

Estado del arte de las metodologías para la coordinación de aislamiento de subestaciones a partir de sobretensiones de tipo atmosférico

Andrés M. ZAPATA, Mario A. SUARÉZ

*Universidad Pontificia Bolivariana, Cir. 1 #70-01, of. 11-308, Medellín Colombia
msuarez@h-mv.com*

Resumen: En este artículo se realiza un estudio del estado del arte de las metodologías para coordinación de aislamiento aplicado a subestaciones. En la exploración se hace énfasis en la forma de determinar el nivel de aislamiento requerido para sobretensiones de origen atmosférico. En esta exploración, se analiza la expresión que describe la Norma IEC 60071-2 para el cálculo de sobretensiones representativas de coordinación ante impulsos tipo rayo, se realiza un análisis comparativo entre las Normas (IEC, IEEE y otras) respecto a sus metodologías en el tratamiento de sobretensiones de origen atmosférico y la aplicación del factor de corrección atmosférico según la altura de la instalación. Copyright © 2013 UPB Kosmos.

Abstract: This article presents a study of the state of the art of the methodologies for insulation coordination applied to substations. On examination how to determine the level of insulation required for lightning overvoltages. In this exploration, the information have been analyzed the expression, which describe the IEC 60071-2 rule, for calculating representative coordination with surge lightning impulse, the analysis have been comparatived between the standards (IEC, IEEE and others) about their methodologies in the treatment of lightning over voltages and application of atmospheric correction factor depending on the height of the installation.

Keywords/Palabras clave: Insulation, lightning, substations insulation coordination, overvoltage / Aislamiento, rayo, coordinación de aislamiento en subestaciones, sobretensión.

1. INTRODUCCIÓN

Las descargas atmosféricas son un fenómeno que pone exigencias especiales a los sistemas eléctricos. Su aparición es imposible de predecir y de evitar, lo que sí está en la mano de la ingeniería es controlarlas, darle manejo en tierra y minimizar su impacto sobre las personas animales o equipos que pueda afectar.

Pero en el caso más puntual de la ingeniería eléctrica es de gran importancia que estas descargas atmosféricas, al impactar sobre algún elemento del sistema eléctrico, no tengan consecuencias sobre los equipos, pudiéndolos dañar y produciendo indisponibilidad y cortes en el suministro de energía.

Por tanto, es crítico al momento del diseño de subestaciones el cálculo y dimensionamiento de los aislamientos de sus equipos, de tal manera que se pueda garantizar que al momento de una descarga atmosférica, la sobretensión incidente no afecte ningún elemento conectado en el patio de la subestación.

Para esto se han desarrollado diferentes metodologías para el procedimiento de coordinación de aislamiento, las cuales difieren dependiendo de la tendencia y del país donde se utilicen.

En este trabajo se hace una exploración de las metodologías utilizadas actualmente para la coordinación de aislamiento y se analiza su forma de aplicación en diferentes regiones del mundo.

2. SOBRETENSIONES Y COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO

La conductividad en todos los materiales, obedece a la migración de partículas cargadas. Los conductores poseen un elevado número de electrones libres que se mueven al aplicarle un campo eléctrico, a diferencia de los materiales aislantes los cuales poseen muy pocos electrones libres.

En el momento en que se incrementan los esfuerzos eléctricos en determinado aislamiento a un nivel suficientemente alto, la resistividad del aislamiento varía de un valor alto, a un similar al de un conductor. Esta variación de resistividad se denomina disrupción o falla del aislamiento y se desarrolla principalmente en tres pasos (Torres, 2010).

- La ionización inicial en un punto o varios.
- El aumento de un canal ionizado a través de la distancia del aislamiento.
- Aparición de arco eléctrico y la transición a una descarga auto mantenida.

2.1. Variación temporal y espacial

El punto de vista temporal está relacionado con los parámetros de la descarga atmosférica caracterizados por la variación multianual,

anual, mensual y diaria. El punto de vista espacial se relaciona con la magnitud de los parámetros de la descarga atmosférica y como estos varían local y globalmente.

