = \arccos\left(\frac{\beta S - Y}{S}\right) \quad (4.15)$$

$$\omega = \arccos\left(\frac{\sqrt{(X - X_g)^2 + (Y - Y_g)^2}}{2S}\right) \quad (4.16)$$

$$\alpha_S = \arctg\left(\frac{X - X_g}{-Y - Y_g}\right) \quad (4.17)$$

Si  $\beta S < Y$  entonces se hace  $\cos\theta = 1.0$

**Paso 18: Determine la máxima distancia de descarga  $S_{max}$**

De la expresión 4.11 para la distancia de descarga  $S$ , se puede ver que si la corriente se incrementa la distancia  $S$  se incrementa. En referencia a la figura 4.2, se parte de la hipótesis que existe una distancia  $S_{max}$  para la cual se consigue hacer cero la zona  $X_S$  no cubierta por el apantallamiento. Que geoméricamente es equivalente a reducir a cero la distancia  $PQ$ . Desde el punto de vista del modelo electrogeométrico lo que esto significa es que existe un valor de corriente del rayo  $I_{max}$  asociado a esta distancia  $S_{max}$ . Solo los rayos cuya corriente sean menor que  $I_{max}$  y superiores a la  $I_{min}$  determinada en el paso 12 pueden provocar falla de apantallamiento. La solución para  $S_{max}$  se obtiene resolviendo la ecuación no lineal:

$$[\cos\theta + \text{Sen}(\alpha_S - \omega)] = 0 \quad (4.18)$$

Con  $\theta$ ,  $\omega$  y  $\alpha_S$  determinadas por 4.15, 4.16 y 4.17.

Una aproximación para  $S_{max}$  se puede hacer mediante la siguiente expresión:

$$S_{max} = Y_o \left( \frac{-B_S - \sqrt{B_S^2 + A_S C_S}}{A_S} \right) \quad (4.19)$$

Donde:

$$Y_o = \frac{Y_g Y}{2} \quad (4.20)$$

$$m = \frac{Y_g - Y}{X_g - X} \quad (4.21)$$

$$A_S = m^2 - m^2 \beta - \beta^2 \quad (4.22)$$

$$B_S = \beta(m^2 + 1) \quad (4.23)$$

$$C_S = (m^2 + 1) \quad (4.24)$$

**Paso 19: Determine  $I_{max}$  correspondiente a la máxima distancia de descarga  $S_{max}$**

La corriente  $I_{max}$  correspondiente a la distancia de descarga máxima  $S_{max}$  se obtiene mediante:

$$I_{max} = 0,029.S^{1,54} \quad (4.25)$$

**Paso 20: Determine la probabilidad de ocurrencia de  $I_{min}$  e  $I_{max}$**

El valor máximo o valor pico de la corriente de descarga del rayo es uno de los factores determinantes en el sobrevoltaje generado y la probabilidad de falla asociada. Debe reconocerse la naturaleza estadística de éste valor máximo. La probabilidad de que un rayo tenga un valor máximo mayor o igual que  $I$  se puede determinar mediante la siguiente expresión[1]:

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2,6}} \quad (4.26)$$

Esta expresión fue determinada para rayos de polaridad negativa, que son los que mayormente inciden en estructuras de líneas de transmisión convencionales, altura menor de 60 m.

Para determinar la probabilidad  $P_{min}$  de que  $I_{min}$  sea excedida, basta sustituir el valor correspondiente por  $I$  en (23). De igual forma para la probabilidad  $P_{max}$  de  $I_{max}$

**Paso 21: Determine el número de fallas de apantallamiento**

El número de fallas de apantallamiento que pueden provocar salidas forzadas de la línea por 100km/año se obtiene mediante:

$$N_{FA} = \frac{0,012T.X_S(P_{min} - P_{max})}{2} \quad (4.27)$$

Para longitudes de línea  $L$  km diferentes de 100 km, se multiplica el valor obtenido mediante 4.26 por  $L$  y se divide entre 100.

**Paso 22: Determine el número total de fallas de apantallamiento**

Cuando mas de un conductor de fase esta expuesto a una falla de apantallamiento, se deben sumar las fallas correspondientes a cada conductor. Por ejemplo en una línea de transmisión con distribución horizontal de los tres conductores de fase y dos cables de guarda, si el apantallamiento no es efectivo, los conductores de fase ubicados en los extremos son los conductores mas expuestos. Debido a la simetría el número de fallas de apantallamiento son iguales para ambos conductores, y estas deben sumarse.

**Paso 23: Determine el número de rayos que pueden incidir sobre la línea para los cálculos correspondientes a Descarga Retroactiva**

El número  $N_{FA}$  representa el número de rayos que inciden sobre la línea y que el, o los, conductor(es) no interceptan. Por lo tanto esta cantidad debe sustraerse del número total de rayos que inciden sobre al línea  $N_L$ , para obtener el número de rayos que son interceptados por el (los) conductor(es) de guarda. Este numero de rayos  $N_L - N_{FA}$  son los rayos que inciden sobre la línea que pueden provocar salidas forzadas por descarga retroactiva (back – flashover).



