

XXII JORNADAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO EN SUBESTACIONES A NIVEL DE 500 kV.

Náthali Morales, Ing
Gorki Barba, Ing.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

Resumen: en base a normas IEC, se establece los procedimientos para la selección de pararrayos para la protección contra sobretensiones y de la coordinación de aislamiento en subestaciones de extra alta tensión (EHV). Dichos procedimientos se aplican al caso particular de la S/E Pifo.

Se determina las posibles sobretensiones que aparecen sobre la subestación, para luego seleccionar el pararrayos que mejor se ajuste a los requerimientos del sistema, comparando los requerimientos eléctricos y mecánicos con las opciones ofrecidas por los fabricantes. Para el presente estudio se ha considerado pararrayos Siemens y ABB.

Relacionando las sobretensiones más elevadas y el efecto del pararrayos con el comportamiento deseado del aislamiento a través de un índice de fallas se determina una tensión soportada de coordinación para cada tipo de sobretensión y haciendo una distinción entre aislamiento externo e interno. De aquí se obtiene los mínimos valores de tensión soportada que satisfacen los criterios de seguridad y confiabilidad establecidos.

El efecto de disminución de la rigidez dieléctrica del aislamiento por las condiciones reales de operación se cubre con la aplicación de factores de seguridad y de corrección por altura, determinando así, las tensiones soportadas requeridas.

Finalmente, el nivel de aislamiento para los equipos de subestaciones de EHV queda cubierto al seleccionar valores normalizados de tensión soportada a impulsos atmosféricos y de maniobra, por lo que es necesario convertir las tensiones soportadas temporales requeridas a sobretensiones de maniobra equivalentes. Así se asegura la no ocurrencia de fallas de aislamiento en la subestación.

I. INTRODUCCIÓN

El constante incremento de la demanda energética a nivel mundial y principalmente en los países en vías de desarrollo, ha obligado a una constante evolución de los sistemas de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica. Con el fin de abastecer satisfactoriamente la demanda es necesario transportar la energía desde los centros de generación hacia los centros de consumo. Debido a que la ubicación de grandes proyectos de generación, principalmente hidroeléctricos, no coincide con las cercanías de los principales centros de consumo es

necesario contar con un sistema de transmisión capaz de transportar grandes cantidades de energía a través de largas distancias. Para satisfacer de forma eficiente estos requerimientos ha sido necesario incrementar cada vez más los niveles de tensión, llegando a transmitir a niveles de extra alta tensión EHV, con tensiones superiores a los 300 kV, e incluso de ultra alta tensión UHV, que considera tensiones mayores a los 750 kV.

En Ecuador se tiene prevista la construcción de grandes proyectos de generación, que obligan a contar con un sistema de transmisión de gran capacidad para transportar la energía generada hacia los grandes centros de consumo, Quito y Guayaquil, por lo que se tiene previsto implementar un sistema de transmisión a nivel de 500 kV. Como parte de este sistema se tiene la subestación Pifo en donde se implementará el procedimiento de coordinación de aislamiento [1] [2].

II. SOBRETENSIONES EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS.

Una subestación eléctrica está sujeta a eventos tales como: descargas atmosféricas, propagación de ondas de sobretensión por maniobras y fallas en el sistema, los cuales pueden provocar flameos o fallas de aislamiento, dando como resultado final daños en el equipo e incluso la salida de servicio de la subestación. Con el fin de adquirir protección ante tales eventos es necesario definir, las sobretensiones que puedan causarlos. Así se considera la siguiente clasificación de tensiones y sobretensiones:

Tensión permanente de frecuencia industrial.

Son tensiones de frecuencia industrial que se originan bajo condiciones normales de operación, y al ser tensiones permanentes su duración puede corresponder al tiempo de vida del equipo. Se considera que su valor es igual al de la tensión más elevada de la red (V_s), que a su vez, para niveles de alto voltaje corresponde a la tensión más elevada para equipos (V_m).

Sobretensiones temporales.

Tienen una duración relativamente larga, se consideran como de frecuencia industrial, y son de amplitudes inferiores a las de otros tipos de

sobretensión. Se originan debido a fallas a tierra u operaciones de maniobra, así:

Fallas a tierra.- la falla más común en los sistemas de potencia es el cortocircuito monofásico o fase – tierra, cuya amplitud depende de la conexión a tierra del neutro del sistema y de la ubicación de la falla. En sistemas con el neutro sólidamente conectado a tierra las sobretensiones son menores [3].

La magnitud de estas sobretensiones depende del factor de falla a tierra (k), que se define como la relación entre el voltaje más elevado en las fases no fallidas en presencia de falla y el voltaje en condiciones normales de operación en el punto de falla, tomando en cuenta valores de voltaje fase-tierra, rms y a frecuencia industrial. k se puede determinar en función de las impedancias de secuencia positiva ($Z_1 = R_1 + jX_1$) y cero ($Z_0 = R_0 + jX_0$) del sistema, tomando en cuenta la resistencia de falla R_f , según la Figura 1

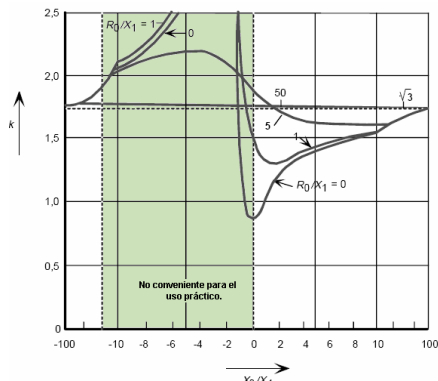


Figura 1. Factor de falla a tierra (k) en función de X_0/X_1 y $R_1/X_1 = R_f = 0$ [3].

