

SUBESTACIONES

FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y CONSIDERACIONES

**ING. JOSÉ CARLOS ROMERO ESCOBAR
PROFESOR TITULAR**

**UNIVERSIDAD NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

2.001

Ing. José Carlos Romero Escobar.

Ingeniero Electricista de la UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA 1968, con estudios en Líneas de Alta Tensión, Subestaciones Eléctricas y Sistemas de Potencia. Especialista en Centrales y Subestaciones, Protección de Sistemas Eléctricos y Líneas de Transmisión. Trece años de experiencia en INGETEC LTDA, desempeñándose como Ingeniero Especialista, Asesor del Director de División. Proyectos: Chivor, Salvajina, Guavio, Chingaza, Sexto programa de ensanches E.E.B. Veinte años como Ingeniero Consultor Gerente R.M.A. LTDA. Ingeniería. Profesor Titular de la Universidad Nacional de Colombia Docente de las Universidades Pontificia Javeriana , La Salle, América y del Meta. Autor de los Escritos *Protecciones Eléctricas, Seguridad Eléctrica, Filosofía General de Protecciones y Control, Seminario Internacional de Puestas a Tierra, Subestaciones Convencionales y Encapsulados en SF6. Director de Proyectos de Grado.*

CAPITULO 7

DESCARGADOR DE SOBRETENSIONES Y COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO EN SUBESTACIONES

INTRODUCCIÓN

La coordinación de aislamiento consiste en combinar las características de operación de los descargadores con las curvas voltaje-tiempo de los aislamientos de los equipos, de manera que se tenga una protección efectiva y económica contra los sobrevoltajes transitorios.

En este capítulo se recalca la importancia de la coordinación de aislamiento, la que radica esencialmente en poder determinar cuales deben ser los niveles de aislamiento de cada uno de los equipos sin que se haga un sobredimensionamiento que incremente los costos.

7.1. TERMINOLOGÍA EMPLEADA

- **Voltaje nominal de un sistema trifásico.** Es el valor rms fase a fase por el cual se identifica el sistema.
- **Valor eficaz de la más alta tensión.** Es el que aparece en cualquier punto del sistema bajo las condiciones normales de operación. (Voltaje más alto).
- **Voltaje más alto para el equipo.** Es la más alta tensión eficaz para la cual se diseñó el equipo con respecto a su aislamiento. Este voltaje, es el máximo valor para el cual puede ser usado el equipo (U_m).
- **Aislamiento externo.** Hacen parte del aislamiento externo las distancias en aire y superficies en contacto con el mismo que están sujetos a esfuerzos dieléctricos y a efectos de condiciones atmosféricas y otras condiciones como la polución, humedad, animales, etc.

- **Aislamiento Interno.** Lo constituyen las partes internas sólidas, líquidas o gaseosas, del aislamiento del equipo que se encuentran protegidas de las condiciones externas.
- **Aislamiento autorregenerativo.** Es el que recobra sus propiedades aislantes luego de una disrupción, el aislamiento de esta clase es generalmente externo.
- **Aislamiento No Regenerativo.** Es el que pierde sus propiedades aislantes o no las recobra completamente después de una descarga disruptiva.
- **Ensayo Tipo.** Es un ensayo hecho a un equipo con el propósito de mostrar que todas las unidades de este equipo están hechas con la misma especificación.
- **Ensayo de Rutina.** Es un ensayo al que se somete cada una de las unidades del equipo y al final al equipo en forma global.
- **Sistema con Neutro Aislado.** Es un sistema que no tiene conexión intencional a tierra excepto a través de aparatos de muy alta impedancia, de indicación, medida o protección.
- **Sistema de Puesta a Tierra Resonante (a través de una bobina de supresión de arco).** Es un sistema en el cual el neutro es puesto a tierra a través de una reactancia, teniendo ésta un valor tal, que durante una falla monofásica a tierra la corriente inducida a frecuencia industrial que pasa a través de la reactancia, neutraliza la corriente capacitiva de la corriente de falla a tierra.
- **Sistema con Neutro puesto a Tierra.** Es un sistema en el cual el neutro es puesto a tierra en forma sólida, a través de una resistencia o reactancia de valor bajo suficiente para reducir cualquier oscilación transitoria y para asegurar las condiciones de protección selectiva de falla a tierra.
- **Factor de Falla a Tierra.** Es la relación del voltaje rms más alto fase tierra a frecuencia industrial en la fase sana durante una falla a tierra, al voltaje rms fase a tierra a frecuencia industrial que deberá ser obtenido en la localización seleccionada sin la falla.

- **Sobrevoltajes.** Es cualquier voltaje dependiente del tiempo, entre fases o fase y tierra, teniendo un valor pico o valores que excedan al correspondiente valor pico derivado de la tensión más alta del equipo.

Estos pueden ser:

- A. De maniobra: Debido a una operación de maniobra, falla u otra causa cuya forma puede ser considerada para propósitos de coordinación de aislamiento, similar a la del impulso estándar. Tales impulsos son usualmente fuertemente amortiguados y de corta duración.
 - B. Por descargas atmosféricas: Su forma puede ser observada para los propósitos de coordinación de aislamiento, como similar a la del impulso estándar.
 - C. Temporal: Sobretensión oscilatoria de duración relativamente larga y que no es amortiguada o lo es débilmente. Las sobretensiones temporales son habitualmente ocasionadas por maniobras o por fallas. Se les caracteriza por su amplitud, sus frecuencias de oscilación total o su amortiguamiento.
- **Tensión soportable Nominal de Corta duración a Frecuencia Industrial.** Es el valor eficaz de la tensión nominal que el aislamiento debe soportar durante el ensayo hecho bajo las condiciones especificadas y durante un tiempo no mayor de un minuto.
 - **Tensión soportable Nominal a los Impulsos de Maniobra.** Es el valor de cresta soportable a los choques de maniobra (de descargas atmosféricas), para un material aislante.
 - **Nivel de Aislamiento Nominal.**
 - A. Para aparatos donde la tensión más elevada en el equipo es igual o superior a 300 KV, el aislamiento debe soportar las tensiones nominales a los choques de maniobra y de descargas atmosféricas.
 - B. Para los aparatos donde la tensión más elevada es inferior a 300 KV, los niveles dados por las tensiones soportables nominales a los impulsos de descargas atmosféricas y soportables de corta duración a frecuencia industrial.