### Salidas Forzadas por Descarga Retroactiva (back – flashover)

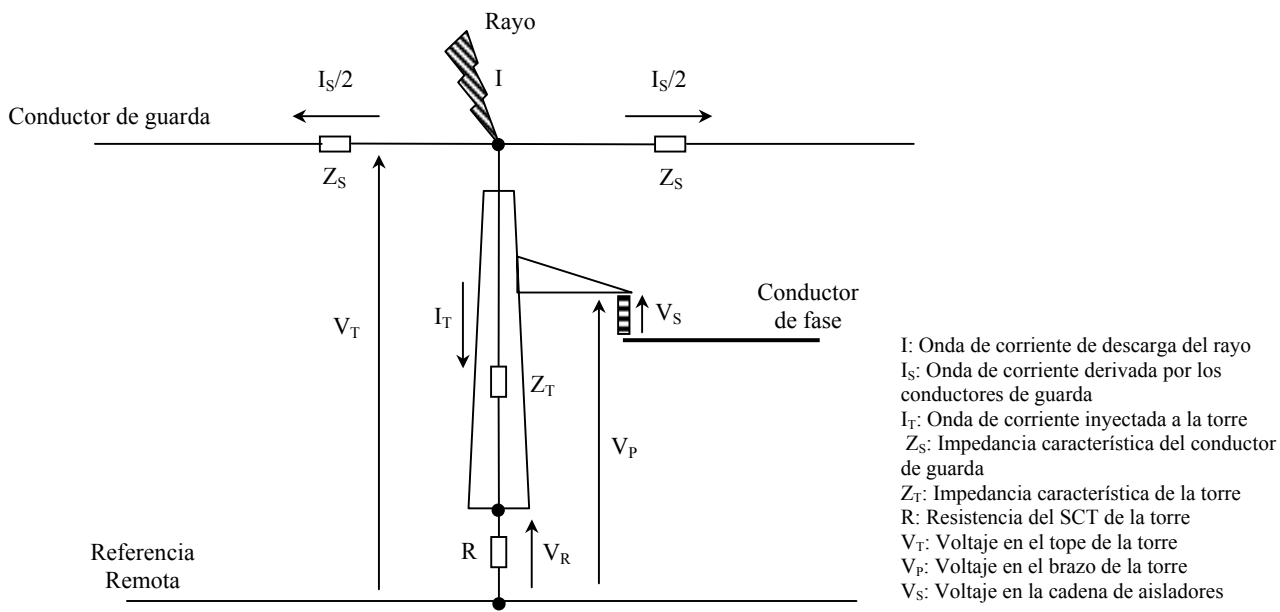


Fig. 4.4 Rayo incidiendo sobre una torre de una línea de transmisión

Cuando un rayo incide sobre una torre de una línea de transmisión con conductor de guarda descarga una corriente  $I(t)$  que genera ondas viajeras de corriente  $I_S(t)/2$  en el conductor o conductores de guarda,  $I_T(t)$  en la torre, ver figura 4.4. La corriente en la torre sufre múltiples reflexiones en el tiempo en la base y en el tope de la torre debido a la diferencia existente entre la impedancia característica de la torre  $Z_T$  y la resistencia a tierra  $R$  del SCT de la torre, y la impedancia característica del conductor de guarda  $Z_S$ . Estas múltiples reflexiones en la torre producen cambios importantes en la construcción en el tiempo del voltaje  $V_S$  que aparece aplicado a la cadena de aisladores, debido principalmente a la diferencia de tiempos entre las ondas reflejadas en la base de la torre y aquellas reflejadas en el tope de la torre. Para estimar las salidas forzadas debido a descargas retroactivas se ha propuesto el procedimiento con los pasos siguientes[1]:

**Paso 1: Determine los voltajes de arco superficial de la cadena de aisladores a los  $2\mu s$  y para  $6\mu s$**

A falta de una información mas precisa para una longitud de la cadena de aisladores  $L_S$  el voltaje de arco superficial para los tiempos indicados se pueden estimar mediante las siguientes fórmulas:

$$V_{2\mu} = 820.L_S \tag{4.28}$$

$$V_{6\mu} = 585.L_S \tag{4.29}$$

Estos voltajes se deberían obtener del fabricante o experimentalmente.

**Paso 2: Determine el voltaje  $V = 1,8V_{2\mu}$  en el tope de la torre**

**Paso 3: Calcule el radio  $R_C$  del efecto corona alrededor del conductor de guarda**

$$R_C \cdot \ln\left(\frac{2h_g}{R_C}\right) = \frac{V}{E_o} \quad (4.30)$$

$h_g$ : altura del conductor de guarda en la torre

$E_o$  es el valor límite del campo eléctrico para el cual el radio  $R_C$  no crece mas, para  $E_o$  se asume un valor de 1500 kV/m.  $V$  se determinó en el paso 2.

