

ESTUDIO DE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO, PARA UNA SUBESTACIÓN TIPO DE 115 kV

Andrés Villalobos R.; Maurilio Ramírez L.;
CFE-LAPEM

José del Razo
CFE-GERENCIA DE DISTRIBUCIÓN

1. RESUMEN

En este trabajo, se presentan los resultados del estudio de coordinación de aislamiento para la selección del nivel de aislamiento del equipo a instalar en una S. E. tipo de 115 kV, con objeto de normalizar el diseño de acuerdo a los criterios que se establecen. Se incluyen también los parámetros y consideraciones adicionales utilizados en el estudio y las recomendaciones sobre los dispositivos de protección a ser seleccionados.

2. INTRODUCCIÓN

La optimización de la selección del nivel de aislamiento, se logra utilizando la metodología establecida en la norma internacional IEC-60071-2 [1]. Sin embargo, la aplicación del método requiere una serie de parámetros a considerar como son: conocimiento del sistema en cuanto a las sobretensiones que puede generar, ubicación de la instalación referente a la altitud, actividad atmosférica en la zona, índices de comportamiento permitido, es decir, índice de falla del equipo e índice de salida de las líneas que estarán conectadas a la S. E.. En base a lo anterior y con objeto de seleccionar el nivel de aislamiento para el diseño de una subestación de 115 kV típica (barra principal-barra de transferencia) para diferentes zonas, el LAPEM conjuntamente con la Gerencia de Distribución realizó el estudio correspondiente.

Entre las condiciones más importantes de este trabajo están la consideración de instalaciones a dos gamas de altitud, las cuales son: instalaciones a altitudes menores a 1000 m e instalaciones entre 1001 y 2500 m.

Como resultados se indican los niveles de aislamiento adecuados para esas condiciones y así mismo, las recomendaciones adecuadas en relación a los dispositivos de protección adecuados para tal fin.

Artículo recomendado y aprobado por el Comité Nacional de CIGRÉ-México para presentarse en el Segundo congreso Bienal, del 13 al 15 de junio del 2001, en Irapuato, Gto.

3. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

Para el cálculo se siguió el procedimiento siguiente:

- . Determinar el criterio de comportamiento de las L. T. que llegan a la S. E. y del equipo a instalar.
- . Características de los apartarrayos (protección) en base a los cuales se selecciona el nivel de aislamiento.
- . Cálculo de coordinación de aislamiento.

3.1 Índices de Comportamiento.

Los criterios de comportamiento básicamente son dos:

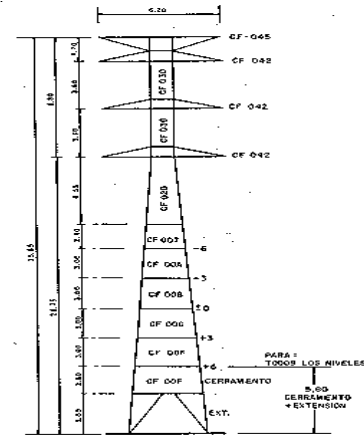
- L. T.: No. de salidas de la línea por cada 100 km en un año.
- Equipo: No. de fallas en determinado número de eventos por año.

En relación a la línea o líneas de transmisión que se conectarán a la S. E., el índice de salida está relacionado con:

- Geometría de la L. T.
- Resistencia al pie de la torre
- Magnitud de las corrientes de rayo
- Densidad de rayos a tierra

Para el caso en particular, la geometría propuesta es la mostrada en la figura 1.

Fig. 1.- Torre de L. T. a la entrada de la S. E.



Como datos adicionales a la geometría, se considera una densidad de rayos a tierra promedio de 5 rayos/km² y una resistencia al pie de la torre de 10 Ω. Con estos parámetros se determinaron los siguientes índices:

- . índice por falla de blindaje: 0,33 flameos/100 km-año.
- . índice de falla por flameo inverso: 0,15 flameos/100 km-año.

Por lo anterior, el índice de salida total de la línea es de 0,48 flameos/100 km-año.

En relación al índice de falla permitido para el equipo, de acuerdo a recomendaciones de IEC-60071-2 [1] y dado que no se tiene experiencia y estadística en México, se consideró un índice de falla de 1/400 año.

3.2 Apartarrayos

Una primera alternativa es la de considerar los apartarrayos con las características siguientes [2]:

- Apartarrayos clase estación
- Tensión nominal 96 kV
- Nivel de protección a impulso de rayo 237 kV @ 10 kA.
- Nivel de protección a impulso de maniobra 200 kV @ 500 A.

