

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES
IMPULSIONALES EN SISTEMAS DE ALTA
TENSIÓN**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR:

GUSTAVO ADOLFO RODRÍGUEZ SALINAS

**PROMOCIÓN
2000 – II**

**LIMA – PERÚ
2006**

**PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES
IMPULSIONALES EN SISTEMAS DE ALTA TENSIÓN**

***Dedico este trabajo a:
Mis padres Pompeyo y Julia,
ejemplo de esfuerzo y dedicación.***

SUMARIO

El objetivo del presente trabajo es dar un alcance de los conceptos y criterios básicos utilizados para la selección de pararrayos que se emplean para la protección de los equipos eléctricos contra las sobretensiones impulsionales que se dan en los sistemas y conocer las características de dichas sobretensiones.

Se citará las diversas clases de pararrayos de acuerdo a las normas existentes y las pruebas a las que son sometidos.

Finalmente se tratará acerca de la presente generación de pararrayos, **los pararrayos de oxido metálico**, que comprenderá una descripción de las diversas aplicaciones en sistemas eléctricos, principio de operación, estructura básica, selección de parámetros y capacidad de energía. Concluyendo con un ejemplo de aplicación.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	4
1.1 Tensión máxima del sistema (U_m)	4
1.2 Tensión de operación continua efectiva (U_{ca})	4
1.3 Tensión de operación continua (U_c)	4
1.4 Sobretensiones temporales (TOV)	4
1.5 Tensión nominal (U_r)	5
1.6 Factor de resistencia ante sobretensiones temporales (T_r o T_c)	5
1.7 Impulso (de corriente o voltage)	5
1.8 Característica de aislamiento de equipos	5
1.9 Tensión residual (U_{res})	6
1.10 Características de protección del pararrayo	6
1.11 Nivel de protección por impulsos de rayo (LIPL)	6
1.12 Nivel de protección por impulsos de maniobra (SIPL)	6
1.13 Relación de protección	6
1.14 Margen de protección	6
1.15 Corriente en régimen continuo (I_c)	7
1.16 Corriente de referencia (I_{ref})	7
1.17 Tensión de referencia (U_{ref})	7
1.18 Corriente nominal de descarga (I_n)	7
1.19 Capacidad de energía de impulso individual	7
1.20 Factor de falla a tierra (K_e)	7
1.21 Capacidad de alivio de presión	8

CAPITULO II

CLASIFICACIÓN DE PARARRAYOS POR CICLO DE OPERACIÓN	9
2.1 Corriente nominal de descarga (I_n)	9
2.2 Selección del régimen nominal de trabajo	10
2.3 Clasificación de Pararrayos	11

CAPÍTULO III

SELECCIÓN DE LA TENSIÓN NOMINAL CORRECTA DEL PARARRAYO	18
3.1 Máxima tensión fase – fase del sistema	18
3.2 Modo de conexión del pararrayo	21

CAPÍTULO IV

SELECCIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE PROTECCIÓN APROPIADAS	23
4.1 Características de protección	23
4.2 Comparación de características entre normas	24

CAPÍTULO V

COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO Y APLICACIONES	26
5.1 Tensión residual después de altos picos de corriente	26
5.2 Desempeño en líneas de transmisión	26
5.3 Niveles de seguridad de presión en el diafragma	27
5.4 Encebado y corriente límite del pararrayo tipo peine	27
5.5 Impedancia característica del sistema y su efecto en el diseño de pararrayos	28
5.6 Pararrayos para aplicaciones especiales	29

CAPÍTULO VI

PARARRAYOS DE ÓXIDO METÁLICO	33
6.1 Principio de operación	36

6.2 Estructura	37
6.3 Selección de los parámetros de los pararrayos de óxido metálico	39
6.4 Capacidad de Energía	47
6.5 Ejemplo de aplicación	54
6.6 Mantenimiento	57
6.7 Accesorios	58
CONCLUSIONES	59
ANEXO A	60
BIBLIOGRAFÍA	76

INTRODUCCIÓN

Los pararrayos son la protección principal ante diferentes tipos de sobretensiones provocadas por descargas atmosféricas o por operaciones de maniobra. Son generalmente conectados en paralelo con el equipo a ser protegido para derivar la corriente de irrupción momentánea.

Los pararrayos o descargadores modernos son:

De óxido metálico, óxido de zinc, sin explosores en serie.

Los antecesores fueron:

De carburo de silicio, con explosores en serie.

Del tipo expulsión, con cámara para confinar el arco y extinguirlo con el gas que produce el material de la cámara.

Explosores de brecha de aire, solución todavía hoy utilizada.

Los aislantes se dimensionan para soportar la tensión que se presenta en modo permanente, y para soportar por tiempos breves sobretensiones cuya duración es limitada.

Para simular estas situaciones se somete a los aislantes a ensayos, típicos ensayos de aislamiento como:

Aplicar tensión a frecuencia industrial durante un minuto.

Aplicar impulsos de tensión de forma 1/50 microsegundos, que representa el efecto de una descarga atmosférica.

Estas pruebas se efectúan sobre equipos de media y alta tensión, sobre equipos de muy alta tensión (más de 300 kV de tensión nominal) en lugar del ensayo de frecuencia industrial se aplica impulso de maniobra.