**Paso 4: Determine la impedancia característica  $Z_S$  del conductor de guarda tomando en cuenta el efecto corona.**

$$Z_S = 60 \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{2h_g}{r_g}\right) \cdot \ln\left(\frac{2h_g}{R_C}\right)} \quad (4.31)$$

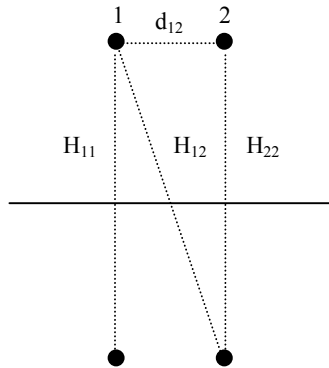
Donde:

$h_g$ : altura del conductor de guarda

$r_g$ : radio del conductor de guarda

$R_C$ : Radio incluyendo el efecto corona

**Paso 5: Determine la impedancia característica  $Z_S$  equivalente cuando existen dos conductores de guarda tomando en cuenta el efecto corona para las impedancias propias.**



$$Z_{12} = 60 \ln\left(\frac{H_{12}}{d_{12}}\right) \quad (4.32)$$

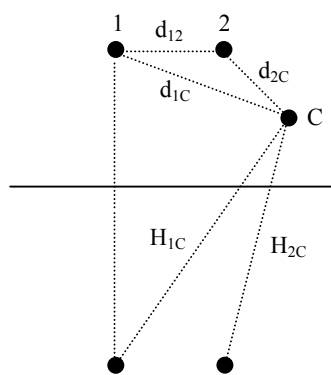
$$Z_S = \frac{Z_{11} + Z_{12}}{2} \quad (4.33)$$

Fig. 4.5 Impedancia característica equivalente de dos conductores de guarda ubicados a la misma altura

La expresión 4.33 fue derivada bajo la condición  $H_{11} = H_{22}$ .

**Paso 5: Determine el factor de acoplamiento  $K_c$  entre el conductor de guarda y el conductor de fase**

La onda de corriente en el conductor de guarda se acopla electromagnéticamente con el conductor de fase generando o induciendo una onda de voltaje en el conductor de fase. Este factor obviamente depende de la geometría de la línea.



$$Z_{1C} = 60 \ln \left( \frac{H_{1C}}{d_{1C}} \right) \quad (4.34)$$

$$Z_{2C} = 60 \ln \left( \frac{H_{2C}}{d_{2C}} \right) \quad (4.35)$$

$$K_C = \frac{Z_{1C} + Z_{2C}}{Z_{11} + Z_{12}} \quad (4.36)$$

Fig. 4.6 Factor de acoplamiento entre los conductores de guarda y el conductor de fase

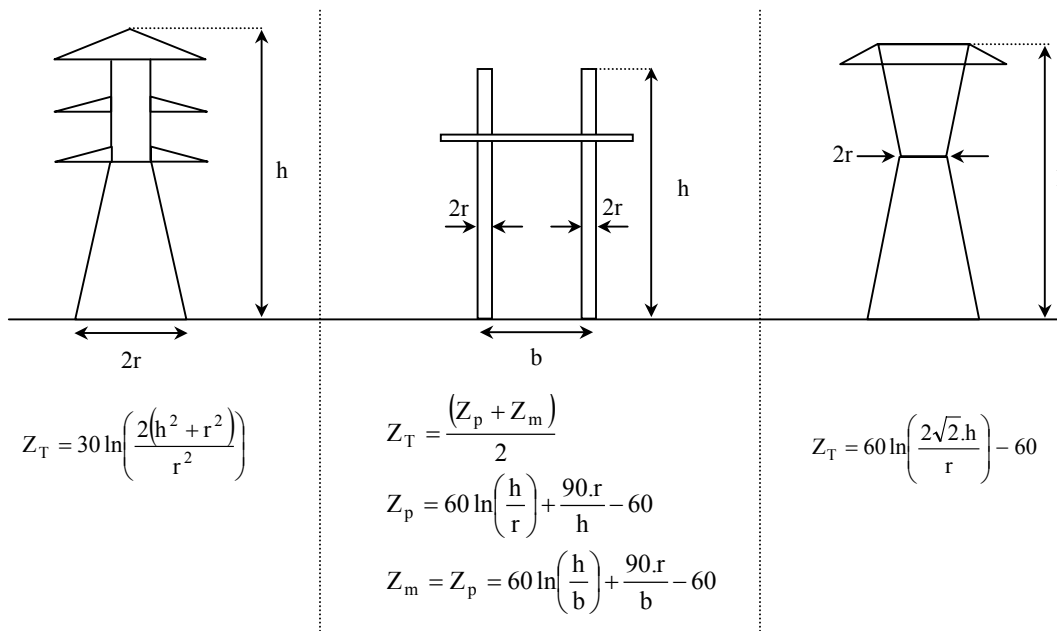
En la figura 4.6:

1,2: Conductores de guarda

C: Conductor de fase

Para un solo conductor simplemente se toma  $K_C = Z_{1C} / Z_{11}$ . El subíndice 1 corresponde al conductor de guarda.

**Paso 6: Determine la impedancia característica  $Z_T$  de la torre y el tiempo de tránsito desde el tope hasta la base de la torre**



$\tau_T$ : tiempo de tránsito desde el tope hasta la base de la torre  $h/300$  en  $\mu s$