Otra alternativa consiste en considerar apartarrayos con las características siguientes:

- Apartarrayos clase estación
- Tensión nominal 90 kV
- Nivel de protección a impulso de rayo 222 kV @ 10 kA.

4. ESTUDIO DE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO

4.1 SOBRETENSIONES REPRESENTATIVAS INTERNAS DEL SISTEMA.

Básicamente son dos las sobretensiones que están relacionadas a la configuración del sistema en el momento del transitorio y a la operación misma, estas son: Sobretensiones Temporales y Sobretensiones de Frente Lento. Las primeras, en general y para nuestro caso, serán las generadas por fallas monofásicas a tierra y las segundas por maniobras de interruptores.

4.1.1 Sobretensiones Temporales.

Como se mencionó, para este trabajo se considera que dichas sobretensiones provienen de las fallas monofásicas a tierra y considerando que el sistema es un sistema sólidamente aterrizado, entonces, un valor típico de factor de falla a tierra es de 1,3. Por lo tanto, la sobretensión temporal será de:

$$4.1.2 \quad V_{pr} = \left[\frac{123}{\sqrt{3}} \right] (1,3) = 92 \text{ kV}$$

Sobretensiones de Frente Lento.

Ya que se tienen considerados apartarrayos a la entrada de la línea, la sobretensión representativa de frente lento corresponderá al nivel de protección del apartarrayos para impulso de maniobra (ya que esta será la tensión que vea el equipo protegido). Por lo tanto, de acuerdo a las características del apartarrayos para la primera alternativa, la sobretensión representativa de frente lento será de 200 kV.

4.2 TENSIONES DE AGUANTE DE COORDINACIÓN.

Como su nombre lo indica, en esta etapa del proceso se considera la relación ("coordinación") entre los eventos transitorios del sistema (sobretensiones representativas), los elementos de protección (apartarrayos) y el comportamiento deseado del equipo en términos de falla (índices). Todo eso combinado, deberá resultar en una tensión que debe aguantar el equipo cuando se encuentre en operación.

4.2.1 Tensión de Aguante de Coordinación para sobretensiones temporales

Para este tipo de sobretensiones, no existe una influencia adicional ya que su valor depende del sistema de puesta a tierra, por lo tanto, el valor de tensión de aguante de coordinación, será el valor determinado en el punto 4.1.1 es decir, 92 kV.

4.2.2 Tensión de Aguante de Coordinación para sobretensiones de frente lento

Se mencionó anteriormente que la sobretensión representativa se consideraba de 200 kV porque es el nivel de protección del apartarrayos, sin embargo, el valor de la sobretensión real en el sistema dependerá de diversos factores y por lo tanto será un valor probabilístico (apertura del interruptor en diferentes puntos de la onda senoidal, diferentes configuraciones del sistema durante la maniobra del interruptor o durante la liberación de una falla, etc...). Utilizando un método semi-probabilístico, el factor que toma en cuenta estas condiciones es el factor de coordinación, el cual se determina a través de la relación:

$$\frac{V_{ps} \text{ (nivel e protección del apartarrayos)}}{V_{e2} \text{ (sobretensión prospectiva del sistema)}} \quad (1)$$

Para este caso, la tensión prospectiva resultó de 261 kV, por lo que la relación es igual a:

$$\frac{V_{ps}}{V_{e2}} = \frac{200}{261} = 0,77$$

Y de la figura 4 de [1], el factor de coordinación es $K_{cd} = 1,086$ (fase-tierra). Por lo tanto, la tensión de aguante de coordinación para esta sobretensión será:

$$V_{ps} \times K_{cd} = 200 \times 1,086 = 217 \text{ kV}$$

4.2.3 Tensión de Aguante de Coordinación para sobretensiones de frente rápido

Para este tipo de sobretensiones, las cuales son debidas a descargas atmosféricas, la tensión de aguante de coordinación se estima por medio de un método estadístico simplificado, dado que no se cuenta con la estadística de parámetros necesaria para realizar un estudio estadístico formal. La expresión para determinar dicha tensión de aguante es:

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

La expresión anterior, básicamente nos indica que al nivel de protección del apartarrayos (V_{pl}) se adiciona un término función del tipo de estructura de las líneas que llegan a la S. E. (A), el número de líneas que llegan a la S. E. (n), de la distancia máxima de protección del apartarrayos (L); de la relación entre el índice de falla del equipo y el índice de salidas de la(s) línea(s) conectadas (L_{sp}) y de la distancia a la cual se considera que al incidir una descarga ésta afecta en forma importante al equipo de la S. E. (L_a). Para más detalles, ver [1].