En sistemas de EHV, usualmente el neutro está sólidamente conectado a tierra, De aquí que, k oscila entre 1.3 y 1.4 y la permanencia de la sobretensión es menor a 1 s.

Rechazo de carga.- ante la pérdida de carga en el extremo de una línea larga que se alimenta por su otro extremo, el flujo de corriente disminuye, incrementando el efecto capacitivo de la línea. Como resultado se tiene el Efecto Ferranti, que se manifiesta por una onda de tensión de crecimiento lineal a lo largo de la línea, dando como resultado que la tensión en el extremo abierto (V_2) y sin carga sea mayor que la tensión en el extremo de la fuente (V_1). La relación entre las tensiones V_2 y V_1 se puede determinar en función de la inductancia (L) y capacitancia (C) de la línea [4], así:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{1 - \frac{\omega^2 LC}{2}} \quad (1)$$

Las sobretensiones temporales por rechazo de carga toman valores de hasta 1.5 p.u. para líneas largas e inferiores a 1.2 p.u. en sistemas con líneas relativamente cortas.

Las sobretensiones por rechazo de carga son iguales para las tres fases del sistema y se controlan con compensación reactiva, así, el uso de reactores shunt, capacitores en serie o compensadores estáticos, reducen la elevación del voltaje.

Resonancia y ferrosresonancia.- en subestaciones el fenómeno de resonancia y ferrosresonancia puede ocurrir al combinar el efecto inductivo de transformadores y reactancias shunt, con el efecto capacitivo de líneas largas o banco de capacitares. Sin embargo, debido a que en un sistema de potencia se debe prevenir y limitar sobretensiones de esta naturaleza, éstas no se consideran para el diseño del aislamiento.

Sobretensiones de frente lento o maniobra.

Las sobretensiones de frente lento son de tipo impulso con un frente de onda de entre 20 y 5000 μs y un tiempo al valor medio de cola menor a 20 ms. Se originan ante la operación de equipos de maniobra, así:

Energización y Re-energización de líneas.- para el evento de energización, las sobretensiones se generan debido a la discrepancia de polos de los disyuntores, mientras que en el recierre se deben al efecto capacitivo de la línea que genera una carga atrapada en el proceso de apertura que provocan las sobretensiones durante el recierre.

La magnitud de estas sobretensiones se define como un valor estadístico con un 2% de ser excedido (Ve_2). Este valor se determina de simulaciones o como una aproximación en función de parámetros del sistema según la Figura 2.

Según la Figura 2, el valor de Ve_2 tanto para energización y recierre se escoge en función del porcentaje de compensación en paralelo, la presencia o no de resistores de preinserción y el tipo de alimentación: inductivo o complejo.

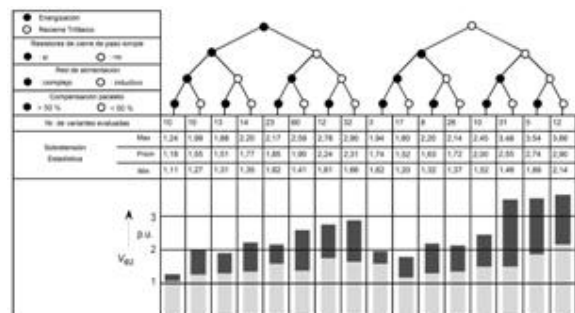


Figura 2. Guía para la selección de Ve_2 por energización y re-energización de líneas [3].

XXII JORNADAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

Inicio y despeje de falla.- ante estos eventos se originan sobretensiones cuya magnitud se puede determinar en función del factor de falla a tierra (k), Así:

$$\text{Al inicio de la falla: } V_e = (2k - 1) \quad (2)$$

$$\text{En el despeje de la falla: } V_e = 2 \text{ p.u} \quad (3)$$

Otros.- otros eventos que causan este tipo de sobretensiones son: transitorios durante un rechazo de carga, conmutación de corrientes inductivas y capacitivas y descargas atmosféricas sobre la línea en una ubicación lejana a la subestación. Estos eventos por lo general provocan sobretensiones menores a 2 p.u que suelen ser menores a las ocasionadas durante la energización o recierre de líneas.

Nota.- Los valores en p.u de las sobretensiones están referidos al valor pico fase-tierra de la tensión más elevada del sistema (V_s).

Sobretensiones de frente rápido.

Se caracterizan por ser tensiones tipo impulso con frente de onda de entre 0.1 y 20 μ s y un tiempo al valor medio de cola menor a 300 μ s. Se originan a partir de descargas atmosféricas y operaciones de maniobra, siendo estas últimas de menor importancia debido a que su amplitud es mucho menor, y por lo tanto no se consideran.

