

COORDINACIÓN DE AISLACIÓN DE ESTACIONES

INTRODUCCIÓN

A diferencia de lo que ocurre con las líneas aéreas, los parámetros principales que definen la aislación en las Estaciones suelen estar normalizados.

Las Normas internacionales IEC o similares suelen fijar valores normalizados para las tensiones máximas en sobretensiones de maniobra (BSL: Basic Switching Level), temporarias y de rayo (BIL: Basic Impulse Level) que soportan los equipos de Estación, en función de sus tensiones de operación máxima en régimen.

| Highest voltage for equipment (U_m) kV (r.m.s. value) | Standard rated switching impulse withstand voltage | | | Standard rated lightning impulse withstand voltage ^b kV (peak value) |
|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| | Longitudinal insulation ^a kV (peak value) | Phase-to-earth kV (peak value) | Phase-to-phase (ratio to the phase-to-earth peak value) | |
| 300 ^c | 750 | 750 | 1,50 | 850 |
| | | | | 950 |
| | 750 | 850 | 1,50 | 950 |
| | | | | 1050 |
| 362 | 850 | 850 | 1,50 | 950 |
| | | | | 1050 |
| | 850 | 950 | 1,50 | 1050 |
| | | | | 1175 |
| 420 | 850 | 850 | 1,60 | 1050 |
| | | | | 1175 |
| | 950 | 950 | 1,50 | 1175 |
| | | | | 1300 |
| | 950 | 1050 | 1,50 | 1300 |
| | | | | 1425 |
| 550 | 950 | 950 | 1,70 | 1175 |
| | | | | 1300 |
| | 950 | 1050 | 1,60 | 1300 |
| | | | | 1425 |
| | 950 | 1175 | 1,50 | 1425 |
| | | | | 1550 |
| 800 | 1175 | 1300 | 1,70 | 1675 |
| | | | | 1800 |
| | 1175 | 1425 | 1,70 | 1800 |
| | | | | 1950 |
| | 1175 | 1550 | 1,60 | 1950 |
| | | | | 2100 |

Las correspondientes aislaciones regenerativas (distancias en aire) suelen diseñarse en primera aproximación con los mismos niveles de aislación, dado que (a diferencia del caso de las líneas) no existe un estímulo económico tan grande para optimizar estas distancias a través de un procedimiento de cálculo más complejo.

Las Normas recomiendan las distancias mínimas a considerar para cada nivel de aislación.

Table A.1 – Correlation between standard rated lightning impulse withstand voltages and minimum air clearances

| Standard rated lightning impulse withstand voltage kV | Minimum clearance mm | |
|----------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------|
| | Rod-structure | Conductor-structure |
| 20 | 60 | |
| 40 | 60 | |
| 60 | 90 | |
| 75 | 120 | |
| 95 | 160 | |
| 125 | 220 | |
| 145 | 270 | |
| 170 | 320 | |
| 200 | 380 | |
| 250 | 480 | |
| 325 | 630 | |
| 380 | 750 | |
| 450 | 900 | |
| 550 | 1 100 | |
| 650 | 1 300 | |
| 750 | 1 500 | |
| 850 | 1 700 | 1 600 |
| 950 | 1 900 | 1 700 |
| 1 050 | 2 100 | 1 900 |
| 1 175 | 2 350 | 2 200 |
| 1 300 | 2 600 | 2 400 |
| 1 425 | 2 850 | 2 600 |
| 1 550 | 3 100 | 2 900 |
| 1 675 | 3 350 | 3 100 |
| 1 800 | 3 600 | 3 300 |
| 1 950 | 3 900 | 3 600 |
| 2 100 | 4 200 | 3 900 |

NOTE The standard rated lightning impulse withstand voltages are applicable phase-to-phase and phase-to-earth.
For phase-to-earth, the minimum clearance for conductor-structure and rod-structure is applicable.
For phase-to-phase, the minimum clearance for rod-structure is applicable.