Con los parámetros considerados en el punto 3, la tensión de aguante de coordinación para sobretensiones de frente rápido es:

$$V_{cw} = 237 + \frac{4500}{1} \frac{35}{183 + 490} = 471 \text{ kV}$$

En resumen, las tensiones de aguante de Coordinación (ase-tierra) para los tres tipos de sobretensiones son:

Temporales:	92 kV
Frente Lento:	217 kV
Frente Rápido:	471 kV

Estas serían las tensiones del equipo considerando el comportamiento deseado, los dispositivos de protección y las sobretensiones que se presentarán, sin embargo hay que considerar otros parámetros, lo cual se detalla en el punto siguiente.

4.3 TENSIONES DE AGUANTE REQUERIDAS.

Aún cuando ya se han determinado las tensiones de aguante, existen algunas otras influencias y parámetros a considerar, adicionalmente a lo establecido en el punto 4.2, las cuales se relacionan a la seguridad y al sitio en donde se instalará el equipo (S. E.). Los factores son:

- Factor de Seguridad
- Sitio de instalación (condiciones atmosféricas).

Para el primer factor, en [1] se sugieren los siguientes factores:

- . 1,05 para aislamientos externos
- . 1,16 para aislamientos internos

En cuanto a las condiciones atmosféricas, básicamente la mayor influencia es la altitud del sitio y los factores se determinan como:

$$K_a = e^{\left(\frac{m}{8150}\right)H} \text{ (para I. R.; I. M.; CA)}$$

$$K_a = \sqrt{e^{\left(\frac{m}{8150}\right)H}} \text{ (para CA aisl. contaminados)}$$

Donde H es la altitud en metros de la instalación y m un exponente que depende del tipo de esfuerzo.

Aplicando estas expresiones, para las altitudes de 1000 tenemos:

$$K_a = 1,13 \text{ (para I. R.; I. M. y CA aisladores limpios)}$$

$$K_a = 1,06 \text{ (para CA aisladores contaminados).}$$

Para altitudes de 2500 m:

$$K_a = 1,36 \text{ (para I. R.; I. M. y CA aisladores limpios)}$$

$$K_a = 1,17 \text{ (para CA aisladores contaminados).}$$

Por lo tanto, la tensión de aguante requerida, será la tensión de Aguante de Coordinación afectada por estos factores, es decir:

$$V_{rw(Aisl. Ext)} = (V_{cw})(\text{Factor Seg.})(\text{Factor Cond. Atmosf.})$$

$$V_{rw(Aisl. Int.)} = (V_{cw})(\text{Factor Seg.})$$

y las tensiones obtenidas son:

TABLA 1

TENSIONES DE AGUANTE REQUERIDAS EN kV					
Temporales		Impulso de Maniobra		Impulso Rayo	
Aisl Ext	Aisl Int	Aisl Ext	Aisl Int	Aisl Ext	Aisl Int
ALTITUD 1000 m					
109	102	258	250	558	542
ALTITUD 2500 m					
131	106	310	250	673	542

Ya que la selección final del nivel de aislamiento del equipo se realiza en base a los niveles normalizados, y además al fijar dos valores de los tres anteriormente calculados se fija automáticamente el otro, es necesario como último paso del proceso, el verificar que al probar en el laboratorio con dos de los esfuerzos, queda cubierto el tercero.

4.4 CONVERSIÓN A TENSIONES DE AGUANTE PARA PRUEBAS.

4.4.1 Conversión de la Tensión de I. M. a la equivalente de corta duración (60 hz).

De acuerdo a lo propuesto en [1], el factor de conversión para pruebas del aislamiento externo se determina como:

Para altitud de 1000 m

$$0,6 + \frac{V_{rw(I. M.)}}{8500} = 0,6 + \frac{258}{8500} = 0,63$$

Para Altitud de 2500 m

$$0,6 + \frac{V_{rw(I.M.)}}{8500} = 0,6 + \frac{310}{8500} = 0,636$$

y las tensiones equivalentes serán: 163 kV y 197 kV, respectivamente

4.4.2 Conversión de la tensión de I. M. a la equivalente de impulso de rayo.

De acuerdo a lo propuesto en [1], el factor de conversión se determina como:

Para Altitud de 10000 m

$$1,05 + \frac{V_{rw(I.M.)}}{6000} = 1,05 + \frac{258}{6000} = 1,093$$

Para Altitud de 2500 m

$$1,05 + \frac{V_{rw(I.M.)}}{6000} = 1,05 + \frac{310}{6000} = 1,084$$

y las tensiones equivalentes serán: 282 kV y 341 kV, respectivamente

Tabla 2.- Comparación de tensiones de aguante requeridas y convertidas

C. A. 60 Hz corta durac., 60 Hz kV	Impulso de Rayo		
	I. M. a C.A. kV	Imp. de Rayo kV	I. M. a I.R. kV
Altitud de 1000 m			
109	163	558	282
Altitud de 2500 m			
131	197	673	341

En los anexos A y B se incluyen tablas resumen con todos los valores del cálculo realizado.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

- Los resultados anteriores fueron obtenidos considerando apartarrayos instalado cerca del transformador y a la entrada de la Línea. Esto permite que todo el equipo de la S. E. esté protegido.
- La descarga atmosférica en este nivel de tensión (115 kV/9 es la de mayor influencia en la selección del aislamiento, tal como se observa en los valores mostrados en la tabla 2.
- Es importante hacer notar que los valores de Tensión de Aguante determinados están en base a unos índices de comportamiento establecidos, es decir, si se quisieran otros índices se deben calcular nuevamente las Tensiones de Aguante.
- De la tabla 2, se observa que la mayor tensión es la correspondiente a Impulso de Rayo, es decir, 558 kV para altitudes de 1000 m y de 660 para altitudes entre 1001 y 2500 m.

5. CONCLUSIONES.

- De las tablas 1 y 2, se puede concluir que los niveles de tensión a seleccionar en base a los valores normalizados establecidos en [3] son:

Para Altitudes hasta 1000 m

Tensión de Aguante al Impulso de Rayo: 550 kV
Tensión de Aguante a la Frec. del sist.: 230 kV
Esta selección, resulta en un nivel de aislamiento normalizado

Para Altitudes de 1001 a 2500 m

Tensión de Aguante al Impulso de Rayo: 650 kV
Tensión de Aguante a la Frec. del sist.: 230 kV
Esta selección no corresponde a un nivel de aislamiento normalizado.

- Para el caso de altitudes entre 1001 y 2500 m, existe la alternativa [4] de seleccionar una tensión de Aguante al Impulso de Rayo de 550 kV en lugar de la de 650 kV, si se instalan apartarrayos con tensión nominal de 90 kV y aceptar un índice de falla un poco mayor, es decir, de 1 falla en 300 eventos en lugar de 1 falla en 400 eventos, con la ventaja de que se adquiere equipo con un nivel de aislamiento de menor precio que uno especial.

Se hace notar que en base a los resultados obtenidos en este estudio, se seleccionó el equipo en la Gerencia de Distribución y ya se encuentran en operación.

6. BIBLIOGRAFÍA.

- [1]. IEC 60071-2.- "INSULATION COORDINATION PART 2.- APPLICATION GUIDE"
- [2].- ESPECIFICACIÓN CFE-VA400-17 "APARTARRAYOS TIPO ESTACIÓN"
- [3]. IEC 6007-1.- "INSULATION COORDINATION PART1.- DEFINITIONS"

ANDRÉS VILLALOBOS R.- Ingeniero Electricista egresado de la Universidad Autónoma de Zacatecas, maestría en Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Guanajuato. Ingreso a CFE en 1976 y actualmente encargado del Departamento de Transmisión del LAPEM. Profesor invitado de la maestría de Alta Tensión en la FIMEE de la Universidad de Gto.

MAURILIO RAMÍREZ L.- Nacido en México D.F. en 1942. Físico egresado de la Facultad de Ciencias de la UNAM donde hizo estudios de doctorado en física e investigación en materiales. Ingresó a Comisión Federal de Electricidad en 1971 como investigador para desarrollar técnicas de medición e instrumentación relacionados con los sistemas de potencia. Participó en los proyectos del Laboratorio de pruebas sintéticas y de Alta Tensión de la CFE.

Ingresó al Laboratorio de CFE en 1982 y trabajó en pruebas de equipos eléctricos de EAT e investigación del aislamiento externo a gran altitud. De 1985 a 1988 fue responsable del laboratorio de EAT del LAPEM y de 1988 a 1999 fue asesor técnico del Departamento de Alta Tensión. En 1999 se jubiló de la CFE.