7.2. DESCARGADOR DE SOBRETENSIONES

El descargador de sobretensiones es un elemento muy importante dentro del sistema de potencia, debido a que influye tanto en los requerimientos técnicos como en los costos de los equipos. Se pretende por lo tanto en esta sección, ver tanto el desarrollo histórico de este dispositivo desde el descargador más elemental hasta los modelos a los cuales tenemos acceso hoy en la industria, como el comportamiento eléctrico mecánico y energético, sin descuidar sus aplicaciones en sistemas de transmisión y distribución.

El descargador de sobretensiones juega un papel importante por ejemplo en la coordinación de aislamiento de una subestación, por sus características intrínsecas, como las de los equipos que protege, principalmente el transformador.

Un descargador es un dispositivo para llevar a tierra las cargas eléctricas asociadas a los sobrevoltajes producidos por descargas atmosféricas y por la operación de interruptores, eliminando así los sobrevoltajes y evitando que dañen el aislamiento del equipo y las instalaciones eléctricas.

Con el circuito eléctrico al cual protege, en condiciones normales, el descargador debe comportarse como un aislador. Al aplicarle un sobrevoltaje de una cierta magnitud, debe convertirse en conductor. Por último, al desaparecer ese sobrevoltaje, el descargador debe convertirse de nuevo en aislador, interrumpiendo la corriente que se ha establecido a través de él.

El descargador de sobretensiones, llamado inicialmente pararrayos por ser esta la única aplicación que se tenía en cuenta, se encuentra permanentemente conectado a la red en paralelo con el equipo que va a ser protegido y opera solo cuando alcanza determinado nivel de tensión, por encima del voltaje nominal y por debajo del voltaje que soporta el equipo que va a proteger. Su funcionamiento depende básicamente de los elementos físicos que lo constituyen.

7.2.1. Evolución

El equipo utilizado hace algunos años como protección contra las sobretensiones constaba de un par de electrodos que formaban un campo eléctrico no homogéneo al estar separados en una distancia, de tal manera que al existir una sobretensión entre los extremos fluía una corriente de descarga a través de los electrodos. Estos

descargadores tienen la desventaja que a la corriente de descarga el sistema la detecta como un cortocircuito operando las protecciones encargadas de despejar este tipo de falla.

Con el objeto de limitar la corriente de descarga, se coloca en serie con los electrodos resistencias no lineales de carburo de silicio (CSi). Sin embargo, se hace necesaria la presencia de los explosores (o electrodos), puesto que las solas pastillas de CSi producen sobrecalentamiento.

Con el aumento de las tensiones en sistemas de transmisión, los descargadores evolucionaron rápidamente, llegando al descargador de "gap" activo, en el cual se alarga la trayectoria de la descarga con la ayuda de un campo magnético producido por una bobina.

Aunque éstos descargadores fueron utilizados durante mucho tiempo, están sujetos a interrupciones accidentales por la polución externa, erosión de electrodos y capacidad limitada de sobretensión.

En la actualidad, los descargadores se construyen con elementos no lineales de óxido de zinc (ZnO) sin necesidad de "gaps" activos por la alta no linealidad de esta mezcla con otros óxidos metálicos. Los beneficios derivados para la industria son las ventajas de un descargador de sobretensión de estado sólido:

- Más pequeño: el volumen se reduce en más de un 60% debido a la eliminación de explosores y componentes para distribución uniforme de la tensión
- Más liviano: El ensamble sin explosores hace que se utilicen porcelanas de menor diámetro, reduciendo el peso en más del 50%
- Mejor funcionamiento: Los descargadores de sobretensiones sin explosores están menos propensos al deterioro de funcionamiento
- Respuesta rápida: La ausencia de explosores significa que bajo condiciones de sobretensión, no hay necesidad de considerar las características tensión-tiempo de los explosores. Todas estas ventajas con respecto al gap activo.

En diseños especiales, se emplean descargadores de ZnO con explosores.

7.2.2. Clasificación

Se pueden clasificar los descargadores de sobretensiones por su construcción según lo explicado anteriormente. Sin embargo, pueden también clasificarse de acuerdo a la tensión de servicio, así:

1. **Distribución.** Son los más usados para protección de equipos, especialmente de trafos sumergidos en aceite. Están diseñados para trabajo liviano y para aplicaciones generalmente de 34.5 KV hacia abajo.

2. **Intermedio.** Poseen un sistema de alivio de presión que asegura la salida de presión interna, antes que la porcelana explote, en caso de falla de la unidad. Diseñados para trabajo moderado, y aplicaciones de 138 KV hacia abajo.

3. **Estación.** Ofrecen las mejores características de protección y la más alta capacidad térmica; para trabajo pesado y tiene rango de aplicación de 2.4 KV a 800 KV.

7.2.3. Principio de funcionamiento

Su principio de funcionamiento consiste en la conexión a tierra del equipo a proteger a través de una resistencia variable. Están contruidos de modo que absorban suficiente energía transitoria y corten la corriente en su primer paso por cero, después de la descarga de la sobretensión. Para lograr una acción efectiva, el descargador debe estar permanentemente conectado a la red, pero solo debe entrar en operación cuando se alcance un determinado nivel de tensión.

Para su funcionamiento es necesario conocer algunas magnitudes tales como:

- **Tensión nominal.** Es el valor eficaz más elevado de tensión admitido entre los bornes del descargador en forma permanente sin que cambien sus características de operación a la frecuencia de servicio. La tensión máxima nominal de un descargador debe ser superior a las máximas tensiones que pueden existir en la línea, debiendo preverse, por ejemplo, la posibilidad de sobretensión en caso de pérdida de carga en un generador accionado por turbina hidráulica.
- **Tensión Alterna de reacción.** Es el valor efectivo mínimo de tensión presente durante el servicio, bajo el cual actúa el descargador. Se encuentra

dentro de un rango de 2.3 a 2.5 veces el valor de la tensión nominal de la tensión.