2.2. *Parámetros del rayo*

Existen alrededor de 15 parámetros mensurables determinados por investigadores dedicados a estudiar la física del rayo. Según el orden de magnitud espacial, se va desde los fenómenos atómicos los cuales comienzan con la electrificación de la nube de tormenta en una magnitud de 10-13 km, hasta la circulación del aire de la nube de tormenta, la cual da por terminado el proceso de carga, en escalas de decenas o centenas de kilómetros. En el tiempo los órdenes de magnitud están comprendidos desde los 10⁻⁶ segundos, tiempo en el cual duran los pasos del líder escalonado, hasta el tiempo total que dura una tormenta, el cual puede ser hasta de horas.

El tener conocimiento de los parámetros característicos del rayo desde el punto de vista tecnológico, da la posibilidad de realizar diseños óptimos y proteger adecuadamente seres vivos y equipo tanto eléctrico como electrónico, además de ofrecer un mantenimiento oportuno, generando de esta manera operaciones confiables, económicas y seguras. A continuación se presentan dichos parámetros del rayo (Torres, 2010).

- Nivel Cerámico
- Densidad de descargas a tierra - DDT
- Amplitud de la corriente de retorno de rayo
- Multiplicidad
- Polaridad del rayo

2.3. *El estudio de las sobretensiones*

Una sobretensión es una tensión variable con el tiempo, entre una fase y tierra o entre fases, cuyo valor cresta es superior al valor de cresta de la tensión máxima de un sistema. Se tienen básicamente dos tipos de sobretensiones que son las externas y las internas, las cuales defieren solamente de la localización de los eventos que causarán. Las sobretensiones externas son originadas fuera del sistema considerado, teniendo como fuente principal las descargas atmosféricas. En cuanto a las sobretensiones internas, se producen por eventos dentro del sistema de potencia en sí, como por ejemplo maniobras en interruptores, corto circuitos entre otros (Furnas, 1987).

Se tienen tres categorías de sobretensiones:

- Sobretensiones temporales.
- Sobretensiones de maniobra.
- Sobretensiones atmosféricas

2.4. Coordinación de aislamiento

La coordinación de aislamiento es la selección de la rigidez dieléctrica de un equipo en relación con las tensiones que pueden aparecer en el sistema en el cual el equipo operará, considerando las condiciones de servicio y las características de los equipos de protección contra sobretensiones disponibles

Más puntualmente, el objetivo de la coordinación de aislamiento es determinar las características suficientes y necesarias de los aislamientos, para que los equipos de las redes interconectadas y más específicamente de las subestaciones no se vean afectados, garantizando que el nivel de tensión soportada por el aislamiento no sea menor que las posibles sobretensiones transitorias luego de haber sido limitada por el pararrayos. (HMV Ingenieros 2003).

Tipos de aislamientos

- Aislamiento externo
- Aislamiento interno:
- Auto-recuperable:
- Aislamiento no-autorecuperable:

2.5. Sobretensiones representativas (U_{rp})

Corresponde a sobretensiones asumidas las cuales producen el mismo efecto dieléctrico en el aislamiento que las sobretensiones

de alguna clase dada ocurridas en servicio y ocasionadas a partir de diferentes orígenes. Son tensiones con la forma de onda normalizada para cada clase y se pueden definir por un valor o un conjunto de valores o una distribución de frecuencias de valores que caracteriza las condiciones de servicio (HMV Ingenieros 2003).

2.6. Tensión de coordinación soportada para sobretensiones de frente rápido (U_{CW})

Para cada clase de tensión, corresponde al valor de la tensión soportada de la configuración de aislamiento el cual cumple el criterio de desempeño en condiciones reales de servicio. (HMV Ingenieros, 2003).