Si bien es posible establecer un procedimiento sistemático para definir (a partir del cálculo de las tensiones impuestas a las aislaciones por las maniobras, descargas de rayo, etc.) en primera aproximación cuál de las 2 o 3 opciones que ofrece la Norma IEC 60071-2 se debe seleccionar, lo más habitual es que el proyectista realice esta primera selección en base a su experiencia previa.

El paso siguiente es verificar que esta selección es adecuada, en base al cálculo de las tensiones impuestas a la aislación.

Esta verificación está totalmente condicionada por la presencia habitual de descargadores en la Estación, cuyo efecto es bien distinto para los 2 tipos de sobretensiones que se deben analizar:

a) Si se supone la aplicación de una sobretensión de maniobra en la Estación, es razonable suponer (dado que estas sobretensiones son de frente lento y que las estaciones son de dimensiones relativamente reducidas) que en un instante dado todos

los puntos de la estación se encuentran sometidos a la misma tensión. La presencia de los descargadores, por lo tanto, “amarra” la sobretensión de maniobra en la estación en un valor definido por su curva V-I.

La consecuencia práctica es que no suele ser necesario realizar simulaciones complejas para evaluar la distribución de sobretensiones de maniobra en la Estación; y se suele asumir que la sobretensión de maniobra impuesta es, simplemente, la mayor tensión residual de los descargadores presentes, a un valor supuesto de corriente de 1 ó 2 kA.

| Max. system voltage, U_m | Rated voltage, U_r | Max. continuous operating voltage 1) | | TOV capability 2) | | Max. residual voltage (U_{res}) with current wave | | | | | | | |
|----------------------------|----------------------|--------------------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--|
| | | as per IEC, U_c | as per ANSI/IEEE MCOV | 1 s | 10 s | 30/60 μ s | | | 8/20 μ s | | | | |
| | | kV _{rms} | kV _{rms} | kV _{rms} | kV _{rms} | 0,5 kA | 1 kA | 2 kA | 5 kA | 10 kA | 20 kA | 40 kA | |
| | | | | | | kV _{crest} | kV _{crest} | kV _{crest} | kV _{crest} | kV _{crest} | kV _{crest} | kV _{crest} | |
| 550 | 396 | 317 | 318 | 459 | 435 | 773 | 800 | 820 | 856 | 901 | 987 | 1086 | |
| | 420 | 336 | 336 | 487 | 462 | 819 | 849 | 870 | 908 | 956 | 1051 | 1152 | |
| | 444 | 349 | 353 | 515 | 488 | 866 | 897 | 920 | 960 | 1015 | 1111 | 1217 | |

Observar que, con esta simplificación habitual, la sobretensión de maniobra impuesta en la estación es independiente de lo que ocurre en la red, y depende sólo del descargador elegido.

b) Si se supone la aplicación de una sobretensión de rayo en la Estación, en cambio, la hipótesis anterior ya no es razonable. En efecto: estas sobretensiones son de frente rápido, por lo que en distintos puntos de la estación es de esperar que en un instante dado existan tensiones distintas, y sus valores dependen de la distancia de cada punto a los descargadores.

La situación es particularmente crítica en los puntos de la estación en que se produzcan reflexiones positivas de la onda incidente (extremos abiertos, transformadores de potencia, reactores, etc.), dado que en esos puntos la tensión puede llegar a crecer mucho antes que el descargador tenga tiempo de limitarla.

La consecuencia práctica es que es necesario hacer una simulación de la propagación de ondas de rayo en la estación, con un modelado muy preciso de sus diversos elementos. El parámetro principal de diseño a determinar con estas simulaciones es la cantidad y ubicación de los descargadores en la Estación.

Estas simulaciones son particularmente necesarias en las Estaciones de tensión más alta, en las que las distancias involucradas son mayores.