De 1989 a 2000 impartió diversas materias en la maestría de alta tensión de la FIMEE de la U. de Guanajuato y actualmente es coordinador del Comité de Técnicas de Prueba y Medición del Capítulo de Potencia de la Sección México del IEEE y miembro de la CIGRE WG 33,03 "High Voltage Testing and Measuring Techniques". A partir de 1999 es profesor del Instituto Tecnológico Superior de Irapuato.

E-mail: maurilioramirez1@hotmail.com

JOSÉ DEL RAZO .- Ingeniero Electricista, egresado de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional en el año 1971. Ingresó a la División de Distribución Oriente de la C.F.E. en donde fue responsable de los Departamentos Divisionales de: Proyectos y Construcción, Mantenimiento Eléctrico y de Operación y Mantenimiento; desde 1991 está a cargo del Depto. de Asesoría de Construcción de la Gerencia de Distribución

**TABLA 3.- RESULTADOS DE LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO PARA ALTITUDES DE 0-1000 m
(considerando apartarrayos de $V_N=96$ kV)**

TIPO DE SOBRETENSIÓN		TEMPORALES				TRANSITORIAS					
						FRENTE LENTO				FRENTE RÁPIDO	
TIPO DE AISLAMIENTO		FASE-TIERRA		FASE-FASE		FASE-TIERRA		FASE-FASE		FASE-TIERRA Y FASE-FASE	
		Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo
Tensiones Representativas en servicio	V_{rp} (kV)	92	92	123	123	200	200	400	400	-	-
Tensiones de Aguante de Coordinación	K_c o K_{cd}	-	-	-	-	1,086	1,086	1,034	1,034	-	-
	V_{cw} (kV)	92	92	123	123	217	217	414	414	467	467
Tensiones de Aguante Requeridas	Factor Seguridad K_s	1,15	1,05	1,15	1,05	1,15	1,05	1,15	1,05	1,15	1,05
	Factor Altitud K_a	-	1,13	-	1,13	-	1,13	-	1,13	-	1,13
	V_{rw} (kV)	106	109	142	146	250	258	476	491	537	554
Tensión de Aguante Normalizada	Factor de conversión para pruebas	De Impulso de Maniobra a C. A. 60 Hz				0,5	0,63	0,5	0,639		
		De Impulso de Maniobra a Impulso de Rayo				1,10	1,093	1,10	1,105		
	Tensión de aguante requerida resultante (kV)	De Imp. Maniobra a C.A. (V_{rw} *Factor)				125	163	238	314		
		De Imp. Maniobra a Imp. De Rayo (V_{rw} *Factor)				275	282	524	543		
	Selección de la tensión de aguante normalizada	60 Hz corta duración: 230 kV				-	-	-	-	Impulso de Rayo: 550 kV	

**TABLA 4.- RESULTADOS DE LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO PARA ALTITUDES DE 1001-2500 m
(considerando apartarrayos de $V_N=96$ kV)**

TIPO DE SOBRETENSIÓN		TEMPORALES				TRANSITORIAS					
						FRENTE LENTO				FRENTE RÁPIDO	
TIPO DE AISLAMIENTO		FASE-TIERRA		FASE-FASE		FASE-TIERRA		FASE-FASE		FASE-TIERRA Y FASE-FASE	
		Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo	Interno	Externo
Tensiones Representativas en servicio	V_{rp}	92	92	123	123	200	200	400	400	-	-
Tensiones de Aguante de Coordinación	K_c o K_{cd}	-	-	-	-	1,086	1,086	1,034	1,034	-	-
	V_{cw}	92	92	123	123	217	217	414	414	467	467
Tensiones de Aguante Requeridas	Factor Seguridad K_s	1,15	1,05	1,15	1,05	1,15	1,05	1,15	1,05	1,15	1,05
	Factor Altitud K_a	-	1,36	-	1,36	-	1,36	-	1,36	-	1,36
	V_{rw}	106	131	142	176	250	310	476	591	537	666
Tensión de Aguante Normalizada	Factor de conversión para pruebas	De Impulso de Maniobra a C. A. 60 Hz				0,5	0,636	0,5	0,647		
		De Impulso de Maniobra a Impulso de Rayo				1,10	1,101	1,10	1,116		
	Tensión de aguante requerida resultante (kV)	De Impulso de Maniobra a C.A. (V_{rw} *Factor)				125	197	238	382		
		De Imp. de Maniobra a Imp. De Rayo (V_{rw} *Factor)				275	341	524	660		
	Selección de la tensión de aguante normalizada	60 Hz corta duración: 230 kV								Impulso de Rayo: 650 kV	