Fig. 4.7 Aproximaciones para las impedancias características de torres

**Paso 8: Determine el tiempo de tránsito  $\tau_v$  entre la torre incidida por el rayo y las torres adyacentes**

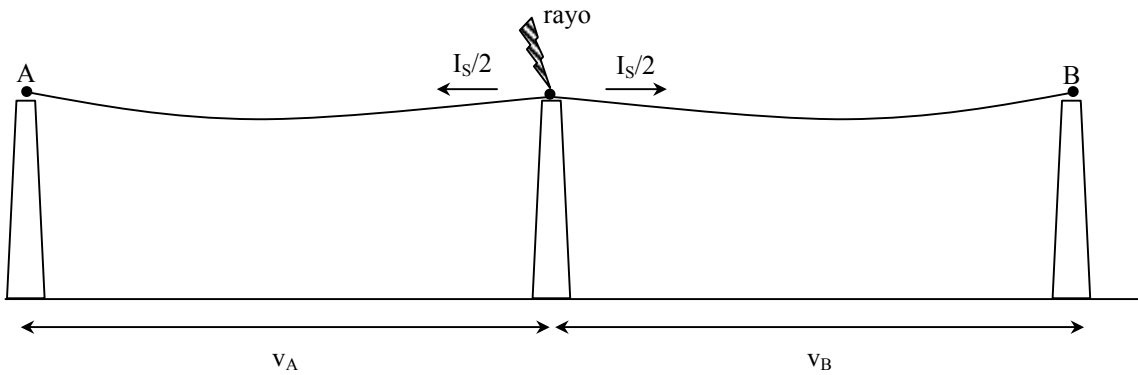


Fig. 4.8 Torres adyacentes conectadas al conductor de guarda a una distancia de vano  $v$

Las reflexiones de las ondas de voltaje y corriente asociadas a  $I_s/2$  que ocurren en los puntos A y B, tienden a reducir el voltaje en la cadena de aisladores de la torre donde incidió el rayo. La mayor o menor reducción depende de la longitud de los vanos  $v_A$  y  $v_B$ , si estas reflexiones llegan antes o después que el máximo voltaje se desarrolle en la torre. En consecuencia el efecto de estas reflexiones debe ser tomado en cuenta porque pueden reducir la tasa de salidas forzadas si llegan con suficiente antelación. El tiempo de tránsito  $\tau_v$  en  $\mu s$  se determina mediante:

$$2\tau_v = \frac{2v}{270} \quad (4.37)$$

Generalmente se asume  $v_A = v_B$ .

**Paso 9: Determine el tiempo de tránsito  $\tau_{pn}$  entre el tope de la torre y el brazo que sostiene el conductor de fase de fase**

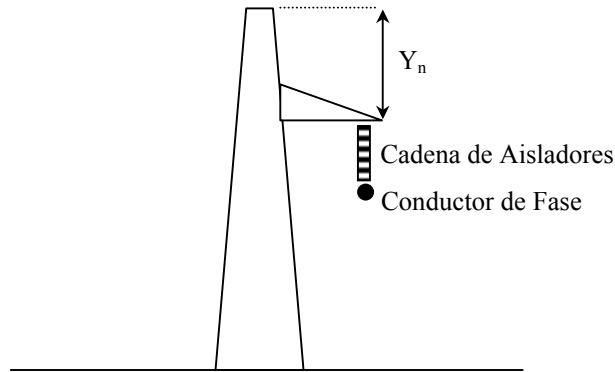


Fig. 4.9 Distancia entre el tope de la torre y el brazo que sostiene el conductor de fase

El tiempo  $\tau_{pn}$  para la distancia  $Y_n$  se determina asumiendo que el fenómeno se desplaza a la velocidad de la luz, en consecuencia  $\tau_{pn}$  en  $\mu s$  se puede determinar mediante:

$$\tau_{pn} = \frac{Y_n}{300} \quad (4.38)$$

**Paso 10: Selecciones el valor de Resistencia a Tierra R del Sistema de Conexión a Tierra de la torre de transmisión**

Este es el punto de interés para el diseño del Sistema de Conexión a Tierra de la torre. Dependiendo del valor de resistencia asumido, éste tiene una incidencia sobre la Tasa de Salidas Forzadas esperada que se asocia al fenómeno de la Descarga Retroactiva. El proceso para la selección de un valor máximo de R se inicia con la especificación de la Tasa de Salidas Forzadas (TSF) por año de la línea de transmisión. Este valor especificado TSF tiene dos componentes:

- Las salidas forzadas asociadas a fallas de apantallamiento: SFA
- Las salidas forzadas asociadas a la descarga retroactiva: SDD

Es decir  $TSF = SFA + SDD$ . En primer lugar se deben estimar de estimar las salidas forzadas asociadas a la fallas del apantallamiento proporcionado por el conductor de guarda, SFA. Las salidas forzadas asociadas a la descarga retroactiva se obtienen como:  $SDD = TSF - SFA$ . Éste último, SDD, es el valor de salidas forzadas que debe obtenerse con un valor máximo de R adecuado. El proceso para determinar éste valor máximo adecuado de R es iterativo. El proceso iterativo se inicia asumiendo un valor de partida de  $R_0$ , se estima el número de salidas forzadas por descarga retroactiva  $SDD_0$  y se compara con el valor  $SDD = TSF - SFA$ . Si no son iguales se debe modificar  $R_1 = R_0 + \Delta R$  y estimar un nuevo valor  $SDD_1$  y se compara con SDD. El proceso prosigue hasta satisfacer un criterio de error determinado.

Otra alternativa que puede ser más práctica es asumir un valor inicial de R determinar SDD y obtener  $TSF = SFA + SDD$  de la línea. Éste valor de TSF se acepta o no. Si no se acepta, se reduce el valor de la R inicial y se estima una TSF nueva. El proceso se detiene cuando se estima una TSF que se considere aceptable.