Al igual que en la coordinación de aislación de líneas, la coordinación de aislación de Estaciones está condicionada por la presencia de diversas variables aleatorias.

Nuevamente, la situación es bien distinta para el caso de las sobretensiones de maniobra que para las de rayo:

-En el caso de las sobretensiones de maniobra, ya hemos observado que se suele asumir que la sobretensión impuesta es fija, y condicionada por los descargadores presentes.

El único aspecto probabilístico que se puede tener en cuenta es, por lo tanto, la distribución de probabilidad del aguante de las aislaciones en aire.

Como se ha mencionado más arriba, no obstante, lo habitual es diseñar las distancias en aire en base a las distancias mínimas recomendadas por las normas para los BSL normalizados.

-En el caso de las sobretensiones de rayo, en cambio, también la sobretensión impuesta será una variable aleatoria, dado que la magnitud de las tensiones dentro de la estación será función de la sobretensión incidente.

Por lo general el diseño está condicionado principalmente por los “backflash” en las líneas que inciden en la Estación; y las variables aleatorias a tener en cuenta son, fundamentalmente, la distancia desde la Estación a la que se produce el impacto y el valor de la corriente de rayo.

No obstante, en los niveles más altos de tensión puede ser necesario analizar también las sobretensiones debidas a falla de blindaje, particularmente en los casos en que la corriente de rayo no es tan alta como para llegar a provocar un contorno de la cadena de aisladores de la línea

Con un diseño adecuado del blindaje de la propia Estación, suele ser prácticamente nula la incidencia de rayos directamente en la Estación.

A diferencia de lo que ocurre en el diseño de líneas, suele no considerarse al viento como una variable aleatoria. Los pocos casos en que es necesario verificar las distancias a tierra de conductores soportados por cadenas de aisladores que se balancean con el viento suelen resolverse, simplemente, asumiendo un valor de viento máximo.

En relación a la coordinación de aislación a las sobretensiones temporarias, cabe realizar los siguientes comentarios:

-Al igual que en el caso de las líneas aéreas, las líneas de fuga de los aisladores se eligen en función de la polución existente.

-Al igual que en el caso de las líneas aéreas, es necesario realizar un análisis de los niveles de sobretensión temporaria (TOV) en el sistema, ya sea por la ocurrencia de eventos frecuentes y comunes en todos los sistemas (faltas fase-tierra, energización de transformadores en condiciones especiales del sistema) como en situaciones excepcionales (rechazos de carga, ferresonancia, autoexcitación).

Algunos de estos eventos se analizan con técnicas clásicas de transitorios electromagnéticos (ferresonancia, energización de transformadores), otros requieren también el análisis de transitorios electromecánicos de mayor duración (rechazo de carga, autoexcitación), en tanto que otros se analizan con modelos de régimen (cortocircuitos fase-tierra)

Los valores de TOV estimados sirven para verificar o diseñar los niveles de aislación a frecuencia industrial de los equipos de la estación, el comportamiento térmico de los equipos saturables (transformadores, reactores), la capacidad de apertura de corrientes capacitivas de disyuntores y, fundamentalmente (en lo que se refiere a la coordinación de aislación de estaciones), algunas de las características básicas de los descargadores.

-A diferencia de las sobretensiones de maniobra, salvo casos excepcionales no es posible seleccionar los descargadores para que “amarren” las TOV.

Nosotros nos concentraremos en describir un procedimiento de coordinación de aislación a las descargas atmosféricas originadas por descargas inversas en las líneas incidentes a la estación, en base a estudios de transitorios electromagnéticos.