Descargas atmosféricas.- debido al hecho de que tener una descarga atmosférica dentro de la subestación es un evento muy poco probable a causa de su sistema de apantallamiento y área reducida, el estudio de descargas atmosféricas en subestaciones se realiza más bien respecto de las descargas que alcancen las líneas y se propaguen hacia la subestación. Así se tiene dos tipos de eventos:

- *Descargas atmosféricas directas.*- ocurren cuando el rayo cae directamente sobre los conductores de fase producto de una falla de apantallamiento en la línea.

- *Descargas inversas.*- ocurren cuando el rayo cae sobre el sistema de apantallamiento (hilo de guarda o torre) y la diferencia de potencial generada entre la estructura y el conductor de fase supera el nivel de aislamiento de la cadena de aisladores, provocándose el flameo de la cadena.

- *Descargas atmosféricas próximas a la línea.*- son descargas en las cercanías de una línea y que generan sobretensiones inducidas en ella. Para sistemas con tensiones mayores a 69 kV las tensiones inducidas no se consideran.

Las sobretensiones atmosféricas se pueden evitar mediante el adecuado diseño de las líneas de transmisión.

Sobretensiones de frente extra rápido.

Las sobretensiones de frente extra rápido se originan principalmente por operaciones de maniobra o fallas en subestaciones aisladas en gas (GIS), así como en transformadores de subestaciones de media tensión con conexiones cortas con los equipos de maniobra. Dado que las sobretensiones de frente extra rápido ocurren principalmente en GIS, para subestaciones aisladas en aire, no se consideran.

III. PARARRAYOS

Para la protección de subestaciones de EHV, que según Normas IEC corresponden a sistemas del Rango II, se usa pararrayos de óxido metálico (ZnO) sin explosores.

La selección del pararrayos se hace comparando los requerimientos eléctricos y mecánicos del sistema con las características ofrecidas por el fabricante.

Características eléctricas.

Voltaje de operación continua del pararrayos (V_c).- se define como el valor máximo permisible de voltaje sinusoidal rms de frecuencia industrial que se puede aplicar continuamente entre los terminales del pararrayos, sin presentar problemas térmicos. Para sistemas con neutro sólidamente conectado a tierra se tiene que:

$$V_c \geq 1.05 * \frac{V_s}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

Para sistema con neutro resonante:

$$V_c \geq \hat{V}_s \quad (5)$$

Tensión asignada o nominal (V_r) [5].- V_r se relaciona con la capacidad que tiene el pararrayos de operar frente a sobretensiones temporales en un período definido de tiempo, y se calcula a partir de dos criterios seleccionando de entre ellos el mayor valor obtenido, así:

$$V_{r,\min} \geq 1.25 * V_c \quad (6)$$

$$V_r' = \frac{TOV}{k_{TOV}} \quad (7)$$

$$V_r \geq \max(V_{r,\min}, V_{r1}', V_{r2}', \dots, V_{rm}') \quad (8)$$

TOV son las sobretensiones temporales del sistema y k_{TOV} viene del fabricante. En caso de que V_r sea mayor que $V_{r,\min}$ será necesario redefinir V_c , a partir de la expresión (6).

Corriente nominal de descarga I_n .- se define como el valor pico de una corriente tipo rayo normalizada de 8/20 μ s, y sirve para hacer una clasificación de los pararrayos, según se muestra en la Tabla 1.

(b)

XXII JORNADAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

Tabla 1. Clasificación de pararrayos de óxido metálico sin explosores según I_n [6].

	Valores de corriente nominal de descarga estandarizados (kA)				
	20	10	5	2,5	1,5
Tensión Asignada V_r (kV _{r.m.s} f-f)	360 <math>< V_r</math> 756	3 <math>< V_r</math> 360	V_r 132	V_r 36	-

Debido al apantallamiento de las líneas, no se tiene corrientes tan elevadas, así, para sistemas de EHV, $I_n = 20$ kA.

Nivel de protección del pararrayos.- está asociado con el valor pico de la tensión que aparece entre los terminales del pararrayos durante la circulación de la corriente de descarga, a esta tensión se la denomina tensión residual (V_{res}) o tensión de descarga. Los niveles de protección se especifican para impulsos de corriente tipo rayo (V_{pl}) y tipo maniobra (V_{ps}). Los pararrayos no protegen contra sobretensiones temporales, de aquí que por lo que la curva característica del pararrayos a tensiones de frecuencia industrial debe ser mayor que la característica de amplitud de la sobretensión temporal en función tiempo.

El fabricante en sus catálogos asocia valores de nivel de protección a cada valor de tensión asignada especificado.

Clases de descarga de línea y absorción de energía.- la clase de de descarga de línea se identifica como un número relativo a la capacidad de absorción de energía. De acuerdo con la norma IEC 60099-4 se definen cinco clases en donde, al incrementar el número de clase se incrementa también la capacidad de absorción de energía del pararrayos, así para los pararrayos de 10 kA se definen las clases de 1 a 3, mientras que para pararrayos de 20 kA se definen las clases 4 y 5.

La energía que el pararrayos debe ser capaz de absorber se relaciona con las sobretensiones temporales y de maniobra, así para eventos de cierre y recierre de líneas se tiene:

$$W = 2V_{ps} (V_e - V_{ps}) \frac{T_w}{Z} \quad (9)$$

Donde:

W energía a ser absorbida.

V_{ps} nivel de protección del pararrayos al impulso de maniobra (kV).