3. NORMA IEC60071-2 PARA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO

El objetivo de realizar el estudio de coordinación del aislamiento en subestaciones (según IEC) es:

- Seleccionar el nivel de aislamiento normalizado para todos los equipos de la subestación
- Verificar la distancia de protección de los pararrayos con respecto a los equipos a proteger dentro de la subestación.

- Determinar las distancias mínimas en aire, entre fase y tierra, y entre fases.

3.1. Pendiente de una sobretensión de frente rápido (s)

La pendiente de una sobretensión de frente rápido (s) depende básicamente de tres factores (Morales, 2008):

- Del efecto corona por el cual, se experimentan reducciones en la rata de crecimiento de la onda ya que al presentarse este fenómeno, por las pequeñas descargas generadas alrededor del conductor, se crea un radio mayor del mismo, lo que equivale en un incremento de su capacitancia; esto afecta de manera determinante la velocidad de propagación de la onda original y en consecuencia la disminución de su pendiente.
- De la distancia que recorre la onda entre el punto de impacto de la descarga atmosférica y la subestación, disminuyendo la pendiente y teniendo menores efectos negativos sobre los equipos a proteger.
- Del número de líneas que se tengan conectadas a la subestación ya que entre mayor sea el número, menor será el impacto negativo, debido a que la pendiente inicial será dividida entre las líneas involucradas.

La ecuación para la determinación de la pendiente de una sobretensión de frente rápido (s) es

$$s = \frac{1}{n K_{co} X}, \quad (1)$$

donde n es el número de líneas aéreas conectadas a la subestación. Si la torre es multicircuito, y se tiene doble sistema de respaldo contra flameos, este factor debe estar dividido por dos. K_{co} corresponde a la constante de amortiguación para el efecto corona, se determina a partir de la Tabla 1, ($\mu\text{s}/(\text{kV}\cdot\text{m})$). X corresponde a la distancia del punto de impacto del rayo y la subestación (m).

Tabla 1. Constante de amortiguación para el efecto corona K_{co}

CONFIGURACIÓN DE CONDUCTORES	K_{CO} ($\mu\text{s}/(\text{kV}\cdot\text{m})$)
Un conductor	$1,5 \times 10^{-6}$
Haz de 2 conductores	$1,0 \times 10^{-6}$
Haz de 3 o 4 conductores	$0,6 \times 10^{-6}$
Haz de 6 u 8 conductores	$0,4 \times 10^{-6}$

3.2 Sobretensión representativa de frente rápido para descargas atmosféricas

La sobretensión representativa de frente rápido para descargas atmosféricas se determina a partir de:

$$U_{rp} = U_{pl} + \frac{A}{n} \frac{L}{L_{sp} + L_t}, \quad (2)$$

donde U_{rp} es la amplitud de la sobretensión representativa (kV), A es el parámetro que caracteriza el desempeño de una línea aérea conectada a una subestación ante descargas atmosféricas. Se determina a partir de la Tabla 2. U_{pl} es el nivel de protección al impulso atmosférico del pararrayos (kV). n corresponde al mínimo número de líneas conectadas a la subestación. ($n=1$ o $n=2$). L es la distancia entre el pararrayos y el equipo protegido (m). L_{sp} es el vano típico de la línea (m) y L_t se refiere a la longitud equivalente de la línea que produce un número de salidas igual a la tasa de fallas aceptables (m)

Tabla 2. Parámetros que describen el desempeño de una línea aérea conectada a una subestación ante descargas atmosférica

TIPO DE LÍNEA	A (kV)
LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN (Flameos fase-fase)	
Con crucetas aterrizadas (Flameos a tierra a baja tensión)	900
Líneas en postes de madera (Flameos a tierra a baja tensión)	2700
LÍNEAS DE TRANSMISIÓN (Flameos una sola fase a tierra)	
Un conductor	4500
Haz de dos conductores	7000
haz de cuatro conductores	11000
haz de seis y ocho conductores	17000