PROCEDIMIENTO DE DISEÑO A LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (Adaptado de [Hileman])

SÍNTESIS DEL PROCEDIMIENTO

1)Selección preliminar del BIL , en base a la experiencia con proyectos previos (recordar que para cada nivel de tensión IEC ofrece sólo 2 o 3 opciones)

2)Selección de los descargadores (Ver capítulo específico en el curso)

Normalmente la selección de los tipos de descargadores se basa en criterios de sobretensiones temporarias (TOV) y sobretensiones de maniobra, y no en sobretensiones de rayo.

a) Tensión de operación continua del descargador (COV) al menos un 5 % superior a la tensión de operación máxima fase-tierra.

b) Curva TOV-t de acuerdo a la evaluación preliminar de TOV en el sistema. (a verificar durante estudios detallados de capacidad de energía)

c) Clase de descarga preliminar normalizada para cada nivel de tensión (a verificar durante estudios detallados de capacidad de energía).

3)Cantidad y ubicación de los descargadores

En forma preliminar se ubican descargadores junto a cada equipo con devanados (reactor, transformador) y terminal de cable conectado cerca de una línea aérea, y a la entrada de líneas (al menos para EAT). Se puede hacer una estimación preliminar de las distancias máximas de ubicación de los descargadores respecto a transformadores y reactores en base a las fórmulas simplificadas descritas más abajo.

4)Simulación y eventual redefinición de BIL y/o cantidad y ubicación de descargadores

Efecto distancia:fórmula simplificada

La tensión máxima en un punto de terminación abierta a distancia L de un pararrayos con tensión residual U_p puede estimarse como:

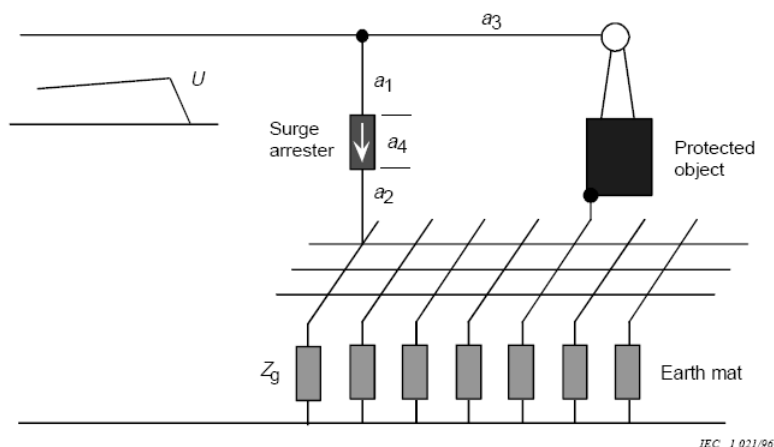
$$U = U_p + 2SL/c \quad \text{si } U_p \geq 2SL/c$$

$$U = 2U_p \quad \text{si } U_p < 2SL/c$$

siendo S la tasa de crecimiento de la onda de tensión incidente.

La fórmula contempla los 2 casos posibles: que el descargador “actúe” (drene una corriente importante) antes o después del regreso de la onda reflejada desde el punto en estudio.[Hileman]

L se mide sobre el conductor de conexión, y debe incluir la propia altura del descargador y la conexión desde el descargador a la malla de tierra.



$$L = a_1 + a_2 + a_3 + a_4$$

La pendiente S debe incluir el factor de reducción debido a la presencia de otras líneas conectadas a la Estación. Más adelante se indican métodos de estimación de S.

La precisión de la fórmula es afectada por las capacidades paralelo que la onda “encuentre” en el camino.

En particular: si desea aplicarse a un transformador modelado con una capacidad paralelo, puede dar resultados optimistas [Hileman].

Los “peores” valores se dan para capacidades de transformadores de entre 1 y 6 nF [Hileman]

Esta fórmula suele usarse para hacer una estimación preliminar de la distancia de los descargadores preseleccionados a transformadores o reactores

MÉTODO IEC PARA DEFINIR LA FUENTE DE TENSIÓN

Si bien es posible hacer un estudio muy detallado, en el cuál se modela la Estación y la línea aérea en la cuál se produce la descarga, y se simula la descarga en una de sus torres; en el caso de sobretensiones generadas por descargas inversas (backflash) es posible simplificar el estudio de forma que sólo sea necesario modelar en detalle la propia Estación.