V_e amplitud de la sobretensión (kV).

Z impedancia característica de la línea (Ω).

T_w es el tiempo de propagación de la onda a través de la línea y es igual a la relación entre la longitud de la línea L (km) y la velocidad de propagación de la onda (0.3 km/ μ s).

Luego, la energía específica, se calcula dividiendo la energía a ser absorbida para el valor eficaz de la tensión nominal. Así:

$$W' = \frac{W}{V_r} \left[\frac{kJ}{kV(V_r)} \right] \quad (10)$$

Por lo general para sistemas del Rango II, es aconsejable seleccionar pararrayos clase 5.

Clase de alivio de presión o Capacidad de corto circuito.- se refiere a la capacidad del pararrayos de soportar corrientes de falla internas sin producir la explosión violenta de su revestimiento o cubierta, ya que esto podría ocasionar daños a los equipos circundantes o daños personales. Por lo tanto, se deberá seleccionar una clase de limitador de presión mayor o igual que la máxima corriente de falla que se pueda presentar.

En pararrayos con revestimiento polimérico colocado directamente sobre la columna de resistores el riesgo de explosión es nulo.

En cualquier caso, luego de un evento de esta naturaleza es necesario sustituir al pararrayos.

Características Mecánicas.

Revestimiento.- sirve para proteger a la columna de resistores de óxido metálico del ambiente exterior y para proveer una distancia de fuga adecuada.

Para garantizar que el revestimiento cumpla con su función, de acuerdo a las pruebas descritas en la Norma IEC 60099-4, éste debe soportar las tensiones mostradas en la Tabla 2.

Tabla 2. Tensiones soportadas para el revestimiento de pararrayos [6].

	$I_n = 10$ kA y 20 kA		$I_n = 5$ kA
	$V_r = 200$ kV	$V_r < 200$ kV	1kV V_s 52 kV
Impulsos tipo rayo.	$1.3 * V_{pl}^{(1)}$.		
Impulsos tipo maniobra.	$1.25 * V_{ps}^{(2)}$.	-	-
tensión de frecuencia industrial	-	$1.06 * V_{ps}$.	$0.88 * V_{pl}$.
1 Para alturas superiores a 1000 msnm, se adiciona un 10% por cada 1000 m [7]. 2 Para alturas superiores a 1000 msnm, se adiciona un 13% por cada 1000 m [7].			

Sin embargo, de acuerdo al nivel de contaminación del sitio de instalación del pararrayos sus

XXII JORNADAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

dimensiones físicas pueden cambiar en función de la distancia de fuga externa, que se calcula según la Tabla 3 [3].

Tabla 3. Distancias de fuga recomendadas.

Nivel de Polución	Mínima Distancia de Fuga Nominal mm/kV
I Ligera	16
II Media	20
III Fuerte	25
IV Muy Fuerte	31

La distancia de fuga seleccionada para los pararrayos se aplica también para el resto del equipo de la subestación.

Resistencia mecánica.- se refiere a esfuerzos estáticos y dinámicos. Los esfuerzos estáticos no causan mayor problema y se pueden reducir usando de conductores y abrazaderas livianas y de menor sección, ya que el pararrayos no conduce altas corrientes en forma continua. Los esfuerzos dinámicos en pararrayos están representados por el momento de flexión causado por el viento. Este momento se calcula en función de la Figura 3 y de la expresión 11.

$$M_w = \left(P \cdot H \cdot d_m \cdot C \cdot \frac{H}{2} \right) + (P \cdot D \cdot h \cdot (H - I)) \quad (11)$$

Donde:

P, presión dinámica del viento

$$P = \left(\frac{P_1}{2} \right) \times v^2$$

P₁, densidad del aire, 1.29 kg/m³.

d_m, valor medio del diámetro del revestimiento.

M_w, momento de flexión

H, longitud del pararrayos.

h, grosor del anillo de distribución de potencial.

D, diámetro del anillo de distribución de potencial.

I, distancia entre el anillo de distribución y la parte superior.

C, coeficiente de resistencia de las partes cilíndricas.

Igual a 0.8.

v, velocidad del viento (m/s).

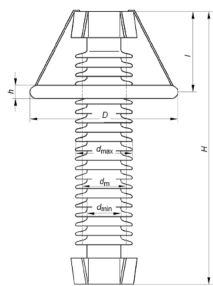


Figura 3. Dimensiones del pararrayos [6]

Comportamiento ante sismos.- tanto para el pararrayos, como para el resto del equipo de la subestación, se debe considerar el riesgo de sismos en la zona.

IV. CRITERIOS Y PROCEDIMIENTO PARA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO [3].

La coordinación de aislamiento tiene por objeto determinar las características de aislamiento necesarias y suficientes para garantizar que el nivel de tensión soportada por el aislamiento del equipo sea mayor que la tensión que pueda aparecer como resultado de una sobretensión transitoria, una vez que esta ha sido limitada por el dispositivo de protección o pararrayos. Tomando en cuenta las condiciones medioambientales y de ubicación de la subestación.

Para sistemas del Rango II se especifican tensiones soportadas a sobretensiones atmosféricas y a sobretensiones de maniobra, siendo estas últimas las de mayor importancia para este rango. Se considera además, que un aislamiento externo es autorecuperable y que uno interno es no autorecuperable.