- **Tensión de Choque de reacción.** Es el valor de cresta de tensión que se alcanza antes de que circule la corriente, cuando se presenta un impulso de polaridad y forma de onda determinadas. Esta tensión dependerá de la pendiente de la onda incidente.
- **Tensión de extinción.** Después de una maniobra de descarga, la corriente residual debe ser extinguida en su primer paso por cero. La máxima tensión a la cual se logra dicha extinción, se conoce como tensión de extinción.
- **Tensión residual.** Es la tensión que aparece en los bornes del descargador cuando la corriente descarga alcanza el valor de la corriente nominal. Es decir, es el máximo valor que alcanza el descargador durante su operación. La importancia de esta característica está en que no debe exceder el nivel de aislamiento propio del equipo o instalación para evitar deterioros o imperfectos. De aquí se concluye entonces, que una manera de medir la calidad de protección brindada por un descargador consiste en medir su tensión residual.
- **Corriente de descarga nominal.** Es la amplitud de la corriente de impulso para la cual fue dimensionado el descargador, es decir, aquella que puede ser descargada por el descargador de sobretensiones, un número ilimitado de veces sin sufrir averías.

Cuando el sobrevoltaje que se presenta en el descargador alcanza el valor de reacción V_c , éste actúa al cabo de un tiempo t_1 , necesario para que se ionice el espacio entre los electrodos; sin embargo, como existe un tiempo de retardo t_2 , en la entrada en operación de la resistencia, propia del material en que ha sido construida, para el cual la tensión alcanza el valor de punta, algo superior a la tensión de reacción V_c , y desciende rápidamente hasta llegar a la tensión residual V_r .

La cresta de onda se reduce desde el valor de la tensión de choque V_{ch} hasta el valor de la tensión residual que debe estar por debajo del nivel de aislamiento del equipo, para que la protección del descargador sea la adecuada y suficiente.

Durante el proceso de extinción los elementos cerámicos los cuales son permeables al gas, absorben la energía calorífica del arco, los explosores se desionizan y el arco es totalmente extinguido sin reencendido.

7.2.4. Característica V-I

La característica V-I del descargador de sobretensiones es aquella que presenta no linealidad. Idealmente esta característica es una función paso. Esta no linealidad consiste en que la resistencia es baja cuando la corriente de descarga que fluye a través del descargador es de gran amplitud limitando el voltaje en los terminales del descargador y la resistencia es elevada a voltaje normal y frecuencia industrial limitando la magnitud de la corriente subsiguiente (aquella que proviene de la red eléctrica y que fluye a través del descargador después del paso de la corriente de descarga).

Los elementos de SiC y ZnO presentan una diferencia entre sus resistencias no lineales, puesto que los elementos de SiC tienen una característica de la forma $V=KI^{0.2}$, mientras que los de ZnO tienen una característica $V=KI^{0.3}$, mostrándose el alto grado de no linealidad del ZnO y su principal ventaja con respecto al SiC.

Esto conlleva a que si la resistencia no lineal de SiC es conectada directamente al sistema, sin una serie de distancias disruptivas se presentará un sobrecalentamiento en esta y por ende su destrucción, debido a que la corriente a través de esta resistencia es alta (algunas decenas de amperios), mientras que si se conecta directamente la resistencia de ZnO sin las distancias disruptivas, la corriente que fluye por ésta es pequeña (del orden de mA), con apenas un mínimo incremento de temperatura.

7.2.5. Capacidad de absorción de energía

El calor específico de las válvulas de ZnO es aproximadamente $3 \text{ W}\cdot\text{s} / \text{cm}^3$, lo cual implica para bloques standard una capacidad calorífica de $525 \text{ W}\cdot\text{s} / ^\circ\text{K}$, o lo que es lo mismo $174 \text{ W}\cdot\text{s} / \text{KV}$. Los bloques standard absorben una energía de más de $7 \text{ KW}\cdot\text{s} / \text{KV}$ sin daño alguno. Esto corresponde a un aumento instantáneo de temperatura de 40°K . Dependiendo del tipo de esfuerzo del bloque se puede dañar por choques térmicos o por perforaciones, si la energía absorbida excede

¹ W·s : Watts-segundo

12 KW-s / KV.

Debido a la buena conductividad de calor de los bloques (0.28 W/cm - °K) se desprende la habilidad de los descargadores de ZnO para descargar grandes energías en presencia de esfuerzos repetidos.

Supongamos que toda la energía de un sistema es descargada a través de un pararrayos de ZnO: Se calcula la energía disponible como

$$\text{Energía} = \frac{1}{2} CE^2$$

donde:

C : Capacidad en mF de una longitud dada de línea

E : Máximo valor de cresta de la tensión línea-tierra

Por ejemplo, para el caso de un descargador de 180 KV, sobre un sistema de 242 KV, la energía total disponible sobre el sistema con los siguientes parámetros sería:

$$1 \text{ p.u.} = 198 \text{ KV} = \frac{242 * \sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

$$4 \text{ Pu} = 792 \text{ KV}$$

Longitud de línea = 100 millas

Capacidad de la línea = 0.014 mF/milla.

$$\text{Energía Total} = \frac{1}{2} * 0.014 * 100 * 792^2$$

$$\text{Energía Total} = 439.085 \text{ Joules.}$$

Los descargadores de ZnO ofrecidos comercialmente hoy en día absorben 7.5 KJ/KV o sea 180 KV * 7.5 KJ/KV igual a 1.350.000 Joules. Es decir, las descargas permisibles sin calentamiento serán 1.350.000 / 439.085 = 3. Sin embargo, se debe tener en cuenta que parte de la energía será disipada por la impedancia característica de la línea.

7.2.6. Protección a tipos de sobretensiones

El origen de las sobretensiones tienen dos causas: externas (debidas a descargas atmosféricas) e internas (debidas a maniobra, 12 tipos según el CIGRE).

Es por esta razón que el descargador debe proteger de dos sobretensiones normalizadas a los equipos. Los impulsos de voltaje de rayo se han normalizado en 1.2/50 mseg mientras que los impulsos de voltaje de maniobra se han normalizado en 250/2.500 mseg.

También se debe tener en cuenta el impulso de corriente a que debe someterse el pararrayos. Este se ha normalizado en 8/20 mseg.