La descarga se modela en esos casos por medio de una fuente de tensión conectada al punto en el cuál llega la línea.

Caso backflash

El modelo de esta fuente se obtiene mediante el siguiente procedimiento

1) Selección de la probabilidad de falla.

Se asume que la descarga se produce en la línea a no menos de una cierta distancia L_a de la Estación, la cuál queda definida por la tasa de descargas incidentes en la Estación que se considera aceptable.

Esta probabilidad de falla R_a (expresada en descargas por año) es un dato de entrada al problema, y los valores habituales de la inversa de $R_a = \text{MTBF}$ (tiempo medio entre descargas) oscilan entre 400 y 1000 años.

2) Distancia mínima de impacto

La distancia L_a (en km) se calcula como $L_a = R_a / N_{BF} \cdot 100$, siendo N_{BF} la tasa de falla de la línea a las descargas inversas (expresada en descargas por 100 km-año). N_{BF} es un dato de entrada al problema, y se calcula con las técnicas de coordinación de aislación de líneas ya descritas.

La idea es que MTBF no sea “demasiado exigente” (demasiado alta, lo que equivale a diseñar con una probabilidad de descarga muy baja), por lo que se acepta que se produzcan fallas para descargas a distancias de la estación menores que L_a . El objetivo del diseño será, por lo tanto, coordinar la aislación de la Estación para que no se produzcan fallas de aislación para descargas producidas a distancias no inferiores a L_a .

3) Corriente de descarga

De acuerdo a la teoría vista de coordinación de aislación de líneas, se cumple la relación aproximada:

$$P(I > I_c) \cdot N_T = N_{BF}$$

I_c = corriente crítica de descarga inversa, en que se hace la aproximación de que es igual en todas las fases..

N_T = Número total de descargas en la torre por 100 km-año. Recordamos que N_T es aproximadamente igual al número total de descargas en la línea por 100 km-año multiplicado por 0,6, si se desprecia el número de descargas que causan falla de blindaje.

En la fórmula anterior se ha asumido (en forma simplificada) que la probabilidad de descarga inversa no depende del punto de la onda a frecuencia industrial al momento de la descarga del rayo en la torre..

Multiplicando y dividiendo por L_a :

$$P(I > I_c) = R_a \cdot 100 / (N_T \cdot L_a).$$

Como la función de probabilidad acumulada $P(I > I_c)$ es de expresión conocida, la relación anterior permite calcular I_c .

Comentario

Por supuesto que, aplicando la teoría de diseño de líneas vista, es posible calcular I_c para cada fase con precisión a partir de la geometría de la línea, resistencia de PAT, etc. La idea de este desarrollo simplificado es poder hacer una estimación de corriente crítica promedio a partir del dato (conocido o estimado) de la tasa de falla N_{BF} .

4) Tasa de crecimiento de la onda de tensión

4.1) Hipótesis

Se asume a continuación que las descargas se producen “exactamente” a distancia L_a . Esto se debe a que, como se verá a continuación, la pendiente de la onda incidente en la estación es mayor mientras más cerca sea el punto de descarga. Dado que esta pendiente es el parámetro principal para evaluar el “efecto distancia” dentro de la Estación, suponer la descarga a distancia L_a es asumir un “peor caso”.

4.2) Corrección de la distancia de impacto

Sea L_{sp} la longitud del primer vano de la línea. Si L_{sp} es muy pequeño, es razonable - sustituir L_a por $L_a + L_{sp}$, dado que la baja resistencia de la malla de tierra (cerca o directamente conectada a la primer torre) hace muy improbable que se produzca una descarga indirecta en la primer torre.