A continuación se detalla el procedimiento de coordinación:

Paso 1. Sobretensiones representativas, V_{rp}.

Corresponden a las sobretensiones más severas dentro de cada grupo.

Sobretensión temporal representativa V_{rp}.- es la sobretensión de amplitud rms igual al máximo valor asumido o determinado de entre las sobretensiones de esta clase y cuya forma de onda corresponde a una onda estandarizada de tensión de corta duración a frecuencia industrial, es decir 1 minuto y 60 Hz.

Sobretensión de frente lento representativa (V_{rp} = V_{ps}).- tiene una forma de onda estandarizada de impulso tipo maniobra y su máxima amplitud puede ser un valor máximo asumido o puede ser definida por una función de distribución de frecuencia de ocurrencia de las amplitudes de las sobretensiones de frente lento. La función de distribución de sobretensiones de frente lento sin considerar el uso de pararrayos se caracteriza por su valor del 2% de ser excedida (V_{e2}), como se muestra en la Figura 4.

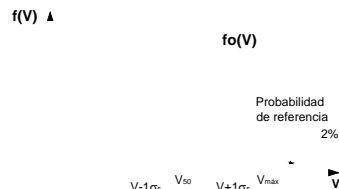


Figura 4. Distribución de sobretensiones.

XXII JORNADAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

En caso de contar con pararrayos V_{rp} corresponde a V_{ps} .

Sobretensión de frente rápido representativa.- en el siguiente paso se define directamente la tensión soportada de coordinación.

Paso 2. Tensiones soportadas de coordinación, V_{cw} .

En V_{cw} se relaciona las sobretensiones representativas y el efecto de los pararrayos con el comportamiento deseado del aislamiento en función de un índice de fallas (R).

Para sobretensiones temporales y de maniobra, V_{cw} se determina multiplicando los valores de V_{rp} por factores de coordinación (K_c) según el tipo de aislamiento. Para sobretensiones atmosféricas se usa un método estadístico.

V_{cw} para sobretensiones temporales.- se considera un factor de coordinación igual a uno y por lo tanto $V_{cw} = V_{rp}$.

V_{cw} para sobretensiones de frente lento.-se calcula por separado para aislamientos externos o autorecuperables que para aislamientos internos o no autorecuperables, con criterios estadísticos y determinísticos respectivamente.

- *V_{cw} para aislamiento externo.*- se considera un factor de coordinación estadístico (K_{cs}) que considera el riesgo de falla del aislamiento (R), y puede estimarse a partir de la Figura 5. El factor K_{cs} se aplica sobre V_{e2} .

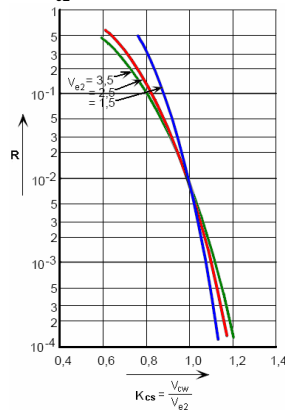


Figura 5. Riesgo de falla (R) vs K_{cs} .

- *V_{cw} para aislamiento interno.*- se considera un factor de coordinación determinístico (K_{cd}), que incluye el uso de pararrayos. El valor de K_{cd} se halla a partir de la Figura 6 y se aplica sobre el nivel de protección del pararrayos (V_{ps}).

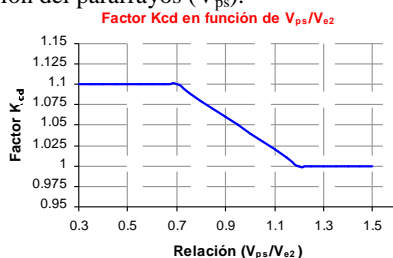


Figura 6. K_{cs} en función de V_{ps}/V_{e2} .

V_{cw} para sobretensiones de frente rápido.- se determina de un método estadístico simplificado que considera el uso de pararrayos para la protección a descargas atmosféricas, el riesgo de falla expresado a través de tasas de falla aceptables y las características propias de las líneas de transmisión asociadas a la subestación. El resultado para V_{cw} aplica tanto para aislamiento interno como externo. Al contrario que para las sobretensiones de maniobra, la tensión sobre el equipo protegido no es igual que V_{pl} , así:

$$V_{rp} = V_{pl} + 2ST \quad (12)$$

Donde:

V_{rp} : sobretensión en el equipo, kV.

S: pendiente del frente de onda de sobretensión que alcanza la S/E, kV/ μ s.

T: tiempo de viaje de la onda de sobretensión atmosférica, μ s.

$$T = \frac{L}{c}$$

L: distancia de separación entre el pararrayos y el equipo protegido, m.

c: velocidad de la luz, 300 m/ μ s.

Poniendo S en función de los factores que afectan su valor se tiene entonces que:

$$V_{cw} = V_{pl} + \frac{A}{n} \frac{L}{(L_{sp} + L_a)} \quad (13)$$

$$\text{Con: } L_a = \frac{R_a}{R_{km}} \left[\frac{1/\text{año}}{1/\text{Km} * \text{año}} \right] \quad (14)$$

Donde:

V_{cw} tensión soportada de coordinación, kV

A parámetro definido según el tipo de línea conectada a la subestación, kV. La Tabla 3.1 muestra valores para A.

n menor número de líneas conectadas a la subestación (n = 1 ó n = 2).