En el U_{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 (IEC 60071-2, 1996). Se determina a partir de:

$$U_{cw} = U_{pl} + \frac{A}{n} \frac{L}{L_{sp} + L_a}, \quad (3)$$

3.3. Determinación de la tensión de soportabilidad requerida

La tensión de soportabilidad requerida se obtiene al multiplicar en el caso del aislamiento externo la tensión soportada de coordinación por el factor de corrección por altura y por el factor de seguridad. En el caso del aislamiento interno basta con multiplicar la tensión soportada de coordinación por el factor de seguridad (no es necesario incluir el factor de corrección por altura debido a que ésta no tiene efectos en el aislamiento interno) (IEC 60071-2, 1996). La determinación de la tensión de soportabilidad requerida se determina a partir de:

$$\text{Aislamiento Externo } U_{rw} = U_{cw} \times K_a \times K_s \quad (4)$$

$$\text{Aislamiento Interno } U_{rw} = U_{cw} \times K_s \quad (5)$$

A partir de los valores de soportabilidad requerida, se selecciona el valor normalizado inmediatamente superior que cubra los valores requeridos para todos los tipos de sobretensiones. Estos valores se seleccionan a partir de las tablas: Niveles de aislamiento normalizados para las tensiones asignadas del rango I ($1\text{kV} < U_m \leq 245\text{kV}$) y Niveles de aislamiento normalizados para las tensiones asignadas del rango II ($U_m > 245\text{kV}$), las cuales se encuentran en la norma IEC 60071-1 (1993)

4. ANÁLISIS NORMA IEEE PARA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO

4.1. Método simplificado para la coordinación de aislamiento basado en la norma IEEE std 1313.2-1999

El método simplificado es apropiado para obtener una aproximación de los requerimientos de protección o el BIL para subestaciones relativamente simples o pequeñas. También puede ser empleado como parte de estudios preliminares para subestaciones complejas antes de realizar análisis detallados.

IEEE propone una subestación la cual en su entrada, presenta un frente de onda de una sobretensión incidente con su pendiente (s), ésta circula por el interruptor y llega al pararrayos en el pórtico de la subestación hasta alcanzar el transformador.

Las sobretensiones que se presentan a la entrada de la subestación son causadas por el flameo inverso o fallas en el blindaje de la línea de transmisión. Los tiempos T_c , T_b , T_T y T_A , corresponden a los tiempos de viaje de la onda (IEEE Std 1313.2, 1999).

4.2. Tensiones en los equipos

Diferentes tensiones se ven reflejadas en los equipos de la subestación, éstas se presentan a continuación:

E	Frente de onda de la sobretensión incidente
S	Pendiente de la sobretensión incidente
E_T	Sobretensión en el transformador
E_t	Tensión fase – tierra total en el transformador
E_d	Tensión de descarga del pararrayos
E_A	Es la suma de la tensión de descarga del pararrayos y la tensión de frecuencia industrial
E_j	Sobretensión en la unión pararrayos-barra
E_j	Tensión fase – tierra total en la unión pararrayos-barra
E_B	Sobretensión en el interruptor

E_b	Tensión fase – tierra total en el interruptor
E_o	Tensión en la cual el pararrayos comienza a comportarse linealmente en la característica de tensión vs corriente
T_C	Tiempo de vuelo entre la unión pararrayos-barra y el final de la línea abierta.
T_A	Tiempo de viaje entre el pararrayos y la unión pararrayos-barra
T_B	Tiempo de viaje entre la unión pararrayos-barra y el interruptor
T_T	Tiempo de viaje entre la unión pararrayos-barra y el transformador.
V_{PF}	Tensión de frecuencia industrial de polaridad opuesta.

$$s = \frac{K_s}{d'} \quad (6)$$

donde K_s es la constante de amortiguación por efecto corona kV/s y d' , es la distancia entre el punto de flameo y la subestación en km

La constante de amortiguación por efecto corona se determina a partir de la tabla 3

Tabla 3. Constante de amortiguamiento por efecto corona

Conductor	K_s (kV-km)/ μ S
Conductor sencillo	700
Haz de dos conductores	1000
Haz de 3 a 4 conductores	1700
Haz de 6 a 8 conductores	2500