Si se quiere ser muy preciso, además, se debe incrementar L_a hasta alcanzar la próxima torre dado que, como hemos visto, las descargas indirectas se dan en las torres, y no en mitad del vano.

4.3) Corrección por efecto corona

Es razonable asumir que la pendiente de la onda de tensión inyectada en los conductores de fase es infinita en el punto en que se produce la descarga indirecta, a distancia L_a de la Estación.

En su viaje hacia la Estación, la pendiente va disminuyendo como consecuencia del efecto corona, de forma que a la entrada de la estación vale:

$$S = 1 / (K_{co} L_a) \text{ (kV}/\mu\text{s)}$$

K_{co} = Constante de efecto corona

Table F.1 – Corona damping constant K_{co}

| Conductor configuration | K_{co} ($\mu\text{s}/(\text{kV}\cdot\text{m})$) |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Single conductor | $1,5 \times 10^{-8}$ |
| Double conductor bundle | $1,0 \times 10^{-8}$ |
| Three or four conductor bundle | $0,6 \times 10^{-8}$ |
| Six or eight conductor bundle | $0,4 \times 10^{-8}$ |

4.4) Influencia de otras líneas conectadas

Si (aparte de la línea en que se produce la descarga) es posible asumir que siempre hay conectadas a la Estación otras $n-1$ líneas con la misma impedancia de onda, la onda incidente se dividirá por igual entre todas las líneas, y la pendiente S se reduce a S/n . Se observa, por lo tanto, que la presencia de otras líneas a la llegada de la Estación tiene una influencia decisiva en el resultado final.

En particular: una Estación en sus etapas iniciales de desarrollo (con pocas líneas conectadas) es más vulnerable a las descargas atmosféricas.

5) Valor de pico de la tensión incidente

Mediante fórmulas simplificadas [Hileman] es posible estimar las restantes características de la onda de tensión incidente, sin necesidad de hacer una simulación precisa de la descarga y el tramo de línea:

$$\text{Valor de pico: } E = (1 - K_n) \cdot R_i \cdot I \text{ (kV)}$$

K_n = Factor de acoplamiento fase-cable de guardia (valor aproximado 0,15 para líneas con 1 cable de guardia, 0,35 para líneas con 2 cables de guardia).

I = Corriente de rayo (kA).

R_i = Resistencia de puesta a tierra de la torre (Ω)

Se suele asumir $I = I_c$, a los sólo efectos de evitar ponerse en un “peor caso” extremo (corriente alta y pendiente alta).

Comentarios

-La fórmula de E indicada surge, obviamente, de suponer en forma simplificada que la tensión aplicada por el rayo en el extremo frío de las cadenas de aisladores depende exclusivamente de la corriente del rayo y de la resistencia de puesta a tierra.

-La forma rigurosa de tratar la corriente de descarga sería hacer un “barrido” por intervalos de todas las corrientes mayores a I_c , asociándole a cada una de ellas su probabilidad de ocurrencia (que disminuye al subir la corriente).

Si uno quisiera ponerse en un caso determinístico extremo, debería realizar las simulaciones con corrientes de truncamiento de la distribución de probabilidades (entre 200 y 300 kA, según los diversos autores).

Se suele tomar el valor preciso de resistencia de puesta a tierra, teniendo en cuenta los efectos de ionización del suelo:

$$R_i = R_0 / (1 + I/I_g)^{1/2}$$

R_0 = Resistencia de puesta a tierra para corrientes bajas (Ω). Es el valor que se suele medir en los ensayos de campo.

I_g = Corriente límite de ionización (kA)

$$I_g = 1 / (2\pi) \cdot E_0 \cdot \rho / R_0^2$$

ρ = Resistividad del terreno ($\Omega \cdot m$)

E_0 = Gradiente de ionización (kV/m). Valor habitual: 400 kV/m.