L_{sp} longitud vano de línea contiguo a la subestación, m.

L_a longitud de línea para la cual la tasa de salidas es igual a la tasa de fallas aceptable para los equipos, m.

R_a tasa de fallas aceptable para el equipo, 1/año.

XXII JORNADAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

R_{km} tasa de salidas de la línea, 1/m* año .

Riesgos de falla aceptables para equipos están entre 0.001 a 0.004 fallas/año, mientras que para líneas R toma valores de 0.1/100 km/año hasta 20/100 km/año, siendo las tasas más bajas para redes de transmisión.

Tabla 4. Factor A según la configuración del conductor [3]

Configuración del Conductor	K_{co} ($\mu\text{s}/(\text{kV}^*m)$)	A (kV)
1 conductor x fase.	1.5×10^{-6}	4500
2 conductores x fase	1×10^{-6}	7000
4 conductores x fase	0.6×10^{-6}	11000
6, 8 conductores x fase.	0.4×10^{-6}	17000

Paso 3. Tensiones soportadas requeridas, V_{rw} .

Para el cálculo de V_{rw} se considera los factores que hacen disminuir la soportabilidad del aislamiento en las condiciones reales de servicio. Estos factores se aplican sobre V_{cw} de acuerdo al tipo de aislamiento, y son:

- *Factor de corrección por altura (K_a).*- se aplica al aislamiento externo y sirve para compensar la disminución de la rigidez dieléctrica con el incremento de la altura sobre el nivel del mar.

$$K_a = e^{m \left(\frac{H-1000}{8150} \right)} \quad (12)$$

Donde:

H: altura sobre el nivel del mar.

m: según la Figura 7 para sobretensiones de maniobra y $m = 1$ para sobretensiones atmosféricas y temporales.

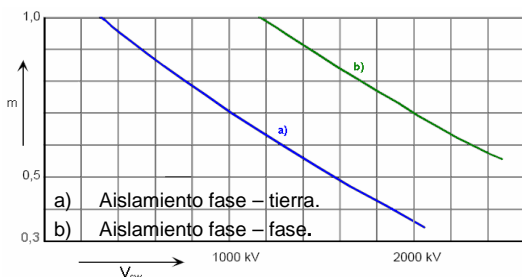


Figura 7. Exponente m en función de V_{cw} [3].

- *Factor de seguridad (K_s).*- toma los siguientes valores según el tipo de aislamiento:

$K_s = 1.05$ para aislamiento externo.

$K_s = 1.15$ para aislamiento interno.

Paso 4. Nivel de aislamiento normalizado.

Consiste en seleccionar valores normalizados de tensiones soportadas mayores o iguales que V_{rw} ,

para definir así el nivel de aislamiento de los equipos. Dado que el nivel de aislamiento para sistemas de EHV se define sólo para impulsos tipo rayo y maniobra, es necesario convertir las tensiones V_{rw} temporales a tensiones de maniobra equivalentes. Los factores de conversión son:

- Aislamiento externo seco y limpio: 1.4
- Aislamiento externo húmedo: 1.7
- Aislamiento interno en gas (GIS): 1.6
- Aislamiento interno líquido: 2.3
- Aislamiento interno sólido: 2.0

Una vez hecha la equivalencia se deberá verificar que los valores resultantes queden cubiertos con el nivel de aislamiento a impulsos de maniobra.

Los valores estandarizados se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Valores normalizados tipo impulso.

V. EJEMPLO DE APLICACIÓN, S/E PIFO.

El procedimiento de coordinación se aplicará para la

20	125	450	950	1550	2100
40	145	550	1050	1675	2250
60	170	650	1175	1800	2400
75	250	750	1300	1950	
95	325	850	1425	2100	

S/E Pifo del sistema de transmisión a nivel de 500 kV previsto para el año 2013 y que se muestra en la Figura 8.

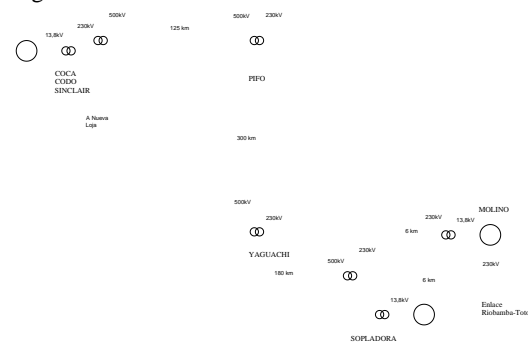


Figura 8. Sistema de transmisión a 500 kV.

A continuación se detallan los parámetros asociados al sistema.

Tabla 6. Datos de las líneas del sistema a 500 kV

Líneas.	R (Ω)	X (Ω)	B (μs)
C.C.S – Pifo 1 (125 km)	2.862	40.425	637.637
C.C.S – Pifo 2 (125 km)	2.862	40.425	637.637
Pifo – Yaguachi (300 km)	6.87	97.02	1530.33
Yaguachi	–	4.122	58.212
			918.198

XXII JORNADAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

Sopladora (180 km)			
-----------------------	--	--	--

Tabla 7. Reactores en los extremos de las líneas.