7.2.7. Dependencia del Voltaje con el Tiempo de Aumento de la Corriente de Descarga

Los bloques de SiC presentan una fuerte dependencia del voltaje con el tiempo de aumento de la corriente de descarga. Los bloques ZnO presentan un efecto similar, aunque el aumento relativo en el voltaje para un aumento de corriente de descarga dado en el tiempo es significativamente menor que con el SiC. Vale la pena considerar en este punto el significado de tal comportamiento en términos del sistema, donde el frente de onda en este caso, del voltaje disruptivo en pararrayos convencionales es medido con un aumento en la variación de voltaje de más de 1.200 KV/seg. Si la impedancia característica de la línea es 300 ohmios la onda de voltaje de entrada está asociada con una pendiente de la onda de corriente de 2 KA/ seg. Si el pico de la onda de corrientes es 10 KA, entonces una onda de 4/10 mseg, fácilmente disponible en laboratorio, representa una buena aproximación a la corriente esperada en servicio para líneas protegidas y puede ser usado para comparar el comportamiento del pararrayos de ZnO con el convencional para frentes de onda veloces.

Se deben considerar dos aspectos importantes en este sentido: primeramente, la porcelana que cubre la unidad debe soportar las condiciones climatológicas de aire, viento, sol, etc., para lo cual se esmalta la porcelana, para que a su vez resista fuerzas mecánicas. En segundo lugar hay que evitar que los impulsos de tensión caigan en un solo punto de la porcelana y de la unidad, construyendo un

aro sobre el descargador que garantice que la onda viaje a lo largo de las pastillas resistivas.

7.2.8. Ensayos de Descargadores

La norma internacional que establece las pruebas y requerimientos técnicos de los descargadores es la IEC 99-1 (Lightning Arresters). Esta norma establece las condiciones en que deben realizarse los ensayos:

- Temperatura ambiente entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$
- La altitud no debe ser mayor a 1000 m snm
- La frecuencia de la corriente alterna debe estar dentro del rango de 48 a 60 Hz
- En condiciones especiales de fabricación, las condiciones deben asemejarse a las normas de servicio durante las pruebas.

Los requerimientos a cumplir son los siguientes:

- Debe soportar el voltaje normal fase-tierra del sistema en presencia de polución y después de repetidas descargas de altas energías que se esperan se produzcan en la red
- Debe soportar sin daño alguno sobrevoltajes de tipo temporal causados por fallas a tierra y otras condiciones transitorias del sistema
- La capacidad de absorción de energía debe ser tal que, aún después del más severo sobrevoltaje de conmutación y descarga, la temperatura de los bloques no aumente, para evitar que se produzcan escapes térmicos
- El nivel de protección debe ser lo más bajo posible
- Estos requerimientos se aplican a diferentes condiciones del sistema: voltaje nominal fase-tierra, sobrevoltajes temporales, sobrevoltajes por maniobra y recierres y sobrevoltajes por descargas atmosféricas
- Las anteriores pruebas se realizan teniendo en cuenta una clasificación por corriente de descarga

- Todos los ensayos podrán efectuarse sobre pararrayos completos, elementos o fracciones del mismo. En todos los casos estarán nuevos, limpios y completamente montados e instalados en condiciones semejantes a las de servicio

7.2.9. Especificaciones Técnicas

Las especificaciones técnicas que se solicitan al comprar un descargador de sobretensiones son las siguientes:

- Tensión de reacción
- Tensión residual al impulso de voltaje de rayo (1.2/5.0) μ seg
- Tensión residual al impulso de voltaje de maniobra (250/2500) μ seg
- Corriente nominal de descarga
- Capacidad de absorción de energía
- Tipo (convencional o de ZnO)
- Característica V-I
- Otros (dimensiones, aro sobre el descargador, cuernos de descarga, etc.)

Estas especificaciones se deben elaborar, previo cálculo en la coordinación de aislamiento, teniendo en cuenta la red misma y las condiciones geográficas y climatológicas en donde va a quedar ubicada la instalación.

El principal parámetro en el establecimiento de las especificaciones técnicas del descargador es el BIL del equipo a proteger.

7.2.10. Selección de los Descargadores de Sobrevoltajes

El punto de partida para la selección de los descargadores es la determinación del máximo sobrevoltaje de baja frecuencia que puede presentarse en el punto del sistema en el que van a instalarse los descargadores. En efecto, el voltaje de cebado de los descargadores debe ser siempre superior al máximo sobrevoltaje de baja frecuencia al que puede quedar sometido el mismo; si no fuese así el descargador no podría interrumpir la corriente de baja frecuencia que tiende a

circular por él una vez se ha convertido en conductor debido a un sobrevoltaje transitorio de suficiente magnitud.

La capacidad térmica de los descargadores es suficiente para disipar la energía producida por la descarga a tierra de un transitorio con duración de microsegundos, pero la descarga de una corriente de baja frecuencia durante unos cuantos ciclos excedería esa capacidad térmica y produciría la destrucción del descargador.

Los sobrevoltajes de baja frecuencia de mayor magnitud que pueden presentarse en un sistema se deben en la mayoría de los casos a cortocircuitos monofásicos a tierra, que producen una elevación de voltaje en las fases que no han fallado. La magnitud de estos sobrevoltajes depende de las características del sistema y especialmente de la forma en que estén conectados los neutros de los transformadores y generadores; los dos parámetros principales que definen la magnitud de estos sobrevoltajes son las relaciones X_0/X_1 y R_0/X_1 , donde X_1 es la reactancia positiva del sistema vista desde el punto considerado, X_0 y R_0 son la reactancia y resistencia de secuencia cero respectivamente. En la Figura 1. se muestra la magnitud de los sobrevoltajes a tierra durante un cortocircuito monofásico, con respecto al voltaje entre líneas existente antes de ocurrir la falla en función de las relaciones antes mencionadas.

Partiendo del conocimiento de estos voltajes, o lo que es equivalente, del valor de las relaciones antes mencionadas, pueden seleccionarse los descargadores como se explica a continuación.