Estas fórmulas simplificadas se consideran válidas para conductores de puesta a tierra de hasta 30m de longitud, y para valores de pico E de hasta 1,6 veces el CFO (soportabilidad con probabilidad 50 % en ensayos con ondas de impulso “standard” 1,2/50 μs) de las cadenas de aisladores de la línea .

En particular: para valores de este orden (o incluso menores) es de esperar que la onda vuelva a descargar a través de alguna cadena de aisladores antes de llegar a la Estación.

En base a esta consideración cualitativa, es posible simplificar aun más el cálculo y asumir que E nunca supera:

$E = CFO (1+3\sigma)$, siendo σ la desviación standard (en p.u del CFO) de la distribución de probabilidad de aguante de la cadena de aisladores de la línea. El valor habitual de σ es del orden de 0,03 .

Nota

Esta fórmula simplificada de cálculo del valor de la fuente de tensión también es válida para el caso de las descargas directas.

6)Tiempo de cola

La cola de la onda se asume exponencial, con una constante de tiempo

$$\tau = Z_g.L_v/(R_0.c) \text{ (seg.)}$$

Z_g =Impedancia de onda del cable de guardia (valor típico 500 Ω para líneas con 1 cable de guardia, 270 Ω para líneas con 2 cables de guardia).

L_v =Vano promedio (m)

c = Velocidad de la luz=300 m/ μ s

7)Modelo de la fuente de tensión

Tenemos ya todos los elementos para proponer un modelo de fuente de tensión a conectar a la entrada de la Estación:

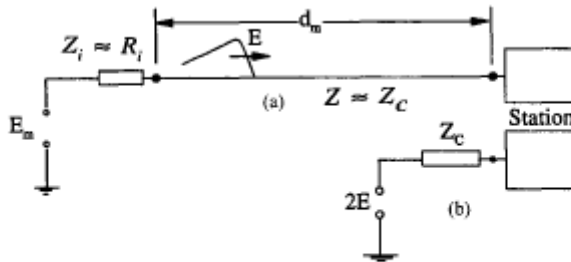


Figure 13 (a) General equivalent circuit; (b) reduced circuit.

El modelo (a) es más preciso,y consiste en una fuente de tensión de valor de pico E_m atrás de la resistencia de puesta a tierra R_i y de la impedancia de onda Z_c del conductor de fase ,de longitud $d_m=L_a$.

El valor de E_m es tal que se aplique E a la entrada de la Estación: $E_m=(Z_c+R_i)/Z_c.E$.

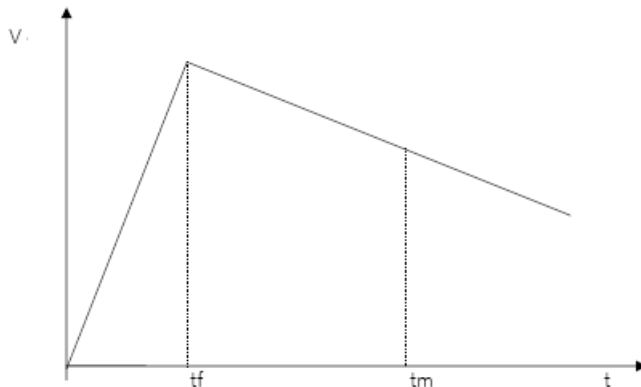
La presencia de R_i en el modelo permite considerar en forma simplificada las reflexiones al pie de torre de las ondas de tensión que regresan de la Estación, y que se propagan a través del camino de descarga que contornea las cadenas de aisladores.

El modelo (b) es más simplificado. Es un equivalente Thévenin ,y asumiendo que no se tienen en cuenta las reflexiones al pie de torre de las ondas que regresan desde la Estación (no se considera R_i).En particular: esto significa que el modelo es válido para períodos de estudio de hasta 2 veces el tiempo de tránsito a lo largo de d_m .