**Paso 11: Determine la impedancia  $Z_I$**

$$Z_I = \frac{Z_S \cdot Z_T}{Z_S + Z_T} \quad (4.39)$$

**Paso 12: Determine la impedancia  $Z_W$**

$$Z_W = \frac{2 \cdot Z_S^2 \cdot Z_T}{(Z_S + 2Z_T)^2} \cdot \frac{Z_T - R}{Z_T + R} \quad (4.40)$$

**Paso 13: Determine el factor de amortiguamiento  $\psi$**

$$\psi = \left( \frac{2Z_T - Z_S}{Z_S + 2Z_T} \right) \left( \frac{Z_T - R}{Z_T + R} \right) \quad (4.41)$$

**Paso 14: Determine el factor de refracción  $\alpha_R$  de la resistencia de tierra**

$$\alpha_R = \frac{2R}{Z_T + R} \quad (4.42)$$

**Paso 15: Determine el voltaje  $V_{IT2}$  en el tope de la torre a los  $2\mu s$  debido a 1 kA de corriente inyectada por el rayo**

$$V_{IT2} = \left[ Z_I - \frac{Z_W}{1 - \psi} \left( 1 - \frac{\tau_T}{1 - \psi} \right) \right] \quad (4.43)$$

**Paso 16: Determine el componente de voltaje reflejado  $V_{rT2}$  en el tope de la torre a los  $2\mu s$  debido a reflexiones en las torres adyacentes**

$$V_{rT2} = -\frac{4K_S \cdot V_{IT2}^2}{Z_S} \left[ \frac{1 - 2V_{IT2}}{Z_S} \right] (1 - \tau_v) \quad (4.44)$$

El factor  $K_S$  se utiliza para tomar en cuenta el efecto amortiguador del conductor de guarda sobre las ondas viajeras que se desplazan por el. Se asume un valor de  $K_S = 0,85$ . Si  $\tau_v > 1\mu s$  entonces  $V_{rT2} = 0$ .

**Paso 17: Determine el voltaje en la tope de la torre a los  $2\mu s$  debido a la corriente de 1 kA y a las reflexiones en las torres adyacentes**

$$V_{T2} = V_{IT2} + V_{rT2} \quad (4.45)$$

**Paso 18: Determine el voltaje  $V_{IR2}$  a los  $2\mu s$  en la R del SCT de la torre debido a la corriente de 1 kA de corriente inyectada por el rayo**

$$V_{IR2} = \frac{\alpha_R Z_I}{1 - \psi} \left( 1 - \frac{\psi \cdot \tau_T}{1 - \psi} \right) \quad (4.46)$$

**Paso 19: Determine el voltaje  $V_{R2}$  a los  $2\mu s$  en la R aplicando un factor de reducción para tomar en cuenta el efecto de las reflexiones de torres adyacentes**

$$V_{R2} = \frac{V_{IT2}}{V_{T2}} V_{IR2} \quad (4.47)$$

**Paso 20: Determine el voltaje  $V_{p2}$  a los  $2\mu s$  en el brazo que sostiene el conductor de fase**

$$V_{p2} = V_{R2} + \frac{\tau_T - \tau_{pn}}{\tau_T} (V_{T2} - V_{R2}) \quad (4.48)$$

**Paso 21: Determine el voltaje  $V_{S2}$  aplicado a la cadena de aisladores a los  $2\mu s$**

$$V_{S2} = V_{p2} - K_C \cdot V_{T2} \quad (4.49)$$

**Paso 22: Determine el voltaje  $V_{T6}$  a los  $6\mu s$  en el tope de la torre,  $V_{R6}$  en la base de la torre y  $V_{p6}$  en el brazo que sostiene el conductor de fase, debidos a 1 kA de corriente inyectada por el rayo**

$$V_{IT6} = V_{R6} = V_{p6} = \left( \frac{R \cdot Z_S}{R + Z_S} \right) \quad (4.50)$$

**Paso 23: Determine el componente de voltaje reflejado  $V_{rT6}$  en el tope de la torre a los  $6\mu s$  debido a reflexiones en las torres adyacentes**

$$V_{rT6} = -\frac{4K_S Z_S \cdot R^2}{(Z_S + 2R)^2} \left[ 1 - \frac{2R}{Z_S + 2R} \right] (1 - \tau_v) \quad (4.51)$$

**Paso 24: Determine el voltaje en la cadena de aisladores para 6 μs**

$$V_{S6} = [V_{IT6} + V_{rT6}](1 - K_C) \quad (4.52)$$

**Paso 25: Determine la corriente crítica de descarga del rayo requerida para provocar arco superficial sobre la cadena de aisladores a los 2 μs**

$$I_{c2} = \frac{V_{2\mu}}{V_{S2}} \quad (4.53)$$

**Paso 26: Determine la corriente crítica de descarga del rayo requerida para provocar arco superficial sobre la cadena de aisladores a los 6 μs**

$$I_{c6} = \frac{V_{6\mu}}{V_{S6}} \quad (4.54)$$

**Paso 27: Seleccione el menor valor de corriente crítica  $I_{cm}$  entre  $I_{c2}$  e  $I_{c6}$  incluyendo el efecto del voltaje de frecuencia de potencia**