Los sistemas eléctricos se clasifican desde el punto de vista de la forma de conectar los neutros y en función de las relaciones X_0/X_1 y R_0/X_1 en cinco grupos: A, B, C, D, E. Los sistemas de los tipos A y B son sistemas con los neutros conectados directamente a tierra y en los que se verifica que

$$0 < X_0/X_1 < 3 \text{ y } 0 < R_0/X_1 < 1$$

Como puede verse en la Figura 1., los sobrevoltajes de baja frecuencia que pueden producirse en estos sistemas a causa de una falla monofásica a tierra no exceden del 80% del voltaje entre hilos existente antes de la falla. Por lo tanto podrán utilizarse descargadores cuyo voltaje nominal sea el 80% del máximo voltaje de operación entre hilos. Para tomar en cuenta las elevaciones del voltaje de operación que pueden producirse para varias condiciones de operación, por ejemplo al final de una línea larga en vacío o con poca carga, o bien a causa de una pérdida súbita de carga de un generador, se suele tomar como voltaje máximo de operación un voltaje 5% mayor que el voltaje normal de operación.

Los sistemas del tipo C son aquellos en los que se verifica que:

$$X_0/X_1 > 3 \text{ ó } R_0/X_1 > 1 \text{ o ambas}$$

y generalmente corresponden a sistemas con el neutro conectado a tierra a través de una impedancia. De acuerdo con la Figura, los sobrevoltajes debidos a fallas monofásicas a tierra pueden llegar a alcanzar valores del 100% del voltaje entre hilos y aún algo mayores. Las curvas de la Figura 1. se han trazado y suponiendo $R_1 = R_2 = 0$. Para valores de las resistencias distintos de 0 los sobrevoltajes de baja frecuencia son ligeramente inferiores a los indicados. De todo lo anterior se concluye que en este tipo de sistema puedan usarse descargadores cuyo voltaje nominal sea igual al 100% del voltaje máximo de operación entre hilos.

Los sistemas tipo D son sistemas con los neutros aislados de tierra, en los que se verifica que:

$$X_0/X_1 < -40$$

La Figura 2. muestra la magnitud de los sobrevoltajes a tierra durante un cortocircuito monofásico a tierra, expresados en por unidad con respecto al voltaje entre hilos que existía antes de ocurrir la falla, en función de X_0/X_1 y para $R_0/X_1=0$ y $R_0/X_1 = 1$.

Como puede verse en las curvas, en este tipo de sistemas los sobrevoltajes de fase a tierra en las fases no afectadas pueden ser mayores que el voltaje entre hilos antes de la falla. Por lo tanto es recomendable usar descargadores cuyo voltaje nominal sea 110% del voltaje máximo de operación entre hilos.

Por último los sistemas tipo E son sistemas con el neutro aislado y en los que se verifica que:

$$-40 < X_0/X_1 < 0$$

En este tipo de sistema, los sobrevoltajes que pueden presentarse durante una falla a tierra en las fases no afectadas por la falla son muy altos, especialmente si el valor de X_0/X_1 es del orden de -2. Por lo tanto para este tipo de sistemas no es posible establecer una regla general para la elección del descargador y cada caso ameritará un estudio especial.

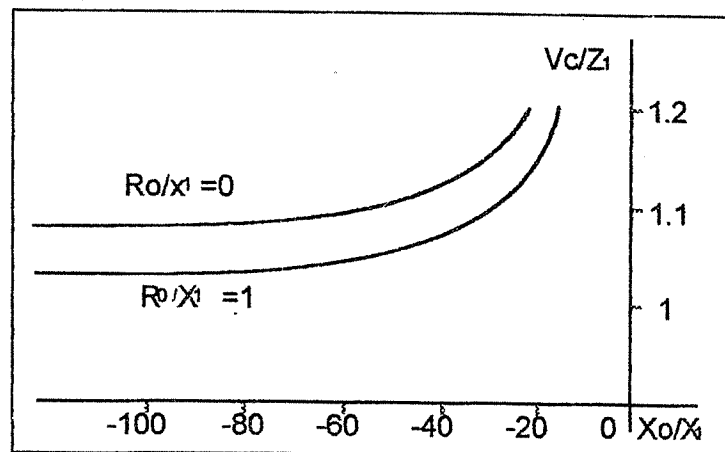


Figura 2. Voltajes a Tierra debidos a Fallas Monofásicas a Tierra en Sistemas con Neutro Aislado

7.2.11. Localización de los Descargadores de Sobrevoltajes

La localización de los descargadores con respecto al equipo que se pretende proteger tiene una gran influencia en el nivel de protección.

Considérese el caso de la subestación cuyo diagrama unifilar se muestra en la Figura 3. Se trata de una subestación reductora de 230 a 23 KV.

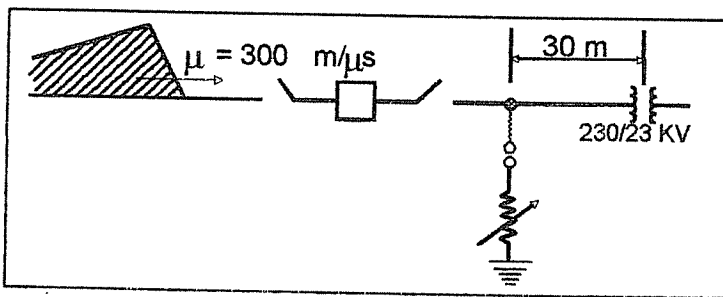


Figura 3. Ejemplo para Ilustrar la Influencia de la Localización de los descargadores en el Nivel de Protección del Equipo de una Subestación

Se han instalado descargadores de 195 KV para proteger de los sobrevoltajes transitorios al transformador. Los descargadores están conectados a 30 metros del transformador y tienen un voltaje de cebado de 500 KV. Supóngase que por la línea de transmisión entra a la subestación una onda de voltaje como la mostrada en la Figura 4.

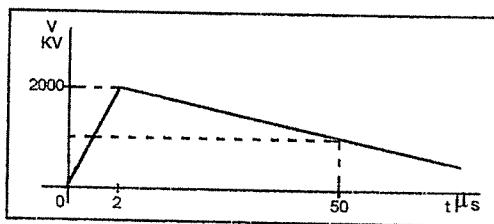


Figura 4. Características de la Onda que entra a la Subestación de la Figura 3

Mientras el voltaje aplicado al descargador no alcance el valor de cebado, el descargador se comportará como un aislador. Al alcanzar el voltaje aplicado el valor de cebado el descargador empieza a conducir a tierra, ofreciendo una resistencia muy baja al paso de la corriente.