El conductor de fase se modela por medio de una resistencia concentrada, y la fuente de tensión es de amplitud $2E$ (tensión en vacío en el punto de conexión a la Estación, dado que la tensión se duplica en ese extremo de la línea si se supone abierta)

La forma de onda de la fuente de tensión se suele simplificar asumiendo que la onda está formada por 2 rectas:

- una recta inicial hasta el valor de pico, con la pendiente indicada
- una segunda recta desde el valor de pico que sea tal que el tiempo de cola indicado se alcance cuando la tensión es el 50 % del valor de pico.



Este tipo de fuente de tensión es uno de los modelos “standard” del EMTP.

Comentario

En estos modelos simplificados no se tiene en cuenta explícitamente el valor de tensión a frecuencia industrial en el momento de la descarga (aunque en los cálculos de la tasa de falla N_{BF} generalmente sí se tiene en cuenta). Ver [Hileman] para un tratamiento más detallado.

MODELADO DE LA ESTACIÓN

Los modelos de los elementos de la Estación para una simulación digital deben estar de acuerdo con el rango de frecuencias en juego para las descargas atmosféricas, que llegan hasta los 3 MHz.

Al igual que en el caso de las líneas aéreas, sólo se modela la fase en que se produjo el impacto.

Conexiones entre equipos: Se simulan por medio de circuitos “pi” o (al igual que las líneas aéreas) por medio de modelos de parámetros distribuidos.

En este último caso, la simulación en ATP requiere pasos de cálculo sumamente pequeños.

Si no se quiere hacer un cálculo preciso de los parámetros eléctricos de las conexiones, se pueden asumir inductancias del orden de $1\mu\text{H}/\text{m}$, capacidades del orden de $10\text{ pF}/\text{m}$, e impedancias de onda de entre 250 y 350 ohms.

Tramos de cables subterráneos. Se simulan como capacidades a tierra concentradas. Los valores dependen de la tensión, del tamaño y del tipo de aislación.

Ejemplo: Cable 630 mm² Cu, XLPE, 30 kV: 0,4 nF/m

Transformadores de potencia. Se modelan por medio de sus capacidades fase-tierra (en cada devanado) y entre devanados, y teniendo en cuenta las capacidades de los “bushings”.

Normalmente estos valores de capacidad en presencia de ondas de alta frecuencia bajan en forma importante (2 o 3 veces) respecto a los valores a frecuencia industrial que se miden en ensayos de fábrica.

En ausencia de datos [Hileman] sugiere modelar el transformador como un único capacitor fase-tierra de 2 a 4 nF.

Sólo en caso en que se desee también analizar las sobretensiones transferidas al lado de baja del transformador justifica modelar también las impedancias de dispersión.

En tal caso, se debe modelar de alguna forma el aumento de la resistencia con la frecuencia por efecto “skin”.

Descargadores El modelo es el convencional, usando la curva V(I) para ondas de corriente 8/20 µs.

Es conveniente modelar el tramo de conexión del descargador a la malla de tierra.

Otros equipos. Se modelan por medio de capacitores concentrados.

Obviamente, los equipos relevantes a modelar son los que tienen incorporados capacitores (transformadores de tensión capacitivos, disyuntores con capacitores de reparto de tensión), pero se suelen modelar también las capacidades parásitas de los restantes equipos.

([Cigre] recomienda modelar todo equipo con capacidad a tierra mayor de 0,5 nF).

Valores típicos en Estaciones 500 kV [Furnas]:

-Transformador de tensión capacitivo: 5,0 nF

-Disyuntor: 0,1 nF

-Seccionador: 0,1 nF

-Trampa de onda: 0,05 nF

-Transformador de corriente: 0,5 nF

-Reactor: 4,0 nF

Referencias

[Hileman] A.Hileman-Insulation coordination for power systems,1999

[Cigre]: Cigré-Guidelines for representation of network elements when calculating transients (Technical Brochure 39)

[Furnas]: Furnas-Transitorios elétricos e coordenacao de isolamento, 1987