$$I_{cm} = \text{menor}(I_{c2}, I_{c6}) \quad (4.55)$$

Los pasos 1- 27 se hacen para cada uno de los conductores de fase obteniéndose de esta manera tres valores críticos de corriente uno por cada fase. Con estos valores se debe analizar el efecto del voltaje a frecuencia de potencia. El voltaje de frecuencia de potencia para una fase n  $V_o \text{Sen}(\theta_n - \alpha_n)$  puede sumarse o restarse aleatoriamente del voltaje aplicado a la cadena de la fase n  $V_{sn}$ . Esto implica que se requiere un valor menor de corriente crítica de descarga del rayo  $I_c$  para producir un arco superficial sobre la cadena de aisladores. El valor de esta corriente crítica para cada fase esta determinado por:

$$I_{cn} = \frac{V_m - V_{on} \text{Sen}(\theta_n - \alpha_n)}{V_m} \quad (4.56)$$

Donde:

$V_m$ : El voltaje de  $V_{2\mu s}$  o  $V_{6\mu s}$  correspondiente a  $I_m$

$V_o$ : Voltaje pico de fase – tierra de la fase n

$\theta_n$ : ángulo asociado a la frecuencia angular  $\omega t$

$\alpha_n$ : ángulo de desfase para la fase n: 0,  $-2\pi/3$ ,  $2\pi/3$

Para un ciclo completo de cada fase,  $0 \leq \theta_n \leq 2\pi$  se puede determinar en cual intervalo  $\theta_{1n} \leq \theta_n \leq \theta_{2n}$  cada fase presenta su menor valor de corriente. En este intervalo la fase correspondiente es la mas susceptible a desarrollar un arco superficial. Por ejemplo sea el caso con las siguientes corrientes críticas:

$I_{ca} = 54$  kA;  $I_{cb} = 60$  kA;  $I_{cc} = 68$  kA;  $V_o = 290$  kV,  $V_m = 1500$  kV. Las corrientes críticas tomando en cuenta el voltaje de frecuencia de potencia son:

$$I_{ca} = 54 \cdot \left( \frac{1500 - 290 \text{Sen}(\theta_n)}{1500} \right) \quad I_{cb} = 60 \cdot \left( \frac{1500 - 290 \text{Sen}(\theta_n - 2\pi/3)}{1500} \right) \quad I_{cc} = 60 \cdot \left( \frac{1500 - 290 \text{Sen}(\theta_n + 2\pi/3)}{1500} \right)$$

En la figura 10 se muestra las gráficas correspondientes a la corriente crítica de cada fase.

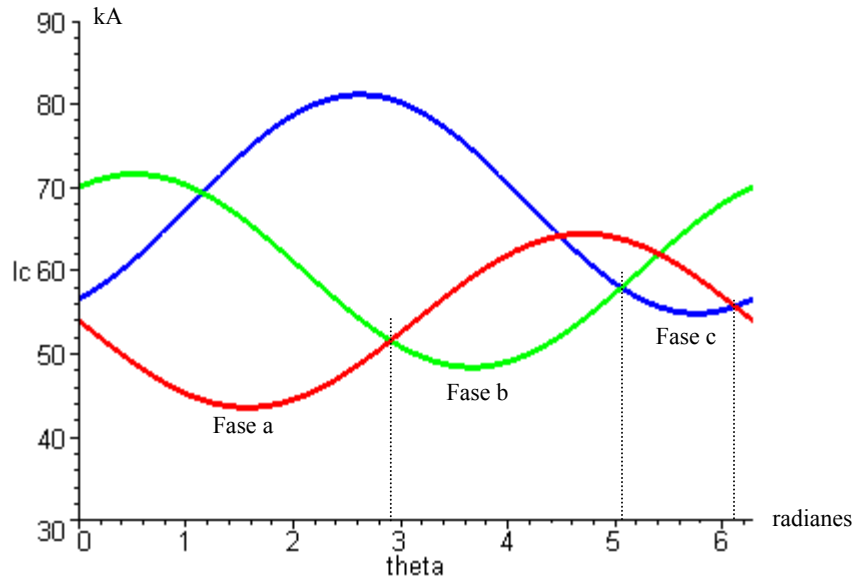


Fig. 4.10 Corrientes críticas tomando en cuenta el efecto del voltaje a frecuencia de potencia.

De la figura 4.10 se obtienen los siguientes intervalos donde cada fase es la más susceptible a desarrollar un arco superficial:

- Fase a:  $0 \leq \theta_a \leq 2,9$  radianes o el 46,15 % del ciclo
- Fase b:  $2,9 \leq \theta_b \leq 5,05$  radianes o el 34,22 % del ciclo
- Fase c:  $5,05 \leq \theta_c \leq 6,15$  radianes o el 17,5 % del ciclo

**Paso 28: Determine el valor promedio de la corriente crítica para cada fase  $I_{pn}$**

Como la corriente crítica  $I_{cn}$  calculada es una función del tiempo, su valor cambia en el intervalo  $\theta_{1n} \leq \theta_n \leq \theta_{2n}$ , con la finalidad de tener un solo valor como una aproximación más se puede tener su valor promedio en ese intervalo. Este valor promedio se calcula mediante:

$$I_{pn} = I_{cn} \left\{ 1 + \frac{V_o}{V_m} \frac{\cos(\theta_2 - \alpha_n) - \cos(\theta_1 - \alpha_n)}{\theta_2 - \theta_1} \right\} \quad (4.57)$$

Aplicando esta fórmula al ejemplo del paso anterior se obtiene:

$$I_{pa} = 61,1 \text{ kA}; I_{pb} = 50,96 \text{ kA}; I_{pc} = 55,67 \text{ kA};$$

**Paso 28: Determine la probabilidad de ocurrencia  $P_{fn}$  de rayos para cada fase  $n$  con corriente mayor o igual a la corriente promedio obtenidas en el paso anterior**

La probabilidad de ocurrencia de un rayo con corriente mayor o igual a un valor cada valor pico  $I$  se determina mediante:



$$P_I = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2,6}\right]} \quad (4.58)$$

Para cada corriente de cada fase se obtiene una probabilidad  $I_n$ .