4.3. Pendiente de la sobretensión incidente

Inicialmente en el método simplificado, se halla el valor de pendiente de la sobretensión mediante la siguiente expresión:

El cálculo de la distancia del punto de flameo d , la cual se requiere en el cálculo de la pendiente de la sobretensión incidente, se realiza mediante la siguiente expresión:

$$d = \frac{1}{n(MTBF)(BFR)}, \quad (7)$$

donde n es el número total de líneas incluyendo la que recibe la descarga (IEEE Std 1313.2, 1999).

- MTBF: Tiempo Medio entre Fallas, MTBF [años].
- BFR: Tasa de flameo inverso, BFR [fallas por 100 km/año].

4.4. Metodología propuesta

La metodología que propone la norma IEEE STD 1313.2-1999 para el cálculo de la coordinación de aislamientos en subestaciones, básicamente se fundamenta en las siguientes etapas:

Etap 1: Análisis disposición y determinación de tensiones y sobretensiones en cada parte del sistema

✓ **Tensión en el pararrayos**

Ed : Tensión de descarga del pararrayos

✓ **Tensión en el transformador.**

ET: Sobretensión en el transformador

Et: Tensión fase – tierra total en el transformador

✓ **Tensión en la unión pararrayos-barra**

EJ: Sobretensión en la unión pararrayos-barra

✓ **Tensión en el interruptor**

EB: Sobretensión en el interruptor

Eb: Tensión fase – tierra total en el interruptor

✓ **Tensión en la entrada de la subestación.**

EB1: Sobretensión en la entrada de la subestación

Eb1: Tensión fase – tierra total en la entrada de la subestación

Etap 2: Determinación de los BIL en cada parte del sistema

Etap 3: Estandarización de los BIL

Etap 4: Factor de corrección atmosférica aplicados a :

- Bujes del transformador externos
- Interruptor
- Seccionador

Etapa 5: Estandarización de los BIL con corrección atmosférica previamente aplicada.

5. METODOLOGÍAS PARA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO APLICADAS A NIVEL MUNDIAL

5.1 Comparación entre las metodologías IEC e IEEE

Las metodologías IEC e IEEE, difieren en cuanto a su metodología procedimental para la coordinación de aislamiento ya que en la norma IEC a partir de una serie de parámetros definidos se llega a un valor de tensión de soportabilidad, mientras que la norma IEEE analiza toda la subestación por separado, hallando tensiones en cada una de las partes representativas del sistema y; a partir de estas tensiones se determinan las soportabilidades requeridas, para por último proceder a normalizar.

De las gráficas 1 y 2 es posible apreciar que la norma IEEE ofrece más valores de normalización, en comparación con la Norma IEC.

Un punto de similitud entre ambas normas es que comienzan a considerar sobretensiones de maniobra a partir de 245 kV a diferencia de la normatividad Japonesa, que se analizará en el próximo numeral, la cual debido a sus bajos niveles de aislamiento, la empieza a contemplar a partir de 187 kV. En síntesis los valores de normalización de las Normas IEEE e IEC son muy similares en

cuanto a las tensiones de operación y los niveles normalizados de soportabilidad.

En ambas metodologías, para el análisis de las sobretensiones de tipo atmosférico, se tienen en cuenta la pendiente del frente de onda de la sobretensión incidente y el efecto corona, adoptando para su análisis valores muy similares según el número de conductores que se tengan en las líneas que llegan a la subestación (yamagiwa, 2005).