Supóngase que el voltaje de conducción del descargador es también de 500 KV.

En la Figura 5. se muestran los oscilogramas del voltaje en el descargador y en el transformador.

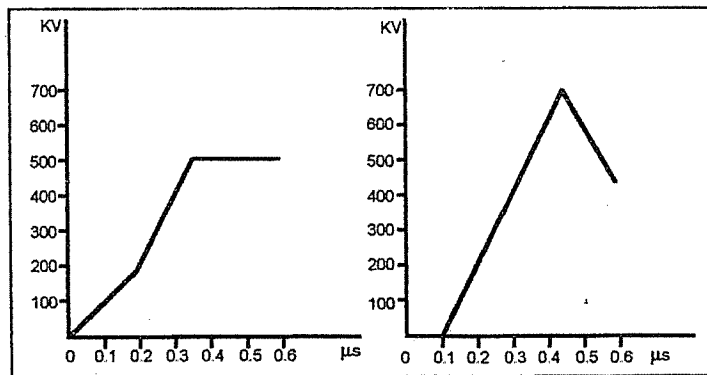


Figura 5. Oscilogramas de los Voltajes Aplicados al Descargador y al Transformador

Supóngase que se empieza a contar el tiempo en el instante en que el principio de la onda llega al descargador. Como se muestra en la Figura 5., se tendrá el siguiente proceso:

- A partir de $t=0$ el voltaje aplicado al descargador empieza a crecer con una pendiente de 1000 KV por microsegundo
- Al cabo de 0.1 microsegundo el principio de la onda ha llegado al transformador. Este presenta una impedancia muy alta y puede tratarse como una línea en circuito abierto. Por lo tanto se produce una onda reflejada de la misma magnitud y la misma polaridad que la incidente, que se superpone a ésta; el voltaje aplicado al transformador aumenta a razón de 2000 KV por microsegundo

- c. Al cabo de 0.2 microsegundos la onda reflejada llega al descargador, la superposición de esta onda con la incidente hace que el voltaje aplicado al descargador crezca a razón de 2000 KV por microsegundo
- d. Al cabo de 0.35 microsegundos, el voltaje aplicado al descargador alcanza el valor de 500 KV y el descargador empieza la descarga a tierra quedando el voltaje en ese punto limitado a 500 KV. Desde el punto de vista de la propagación de la onda, el descargador puede tratarse como un cortocircuito a tierra. Por lo tanto dará origen a una onda reflejada hacia el transformador, de la misma magnitud y de polaridad contraria a la procedente del transformador
- e. Al cabo de 0.45 microsegundos, la onda reflejada por el descargador llega al transformador, en el cual mientras tanto el voltaje aplicado ha alcanzado el valor de 700 KV; a partir de este momento el voltaje aplicado al transformador empieza a disminuir y después de una serie de reflexiones, la onda de sobrevoltaje se elimina, descargada a tierra por el descargador

El análisis anterior hace ver la importancia que tiene instalar los descargadores lo más cerca posible del equipo que se va a proteger, principalmente los transformadores, que son el equipo más costoso de la subestación.

7.3. MÉTODOS DE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTOS

7.3.1. Método Convencional

El método convencional se reduce a establecer márgenes de protección, basados en la experiencia. Estos márgenes significan la relación entre los niveles de tensión de aislamiento, no disruptivos y los niveles de tensión que pueden presentarse en el sistema.

El logro de los márgenes de protección sin utilizar descargadores resulta una decisión antieconómica.

Se utilizan las siguientes definiciones:

- U_m : Tensión máxima nominal de servicio
- U_a : Tensión nominal del descargador
- U_t : Tensión máxima temporal

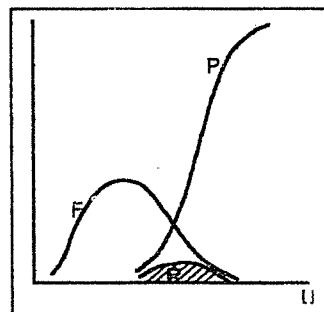
- C_t : Factor de sobretensión temporal o factor de puesta a tierra (0.8 pu)
- N_{sp} : Nivel de protección de descarga para sobretensiones de origen interno
- N_{is} : Nivel de aislamiento del equipo, a sobretensiones de origen interno (tensión pico)
- N_s : Máxima sobretensión de origen interno
- C_s : N_{is}/N_s : margen de protección frente a sobretensiones internas (10-20%)
- N_{ip} : Nivel de protección de descarga para sobretensiones de origen externo
- N_{ie} : Nivel de aislamiento no disruptivo del equipo debido a sobretensiones de origen externo (pico)
- N_i : Máxima sobretensión de origen externo
- C_i : N_{ie}/N_i : margen de protección frente a sobretensiones externas (20-40%)

7.3.2. Método Estadístico

La utilización de este método implica el conocimiento de:

- Distribución de la sobretensión como función probabilística (F)
- La probabilidad de descarga disruptiva (P)

Con los datos anteriores se puede calcular el riesgo de falla.



F : Distribución de Sobretensión
 P : Probabilidad de Descarga Disruptiva
 U : Tensión de Prueba
 R : Riesgo de Falla

Figura 6.

Es claro que si se aumenta la resistencia del aislamiento o disminuyen las sobretensiones, se reduce el valor de la integración, o sea el riesgo de falla, pero con aumento del costo en los equipos.

La distancia entre las curvas F y P se puede expresar como un factor de seguridad (Y). El método deberá encontrar valores que se ajusten a un valor adecuado del riesgo de falla.

Para poder aplicar este método, se precisa un gran número de cálculos, mediciones y pruebas que consideren la configuración del sistema, forma de onda de las sobretensiones, influencia de las condiciones ambientales, etc.

7.3.3. Método Semiestadístico

Este método y el anterior son los más confiables. Estos métodos persiguen no usar descargadores para el aislamiento autorregenerativo, sin embargo precisan documentación confiable, de lo contrario no tienen justificación.

La distribución de sobretensión se caracteriza por un 2% de probabilidad. Esta sobretensión se denomina Sobretensión Estadística, (Se).