**Paso 29: Determine el número de rayos  $N_T$  sobre la línea y que inciden sobre la torre**

El número de rayos que inciden sobre la torre se pueden estimar mediante:

$$N_T = 0,6(N_L - N_{FA}) \quad (4.59)$$

Donde  $N_{FA}$  es el número de rayos que el conductor o conductores de guarda no pueden interceptar, y representan la fallas del apuntalamiento.

**Paso 30: El número de rayos que pueden causar arco en una fase**

El número de rayos que pueden causar arco superficial en la cadena de aisladores de una fase es el producto del porcentaje del ciclo donde la fase es la mas susceptible por el número  $N_T$ .

**Paso 31: El producto del número de rayos que se obtuvo en el paso anterior para cada fase se multiplica por la respectiva probabilidad calculada en el paso 28. La sumatoria de estos valores es el número total de descargas retroactivas que provocarán salidas forzadas por año y 100 km. de línea o por la longitud de la línea.**

**Valor máximo de la resistencia a Tierra determinado por el máximo sobrevoltaje de frecuencia de potencia aplicado a descargadores de sobrevoltaje**

Un aspecto importante donde la resistencia a tierra juega un papel importante es en la selección del voltaje nominal de los descargadores de sobrevoltaje o sobretensión. Un descargador de sobrevoltaje puede entenderse circuitalmente como un interruptor operado por voltaje. Si el voltaje en el punto de ubicación del descargador de sobrevoltaje supera un valor determinado  $V_{op}$  el interruptor se cierra. Cuando el voltaje disminuye por debajo de cierto valor o voltaje de recierre  $V_{rc}$  el interruptor se abre. Ver figura 4.11.

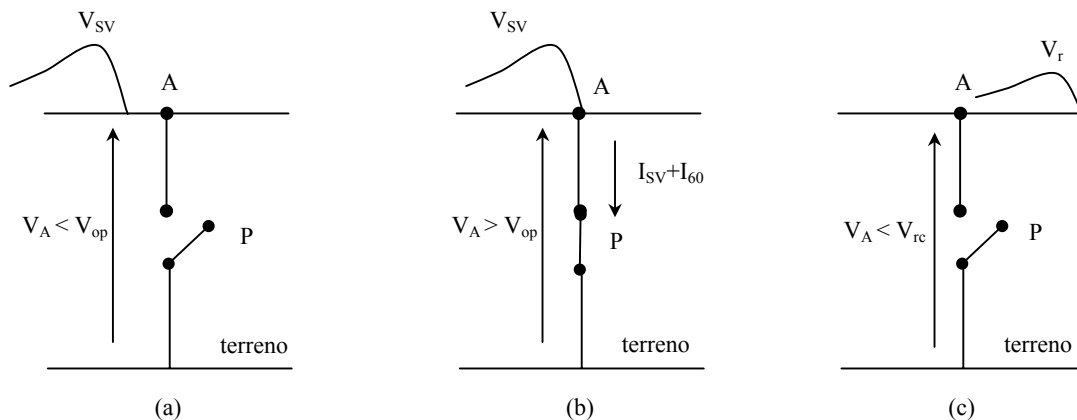


Fig. 4.11 Operación de un descargador de sobrevoltaje ideal

- (a) La onda de sobrevoltaje se acerca al punto A
- (b) La onda de sobrevoltaje llega al punto A
- (c) La onda de sobrevoltaje se aleja del punto A

En la figura 4.11 se muestran tres instantes de operación de un de un descargador de sobrevoltaje ideal. Mientras la onda de sobrevoltaje no llegue al punto A,  $V_A < V_{op}$  el interruptor P está abierto, no hay conexión al terreno, figura 4.11(a). Cuando la onda de sobrevoltaje llega al punto a y el voltaje  $V_A > V_{op}$  entonces el descargador opera, lo que es equivalente a cerrar el interruptor P, figura 4.11(b). Cuando esto ocurre circulan hacia el terreno una corriente de descarga  $I_{SV}$  asociada a la onda de sobrevoltaje y una corriente de frecuencia de potencia  $I_{60}$  asociada a las fuentes conectadas con el punto A. En consecuencia, en la práctica la operación de un descargador de sobrevoltaje se traduce en una falla de fase a tierra momentánea que el descargador debe ser capaz de despejar antes que actúen los dispositivos de protección. Cuando la onda pasa  $V_A < V_{op}$ , si  $V_A$  es menor que el voltaje de recierre  $V_{rc}$ , que es el valor máximo valor de voltaje al cual el descargador es capaz de interrumpir la corriente  $I_{60}$ , el flujo de la corriente  $I_{60}$  se interrumpe, esto es equivalente a que el interruptor P se abra, figura 4.11(c).