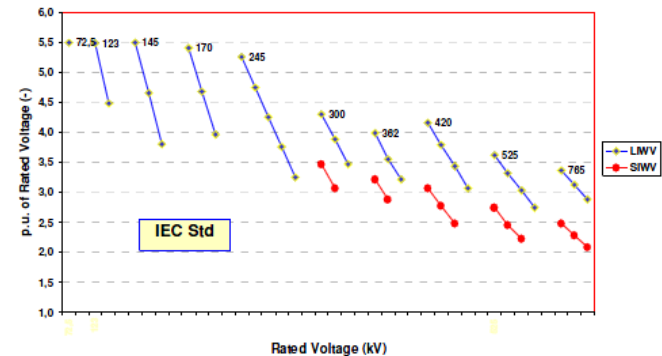


Figura 1. Tensiones de soportabilidad ante impulsos tipo rayo y tipo maniobra según la norma IEC. Tomada de yamagiwa. Et al.(2005),

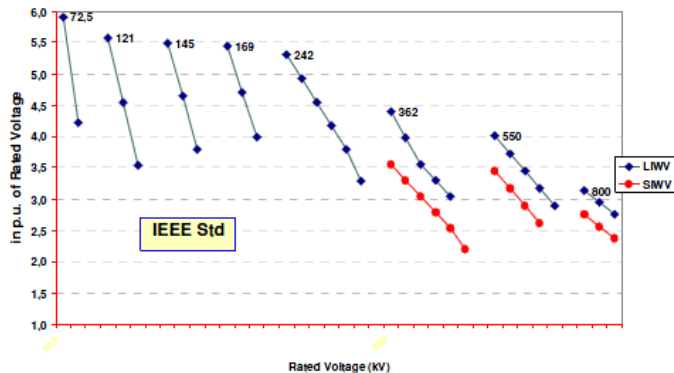


Figura 2. Tensiones de soportabilidad ante impulsos tipo rayo y tipo maniobra según la norma IEEE. Tomada de Yamagiwa, Et al.(2005),

5.2 Comparación del factor de corrección atmosférico

- La recomendación IEC60071-2 usa la siguiente expresión

$$K_a = e^{\frac{H}{8150}} \quad (8)$$

donde H, corresponde a la altura sobre el nivel del mar (m).

- La recomendación IEEE STD 1313.2-1999 usa la siguiente expresión:

$$K_a = \frac{1}{e^{\frac{A}{8.6}}} \quad (9)$$

donde A, corresponde a la altura sobre el nivel del mar (km) y el denominador de la expresión a δ , correspondiente a la densidad relativa del aire.

De las ecuaciones 8 y 9, se tomaron alturas sobre el nivel del mar a partir de 1km hasta 3 km (a manera ilustrativa) y se evaluaron las expresiones con el fin de obtener los factores de corrección atmosférica, obtenidos a partir de ambas metodologías. Los resultados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Factores de corrección atmosférica variando alturas, respecto a las Normas IEEE-IEC

Altura sobre el nivel del mar	Ka IEEE	Ka IEC
1000	1.12	1.13
2000	1.26	1.27
3000	1.41	1.44

De la tabla 4 es posible apreciar, que los factores de corrección atmosférica, a diferentes altitudes, son casi idénticos, lo cual muestra que las tensiones de soportabilidad requeridas obtenidas a partir del método propuesto por la IEEE o por IEC tienen en cuenta un parámetro en común de igual valor correspondiente a este valor. En la figura 3, es posible apreciar la comparación entre los factores de corrección atmosférica obtenida por la metodología propuesta por IEC e IEEE, a diferentes altitudes.

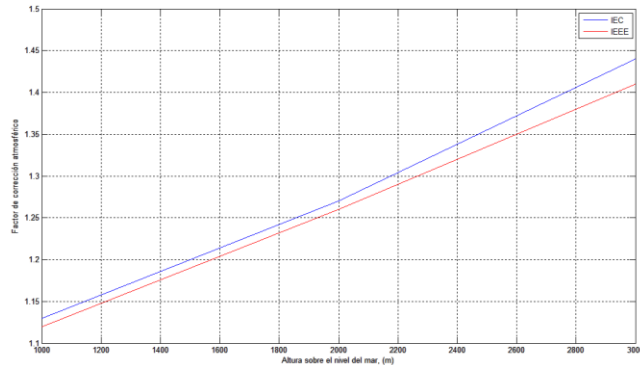


Figura 3. Comparación entre los factores de corrección atmosférico obtenido a partir de la metodología propuesta por IEC e IEEE