La distribución de falla de aislamiento, se representa por un valor no disruptivo con 90% de probabilidad lo que significa un 10% de falla. Esta tensión se denomina Tensión Estadística de Aislamiento no Disruptiva (Tea).

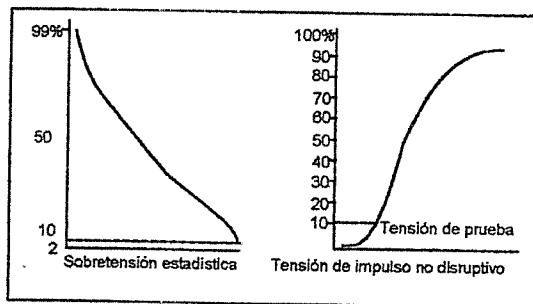


Figura 7.

La relación entre T_{ea} y S_e se llama Factor Estadístico de Seguridad. Se puede lograr una curva válida para una Desviación Estándar de 8% para el aislamiento no Disruptivo y puede utilizarse en cálculos preliminares:

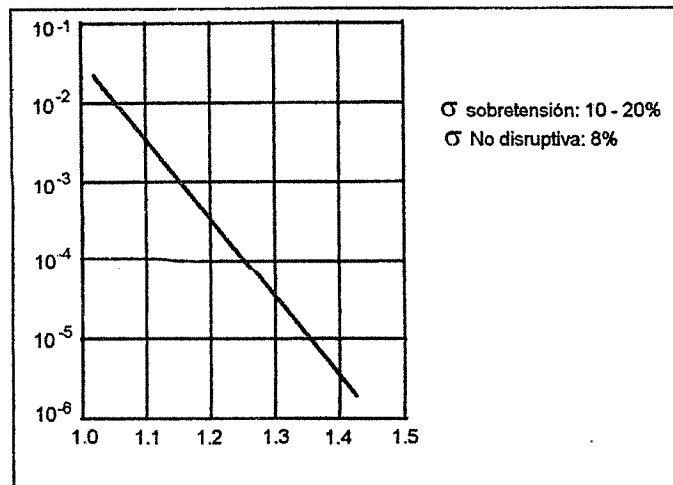


Figura 8. Factor Estadístico de Seguridad y R vs Y para Sobretensiones Internas

En las siguientes ecuaciones se resume el método:

R : Riesgo de Falla

Y : Factor Estadístico de Seguridad = N_{ts}/N_s

N_{ts} : Nivel de aislamiento no disruptivo con probabilidad del 10% de descarga

N_s : Sobretensión interna, con probabilidad del 2% de ser superada

7.4. COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO

La coordinación de aislamiento de un sistema eléctrico, consiste en coordinar las características de operación de un descargador, con las curvas voltaje-tiempo de los aislamientos, de tal forma que la protección sea económica y efectiva contra los sobrevoltajes transitorios.

1. Terminología empleada.

- 1.1. Voltaje nominal de un sistema trifásico: Valor r.m.s. fase a fase por el cual se identifica el sistema.
- 1.2. Valor eficaz de la más alta tensión que aparece en cualquier punto del sistema bajo las condiciones normales de operación. (Voltaje más alto).
- 1.3. Voltaje más alto para el equipo: La más alta tensión eficaz para la cual se diseña el equipo con respecto a su aislamiento. Este voltaje, es el máximo valor para el cual puede ser usado un equipo (U_m).
- 1.4. Aislamiento externo: Hacen parte del aislamiento externo las distancias en aire y superficies en contacto con el mismo que están sujetos a esfuerzos dieléctricos y a efectos de condiciones atmosféricas y otras condiciones como la polución, humedad, animales, etc.
- 1.5. Aislamiento Interno: Lo constituyen las partes internas sólidas, líquidas o gaseosas, del aislamiento del equipo que se encuentran protegidas de las condiciones externas.
- 1.6. Aislamiento autoregenerativo: Es el que recobra sus propiedades aislantes luego de una interrupción, el aislamiento de esta clase es generalmente externo.
- 1.7. Aislamiento no regenerativo: Es el que pierde sus propiedades aislantes o no las recobra completamente después de una descarga disruptiva.
- 1.8. Ensayo tipo: Es un ensayo hecho a un equipo con el propósito de mostrar que todas las unidades de este equipo están hechas con la misma especificación.
- 1.9. Ensayo de rutina: Es un ensayo al que se somete cada una de las unidades del equipo y al final al equipo en forma global.
- 1.10. Sistema con Neutro Aislado: Es un sistema que no tiene conexión intencional a tierra excepto a través de aparatos de muy alta impedancia, de indicación, medida o protección.
- 1.11. Sistema de Puesta a Tierra Resonante (a través de una bobina de supresión de arco): Es un sistema en el cuál el neutro es puesto a tierra a través de una reactancia, teniendo ésta un valor tal, que durante una falla monofásica a tierra la corriente inducida a frecuencia industrial que pasa a través de la reactancia, neutraliza la corriente capacitiva de la corriente de falla a tierra.
- 1.12. Sistema con Neutro Puesto a Tierra: Es un sistema en el cuál el neutro es puesto a tierra en forma sólida, a través de una resistencia o reactancia de valor bajo suficiente para reducir cualquier oscilación transitoria y para asegurar las condiciones de protección selectiva de falla a tierra.