Durante la operación del descargador de sobrevoltaje, figura 4.11(b), en un circuito trifásico las fases que no operan están sujetas a voltajes fase - tierra diferente del voltaje fase - neutro de operación normal. Estos voltajes en las fases que no operan pueden superar el valor nominal del descargador a frecuencia de potencia, provocando su falla en breve tiempo. Por lo tanto la selección del voltaje nominal del descargador de sobrevoltaje se hace en base al voltaje fase - tierra esperado en el punto de ubicación del descargador cuando ocurre una falla de fase a tierra. En la figura 4.12 se ilustra el caso típico de una fuente trifásica con neutro conectado sólidamente a tierra y descargadores ubicados en un sitio diferente al de la fuente con un sistema de conexión a tierra local. El circuito de componentes de secuencia ilustra falla de fase - tierra en la fase a.

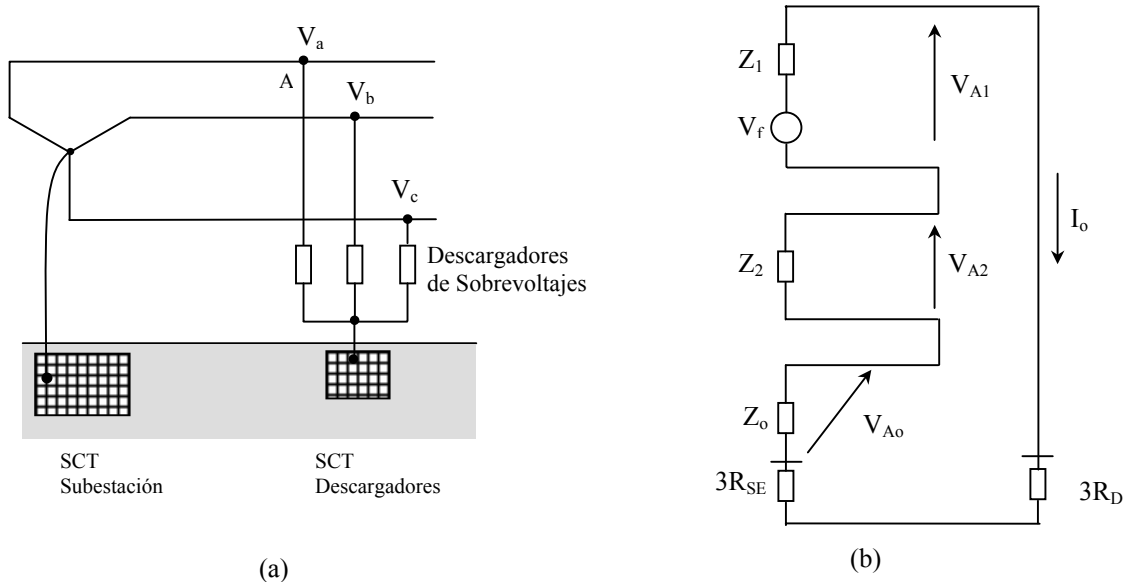


Fig. 4.12 (a) Fuente trifásica con neutro conectado sólidamente a tierra y descargadores  
(b) Circuito de componentes de secuencia para una falla fase - tierra en la fase a

Los voltajes  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ , respecto al terreno se pueden determinar mediante el método de los componentes simétricos:

$$V_a = V_f \frac{3(R_D + R_{SE})}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3R_{SE} + 3R_D} \quad (4.60)$$

$$V_b = V_f \frac{Z_2(a^2 - a) + (a^2 - 1)Z_0 + 3a^2(R_D + R_{SE})}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3R_{SE} + 3R_D} \quad (4.61)$$

$$V_c = V_f \frac{Z_2(a - a^2) + (a - 1)Z_0 + 3a(R_D + R_{SE})}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3R_{SE} + 3R_D} \quad (4.62)$$

Donde:

$Z_1$ : Impedancia Equivalente de Thevenin de secuencia positiva en el punto A.

$Z_2$ : Impedancia Equivalente de Thevenin de secuencia negativa en el punto A.

$Z_0$ : Impedancia Equivalente de Thevenin de secuencia cero en el punto A.

$R_{SE}$ : Resistencia a tierra del SCT de la subestación o fuente.

$R_D$ : Resistencia a tierra del SCT local de los descargadores de sobrevoltaje.

a: es el valor complejo  $e^{j2\pi/3} = -1/2 + j\sqrt{3}/2$

Los valores  $R_{SE}$  y  $R_D$  deben dar como resultado que los voltajes  $V_b$  y  $V_c$  no superen los valores máximos especificados por el fabricante. De igual forma  $V_a$  debe ser menor que el voltaje especificado por el fabricante para una operación exitosa con la interrupción oportuna de la corriente de frecuencia asociada la operación del descargador.

### Referencias

- [1] Anderson J. G.: "Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above", segunda edición, Capítulo 12, Electric Power Research, Palo Alto, California
- [2] "Distribution – System Protection Manual", Mc Graw Edison Power System Division
- [3] "Electrical Transmission and Distribution Reference Book", cuarta edición, Westinghouse Electric Corporation, East Pittsburgh, Pennsylvania