Líneas	MVAR en c/extremo	TOTAL MVAR
C.C.S – Pifo 1	30	60
C.C.S – Pifo 2	30	30
Pifo – Yaguachi	120	240
Yaguachi – Sopladora	60	120

Tabla 8. Impedancias de secuencia del sistema.

Secuencias	R (Ω)	X (Ω)
Positiva (+)	1.729	32.675
Negativa (-)	1.420	32.371
Cero (0)	3.193	31.318

Además como datos generales del sistema se tiene:

- Tensión nominal: 500 kV
- Frecuencia nominal: 60 Hz
- Número de fases: 3
- Sistema con neutro sólidamente conectado a tierra.
- Tensión más alta del sistema (V_s): 525 kV.
- Valor de tensión base ($kV_{pico\ fase - tierra\ de\ V_s}$)

Además la S/E Pifo se encuentra ubicada a 2830 msnm, con presencia de viento a 90 km/h y se ha considerado tener grado de contaminación III (fuerte) considerando la posible caída de ceniza volcánica en la zona.

Además el pico de corriente y la potencia de cortocircuito en la barra de 500 kV son de 25.36 kA y de 8404.39 MVA.

Selección del pararrayos.

Para la selección del pararrayos en primer lugar se deberá definir las sobretensiones en la subestación, que según los criterios de la Sección II resultaron ser las siguientes.

Tabla 9. Sobretensiones representativas V_{rp} .

Sobretensión.	Valor (p.u)	Valor ($kV_{pico\ f-t}$)
Temporal	1.3	557.26
De frente lento (V_{e2})	2.2	943.05
De frente rápido	-	-

De los datos del sistema y la Figura 2, se tiene que V_{rp} de frente lento corresponde a la energización de la línea C.C.S – Pifo.

Siguiendo los pasos descritos en la Sección III se ha determinado los requerimientos del sistema para la selección del pararrayos, obteniendo los siguientes resultados:

Características eléctricas:

- Voltaje de operación continua: $> 318.26\ kV_{rms}$
- Tensión asignada o nominal: $> 397.83\ kV_{rms}$
- Corriente nominal de descarga In: 20 kA
- Capacidad de absorción de energía: 2.91 kJ/kV
- Nivel de protección V_{pl} (kV_{pico}) a 20 kA: el menor posible.
- Nivel de protección V_{ps} (kV_{pico}) a 2 kA: el menor posible.

Características mecánicas:

- Tensión soportada a impulsos tipo rayo: $1752\ kV_{pico}$
- Tensión soportada a impulsos de maniobra: $1449\ kV_{pico}$
- Distancia de fuga: 13125 mm
- Material del revestimiento: polimérico.
- Carga dinámica por el viento: 2144.18 Nm
- Comportamiento ante sismos: se requiere de un buen comportamiento.

Luego al comparar las opciones ofrecidas por los fabricantes Siemens y ABB, se tuvo que la mejor opción y que cumple con todos los requerimientos del sistema es el pararrayos modelo PEXLIM T-T 420-TH550 de ABB, principalmente por tener valores bajos para el nivel de protección.

Definición del nivel de aislamiento.

El nivel de aislamiento se determina siguiendo cada uno de los pasos descritos en la Sección IV y considerando la ubicación de pararrayos junto al transformador de potencia y la entrada de las líneas para la protección del resto del equipo de la S/E. Los resultados obtenidos para cada paso, así como el nivel de aislamiento total se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Resumen del procedimiento de coordinación de aislamiento.

	Sobretensión Temporal.		Sobretensión de Frente Lento o de Maniobra		Sobretensión de Frente Rápido o por Impulsos Atmosféricos.	
	Aislamiento Externo.	Aislamiento Interno.	Aislamiento Externo.	Aislamiento Interno.	Aislamiento Externo.	Aislamiento Interno.
Paso 1: Sobretensiones Representativas V_{rp}	394.04 kV _{rms_f-t}		$V_{e2} = 943.05 \text{ kV}_{\text{pico_f-t}}$ $V_{ps} = 830 \text{ kV}_{\text{pico_f-t}}$		Se calcula directamente V_{cw} .	
Paso 2: Tensiones soportadas de Coordinación V_{cw}						
Factores de coordinación:	$K_c = 1$		$K_{cs} = 1.1$	$K_{cd} = 1.064$	Transformador: $V_{cw} = 1155.14 \text{ kV}_{\text{pico_f-t}}$	
	$V_{cw} = V_{rp}$ $V_{cw} = 394.04 \text{ kV}_{\text{rms_f-t}}$		$V_{cw} = V_{ps} * K_{cs}$ $1037.3 \text{ kV}_{\text{pico_f-t}}$	$V_{cw} = V_{e2} * K_{cd}$ $883.12 \text{ kV}_{\text{pico_f-t}}$	Resto del Equipo: $V_{cw} = 1364.67 \text{ kV}_{\text{pico_f-t}}$	
Paso 3: Tensiones soportadas de Requeridas V_{rw}						
Factor de corrección por altura: $K_a = e^{m \left(\frac{H-1000}{8150} \right)}$	1.25	-	1.17	-	1.25	-
Factor de Seguridad K_s :	1.05	1.15	1.05	1.15	1.05	1.15
	$V_{rw} = V_{cw} * K_a * K_s$ 517.17 kV_{rms_f-t}	$V_{rw} = V_{cw} * K_s$ 453.15 kV_{rms_f-t}	$V_{rw} = V_{cw} * K_a * K_s$ 1274.38 kV_{pico_f-t}	$V_{rw} = V_{cw} * K_s$ 1015.6 kV_{pico_f-t}	$V_{rw} = V_{cw} * K_a * K_s$ Transformador: 1516.12 kV_{pico_f-t} Equipo: 1791.13 kV_{pico_f-t}	$V_{rw} = V_{cw} * K_s$ Transformador: 1328.41 kV_{pico_f-t} Equipo: 1569.37 kV_{pico_f-t}
Paso 4: Nivel de Aislamiento Normalizado V_w						
SIW = $V_{rw} * \text{Factor de conversión}$ (Valores máximos)	SIW = 879.19	SIW = 1042.23	Nivel de Aislamiento para equipos del Rango II.			
	kV _{pico_f-t}	kV _{pico_f-t}	1300 kV _{pico_f-t}	1050 kV _{pico_f-t}	Transformador: 1550 kV_{pico_f-t}	Transformador: 1425 kV_{pico_f-t}
					Resto de Equipo: 1800 kV_{pico_f-t}	Resto de Equipo: 1675 kV_{pico_f-t}