6. NORMA JAPONESA JEC JAPANESE ELECTROTECHNICAL COMMITTEE

En Japón, la normatividad empleada para la coordinación de aislamiento en subestaciones corresponde a la JEC Japanese Electrotechnical Committee y difiere bastante de las otras metodologías (IEEE e IEC). Los márgenes de seguridad aplicados para determinar la tensión de soportabilidad al impulso tipo rayo y al impulso por maniobra son menores que en las otras normas. Por ésta razón se encuentra que que en Japón los equipos de UHV tienen un nivel de aislamiento bajo.

Una factor que permite la disminución del aislamiento es que Japón tiene un nivel cerámico bajo, lo cual hace que se tenga un riesgo más bajo.

Otro factor que contribuye a que en Japón se tengan niveles de aislamientos tan bajos es que para los pararrayos empleados (tipo óxido de zinc -ZnO-), la norma JEC-2373-1998 recomienda que la tensión residual sea reducida en un 15% en comparación con la norma JEC-217-1984 y un 25% en comparación con la norma JEC-217-1994 respectivamente (yamagiwa, 2005).

Esta disminución en el aislamiento conlleva a que se consideren los efectos de las sobretensiones de maniobra a partir de 187 kV, a diferencia de las recomendaciones IEEE e IEC que las consideran a partir de 245 kV.

7. EJEMPLOS DE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTOS A NIVEL MUNDIAL

A continuación se presentan varios ejemplos de coordinación de aislamiento a nivel mundial, basados todos bajo la metodología propuesta por IEC 60071-2:

- Estudio de coordinación de aislamiento de la CFE para una subestación de 115 kV (México).(Villalobos, 2001)
- Coordinación del aislamiento en subestaciones de alta tensión y aplicaciones especiales. ABB - Perú Noviembre 2010. (Cuevas, 2010)
- Optimización del aislamiento en un proyecto para la ampliación de una Subestación a 220 kV a elevada altitud en Perú (Disenfeld, 2009).

En Bangkok la coordinación de aislamientos en subestaciones también se realiza basado en la metodología propuesta por IEC 60071-2, dado que en Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, se desarrolló un software para el cálculo de tensiones de soportabilidad, fundamentado en ésta metodología (Sangkakool, 2009).

7.1 Metodología empleada en la coordinación de aislamiento en subestaciones colombianas

En Colombia, la coordinación de aislamiento se realiza basada en la metodología propuesta por la norma IEC 60071-2, la cual en el pasar del tiempo y soportado por datos estadísticos y por la experiencia ha presentado un excelente resultado, habiéndose aplicado en subestaciones ubicadas a diferentes altitudes, con aislamientos dimensionados para soportar sobretensiones generadas por impulsos tipo rayo

8. CONCLUSIONES

Se realizó un estudio del estado del arte de las metodologías para la coordinación de aislamiento de subestaciones a partir de sobretensiones de tipo atmosférico, el cual se enfatizó en la forma de determinación del nivel de aislamiento requerido para sobretensiones de origen atmosférico, analizando la expresión que describe la norma IEC60071-2 para el cálculo de sobretensiones representativas de coordinación ante impulsos tipo rayo.

Se analizaron comparativamente las Normas (IEC, IEEE y otras) respecto a sus metodologías en el tratamiento de sobretensiones de origen atmosférico. Se llegó a que en las metodologías propuestas por la IEC e IEEE, se tienen consideraciones comunes, como la pendiente de la sobretensión incidente, y la característica de protección de los pararrayos. Además, en ambas metodologías, las constantes de amortiguación por efecto corona son casi idénticos. Las metodologías difieren en su procedimiento para encontrar las

tensiones de soportabilidad requeridas pero arrojan resultados similares en la selección del nivel de aislamiento.