- 1.13. Factor de Falla a Tierra: Es la relación del voltaje r.m.s. más alto fase tierra a frecuencia industrial que debería ser obtenido en la localización seleccionada sin la falla.
- 1.14. Sobrevoltajes: Es cualquier voltaje dependiente del tiempo, dependiente del tiempo, entre fases o fase y tierra, teniendo un valor pico o valores que excedan al correspondiente valor pico derivado de la tensión más alta del equipo.
 - a. De maniobra: Debido a una operación de maniobra, falla u otra causa cuya forma puede ser considerada para propósitos de coordinación de aislamiento, similar a la del impulso estándar. Tales impulsos son usualmente fuertemente amortiguados y de corta duración.
 - b. Por descargas atmosféricas: Su forma puede ser observada para los propósitos de coordinación de aislamiento, como similar a la del impulso estándar.
 - c. Temporal: Sobretensión oscilatoria de duración relativamente larga y que no es amortiguada o lo es débilmente. Las sobretensiones temporales son habitualmente ocasionadas por maniobras o por falles. Se les caracteriza por su amplitud, sus frecuencias de oscilación total o su amortiguamiento.
- 1.15. Tensión soportable nominal de corta duración a frecuencia industrial: Valor eficaz de la tensión nominal que el aislamiento debe soportar durante el ensayo hecho bajo las condiciones especificadas y durante un tiempo no mayor de un minuto.
- 1.16. Tensión soportable nominal a los impulsos de maniobra: Valor de cresta soportable a los choques de maniobra (de descargas atmosféricas) para un material aislante.
- 1.17. Nivel de aislamiento nominal:
 - a. Para aparatos donde la tensión más elevada para el equipo es igual o superior a 300 kV. El aislamiento debe soportar las tensiones nominales a los choques de maniobra y de descargas atmosféricas.
 - b. Para los aparatos donde la tensión más elevada es inferior a 300 kV, los niveles dados por las tensiones nominales a los impulsos de descargas atmosféricas y soportables de corta duración a frecuencia industrial.

En la Figura 9. la Curva 1 representa la característica de operación de un descargador, mientras que la Curva 2 es la de voltaje-tiempo de un aislamiento. De acuerdo con la definición anterior se tendrá una protección efectiva siempre

que la Curva 2 esté por encima de la Curva 1 manteniendo un margen de seguridad adecuado.

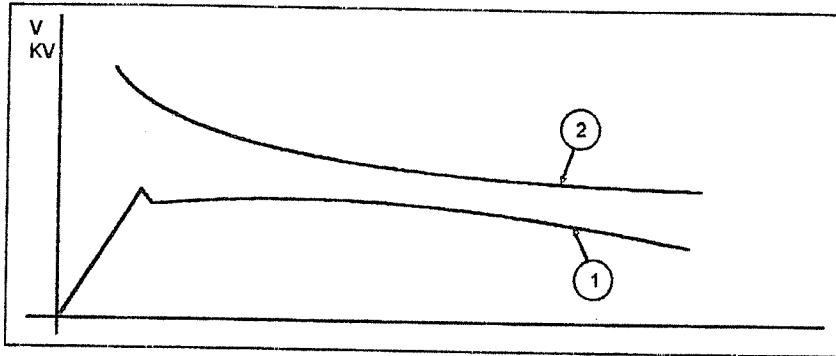


Figura 9. Coordinación entre la Característica de Operación de un Descargador y la Curva Voltaje-Tiempo de un Aislamiento

Con el objeto de normalizar el aislamiento de los aparatos eléctricos, en 1941, se fijó por un comité conjunto AIEE-EEL-NEMA, un nivel básico de aislamiento al impulso normalizado, BIL, correspondiente a cada clase de voltaje, tal como muestra la Tabla 1.

Para coordinar estos niveles de aislamiento se utilizan descargadores de un voltaje nominal igual al máximo voltaje de la línea del sistema, es decir descargadores de 100%.

En sistemas con neutro conectado directamente a tierra, pueden utilizarse descargadores con voltaje nominal o del 80% del voltaje máximo de operación del sistema.

Tabla 1.

1 Clase de aislamiento [KV]	2 Nivel básico de aislamiento al impulso completo [KV]	3 Nivel básico de aislamiento al impulso reducido [KV]
5	75	
8.7	95	
15	110	
23	150	
34.5	200	
46	250	
89	350	
92	450	
115	550	450
138	650	550
161	750	650
230	1050	900
287		1050
345		1300
400		1425
500		1550

Generalmente, en este tipo de sistemas, para clases de aislamiento 115 KV o mayores, se reduce un escalón el aislamiento de los transformadores protegidos por descargadores, como muestra la Columna 3 de la Tabla 1.

Para voltajes de operación mayores a 500 KV el BIL, lo determina la magnitud de los sobrevoltajes de alta frecuencia debidos a la operación de interruptores. Se ha establecido que el nivel de aislamiento para estos sobrevoltajes es el 83% del nivel de aislamiento al impulso. El método seguido para el cálculo del BIL en sistemas de más de 500 KV es el siguiente:

- a. El voltaje nominal del descargador debe ser tal que su voltaje de cebado está por encima del máximo sobrevoltaje de baja frecuencia que pueda presentarse.

b. Se toma un 15% de margen de seguridad entre el voltaje de cebado del descargador y el nivel de aislamiento para sobrevoltajes de alta frecuencia.

c. El nivel de aislamiento al impulso se obtiene dividiendo por 0.83 el nivel de aislamiento para sobrevoltajes de alta frecuencia.

La Figura 10. muestra la coordinación entre el aislamiento interno del devanado de 230 KV de un transformador con un BIL de 900 KV y un descargador de 195 KV (80%)

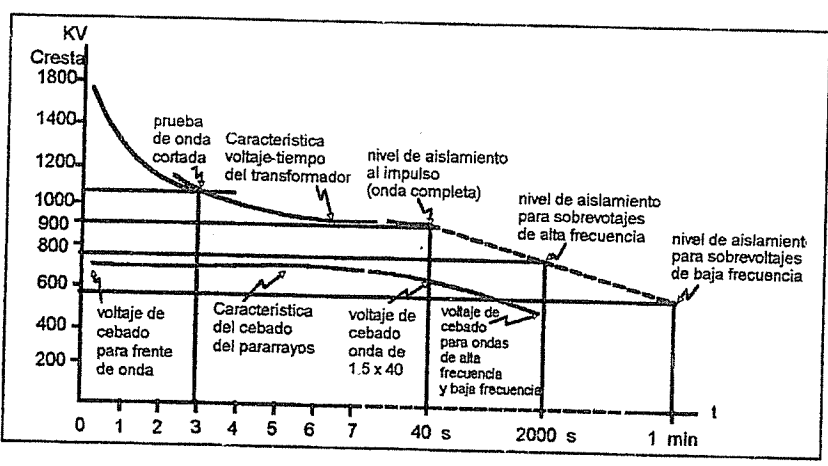


Figura 10. Coordinación entre la Característica de Aislamiento del Devanado de 230 KV de un Transformador con Nivel de Aislamiento al Impulso de 900 KV y a la Característica de Protección de un Descargador de 195 KV (Descargador de 80%)