VI. CONCLUSIONES

- Un parámetro determinante para la selección de V_{ps} del pararrayos es la capacidad de absorción de energía, ya que a menor nivel de protección se requiere mayor capacidad de absorción.
- Los pararrayos de revestimiento polimérico (silicona) tienen el mismo desempeño eléctrico que los de revestimiento de porcelana, pero sus características mecánicas son superiores, de ahí que se ha recomendado el uso de pararrayos con este tipo de revestimiento.
- Para sistemas del Rango II el nivel de aislamiento se define únicamente para impulsos de maniobra y atmosféricos, por lo que es necesario convertir las V_{rw} temporales a tensiones de maniobra equivalentes (SIW) y verificar que queden cubiertas por el nivel de aislamiento seleccionado.
- Para sobretensiones de maniobra la distancia de separación entre los equipos y el pararrayos no tiene incidencia debido a su frente de onda muy poco escarpado.
- Para sobretensiones de frente rápido, la distancia de separación entre el equipo y el pararrayos toma incidencia, incrementando la tensión que aparecerá sobre el equipo. Dando como resultado niveles de aislamiento menores para los equipos directamente protegidos y niveles mayores para el resto de equipos.
- Las condiciones ambientales al sitio de ubicación de la S/E Pifo afectan a los resultados del nivel de aislamiento externo.
- Se puede asegurar que el nivel de aislamiento determinado en el presente estudio es un resultado conservador que garantizará la no ocurrencia de fallas de aislamiento en la subestación.

VII. RECOMENDACIONES.

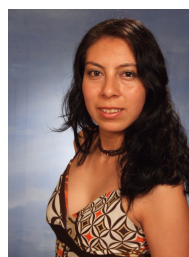
- Los resultados obtenidos en este trabajo corresponden a un estudio teórico de coordinación de aislamiento, por lo que para corroborar estos resultados será necesario hacer simulaciones en software adecuados como es el caso del ATP considerando toda la información exacta de la S/E Pifo.
- Hacer un estudio y selección adecuados de los disyuntores para el sistema de 500 kV, para controlar las sobretensiones de maniobra o frente lento.
- Al escoger los niveles de protección del pararrayos se debe verificar que el valor seleccionado corresponda al valor de tensión nominal previamente definido, para garantizar que se esté operando en una misma curva V-I.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CONELEC, Plan Maestro de Electrificación 2007 -2016. Ecuador, diciembre 2007.

- [2] TRANSELECTRIC S.A, Plan de Expansión de Transmisión Período 2008 – 2017, diciembre 2007.
- [3] INTERNATIONAL STANDARD IEC 60071-2, Insulation Co-ordination – Part 2: Application guide. Third Edition, 1996-12.
- [4] IBRAHIM, A.I; DOMMEL, H.W, A Knowledge Base for Switching Surge Transients, 2003.
- [5] SIEMENS; HINRICHSEN, Volker, Descargadores de Sobretensiones de Óxido Metálico. Fundamentos. Berlín, septiembre de 2002 sistema.
- [6] INTERNATIONAL STANDARD IEC 60099-4, Surge Arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems. Second Edition, 2004 – 05.
- [7] ABB, EXLIM Technical Information, Selection Guide for ABB HV Surge Arresters, Edition 3, 1995 – 02.

IX. BIOGRAFIAS.



Nátthali Morales. Nacida en Quito el 20 de febrero de 1983, realizó sus estudios secundarios en el Colegio Manuela Cañizares y continuó con sus estudios en la Escuela Politécnica Nacional. Obtuvo el título de Ingeniera en Electrónica y Control en el año 2007 y el de Ingeniera Eléctrica en el año 2008. Al momento se desempeña en la división de Ingeniería y Construcción de Subestaciones en la Compañía Nacional de Transmisión de Energía, TRANSELECTRIC S.A.

Gorki Barba. Ing. Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional, al momento se desempeña en la división de Ingeniería y Construcción de Subestaciones en la Compañía Nacional de Transmisión de Energía, TRANSELECTRIC S.A.