Se pudo determinar que la norma IEC es la más usada a nivel mundial, ya que muchos países la adoptan para sus cálculos de coordinación de aislamiento en subestaciones incluyendo a Colombia.

En Japón tienen su propia metodología implementada por la JEC Japanese Electrotechnical Committee, sin embargo, en mucha parte Asia se realiza la coordinación de aislamiento basado en la norma IEC, como es el caso de sistemas de transmisión y subestaciones en China y Tailandia. La metodología propuesta por la JEC emplea factores de seguridad menores que las demás normas para aplicarlos a las sobretensiones de impulso tipo rayo e impulso tipo maniobra. Adicionalmente, acostumbran utilizar pararrayos con tensión residual reducida en un 15%. Por estas razones, se puede encontrar que los niveles de aislamiento usados en Japón son inferiores comparados con otros.

Las descargas atmosféricas son fenómenos que ponen exigencias especiales a los sistemas eléctricos, su aparición es difícil de predecir y aún de evitar, por tanto, las metodologías propuestas por la IEC, IEEE y JEC consideran factores de seguridad que conducen a niveles de aislamientos adecuados que evitan posibles daños en equipos y posibles indisponibilidades en el suministro de energía eléctrica .

Para el cálculo del factor corrección atmosférica a diferentes altitudes, la norma IEC propone una expresión que difiere de la IEEE, pero en su aplicación se obtiene que para ambas expresiones los valores de corrección son muy similares. Esto hace que las tensiones de soportabilidad halladas por ambas metodologías son afectadas por factores similares de corrección atmosférica.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a la *Universidad Pontificia Bolivariana* y todas las personas que estuvieron relacionadas en el desarrollo de este proyecto.

REFERENCIAS

- Cuevas, J. (2010). *Coordinación del aislamiento en subestaciones de alta tensión y aplicaciones especiales*. ABB-Perú.
- Disenfeld, H, Falconi O (2009). *Optimización del aislamiento en un proyecto E.T. 220KV a elevadas altitudes*. XIII ERIAC. Argentina.
- Furnas (1987). Universidad Federal Fluminense. *Transitorios eléctricos y coordinación de aislamientos - Aplicados en sistemas de potencia de alta tensión*. Río de Janeiro.
- HMV Ingenieros (2003). *Subestaciones de alta y extra alta tensión*. Colombia. Colombia

- IEC 60071-2 (1996). Insulation co-ordination –Part 2: Application guide -International Standard, Third edition.
- STD 1313.2 (1999). IEEE Guide for the Application of Insulation Coordination.
- Morales, N. E (2008). *Tesis de grado, coordinación de aislamiento en subestaciones a niveles de 500kV*. Quito Ecuador.
- Sangkakool, S. Petcharaks, K (2009). *A Computer Software for Insulation Co-Ordination According to IEC 60071-2*. Bangkok.
- Torres, H (2008). *Protección contra rayos*. Universidad Nacional de Colombia.
- Villalobos, Andrés. Ramírez, M. Del Razo J. (2001). *Estudio de coordinación de aislamiento, para una subestación tipo de 115 KV*. México.
- Yamagiwa, T. colombo, E. gallón, F. wahlstrom, B. (2005). *Possible applications and benefits expected through reduced insulation co-ordination voltages*.

AUTOR



Andrés Mauricio ZAPATA GALLEGO nace en Medellín Colombia; Ingeniero Electrónico egresado en el año 2012 de la *Universidad Pontificia Bolivariana*. Actualmente se encuentra esperando su segundo título como ingeniero electricista de la misma universidad.

Forma parte del semillero de transmisión y distribución (T y D) de la *Universidad Pontificia Bolivariana*



Mario Alberto SUÁREZ CARDONA; Ingeniero Electricista egresado en Mayo de 1994 de la *Universidad Pontificia Bolivariana*, Especialista en T&D del año 1999 de la misma universidad. Actualmente se desempeña como Jefe del Área de Estudios

Eléctricos en la empresa *HMV Ingenieros Ltda*.