Las sobretensiones que pueden presentarse en la red, en orden creciente de magnitud son:

Sobretensiones que aparecen en las tres fases, por sobrevelocidad el generador, o desconexión de cargas, con duración de algunos segundos o minutos.

Sobretensiones que aparecen en las fases sin falla, cuando ocurren fallas a tierra, cuya duración esta limitada por la actuación de las protecciones.

Sobretensiones de maniobra que duran algunos ciclos y se producen a consecuencia de maniobra de equipos especialmente aperturas, aunque en ciertas condiciones durante los cierres.

Las sobretensiones descritas son de origen interno de la red, y son denominadas de esta manera.

También pueden presentarse en las redes expuestas, sobretensiones de origen externo:

Típicas sobretensiones de origen atmosférico, directas o inducidas.

El comportamiento de las sobretensiones es distinto, cuando muy rápidas, como las de tipo atmosférico, se propagan con velocidad, refractándose y reflejándose en los nodos de la red (puntos donde cambia la impedancia característica de la ramas de la red). En los puntos de reflexión se puede alcanzar hasta el doble del valor original.

Las sobretensiones de más baja frecuencia en cambio asumen en los distintos puntos valores relacionados con los parámetros de la red.

Eventos que ocurren en distintos puntos de la red eléctrica, producen en otros puntos distintas tensiones, para cada evento se produce en algún punto la tensión máxima.

Los descargadores deben funcionar en la red donde ocurren estos eventos, y actúan modificando el valor de las sobretensiones.

Los descargadores son resistores no lineales, que sometidos a una sobretensión conducen corriente (que depende de la impedancia de la fuente de sobretensión) y limitan el valor de la tensión entre sus extremos.

La corriente que se presenta a consecuencia de una sobretensión atmosférica tiene una forma típica de impulso de corriente 8/20 microsegundos.

también puede haber impulsos de alta corriente , típico 4/10 microsegundos que simulan descargas extraordinarias (poco frecuentes, y en consecuencia menos probables).

Durante el paso de la corriente de descarga, el valor pico de la tensión que aparece, se denomina tensión residual (también se llama tensión de descarga).

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

1.1. Tensión máxima del sistema (U_m)

Es la mayor tensión fase – fase del sistema que ocurre bajo condiciones normales de operación a cualquier hora en algún punto del sistema, se expresa en valor eficaz (R.M.S.).

1.2. Tensión de operación continua efectiva (U_{ca})

Es la máxima tensión a frecuencia industrial que es aplicada continuamente (≥ 2 horas) entre los terminales del pararrayo, se expresa en valor eficaz (R.M.S.).

1.3. Tensión de operación continua (U_c)

Con frecuencia es abreviada como COV o MCOV, es la tensión a frecuencia industrial de diseño permisible que puede ser aplicado continuamente entre los terminales de un pararrayo; por consiguiente $U_c \geq U_{ca}$. Observe que U_c para el pararrayo puede ser menor que la suma de U_c para estos bloques cuando la distribución de tensiones a lo largo del pararrayo no es estrictamente uniforme.

1.4. Sobretensiones temporales (TOV)

Son sobretensiones oscilatorias de duración relativamente larga y son no amortiguadas o solo débilmente amortiguadas.

El rango de frecuencia de estas sobretensiones es de algunos Hertz hasta algunos cientos de Hertz y duración de algunos milisegundos a muchas horas (dependiendo del tiempo de aclaramiento de la falla, por ejemplo).

La forma más común de sobretensiones temporales ocurre en las fases sin falla de un sistema durante una falla a tierra involucrando una o dos fases. Otra fuente de sobretensiones temporales son la ferorresonancia, rechazo de carga etc.

1.5. Tensión nominal (U_r)

De acuerdo a la IEC, significa que un pararrayo cumpliendo la norma tiene que resistir una tensión nominal por al menos 10 segundos después de ser precalentado a 60°C y sometido a una inyección alta de energía como lo define la norma. Por lo tanto, la capacidad TOV para 10 segundos, según la norma IEC, ha de ser el mínimo U_r . La tensión nominal es usada como un parámetro de referencia.

1.6. Factor de resistencia ante sobretensiones temporales (T_r o T_c)

Es la capacidad TOV del pararrayo expresada en múltiplos de U_r o U_c respectivamente.

1.7. Impulso (de corriente o voltage)

Es una onda unidireccional que se eleva rápidamente a un máximo y desciende con menor rapidez a cero. La forma de onda es expresada por dos (2) números (T_1 / T_2). T_1 se refiere al tiempo de frente virtual y T_2 el tiempo virtual en que alcanza la mitad del valor en la cola; ambos expresados en microsegundos.

Algunos impulsos de corriente importantes son descritos a continuación.

<u>Impulso</u>	<u>Forma de onda (T_1 / T_2)</u>	
Impulso de corriente escarpado	$T_1 = 1\mu s$	$T_2 \leq 20\mu s$
Impulso de corriente de rayo	$T_1 = 8\mu s$	$T_2 = 20\mu s$
Impulso de corriente de maniobra	$T_1 \geq 30\mu s$	$T_2 \geq 60\mu s$
Impulso de sobrecorriente	$T_1 = 4\mu s$	$T_2 = 10\mu s$

Un impulso especial es el **impulso de corriente rectangular** el cual como su nombre lo indica tiene una forma de rectángulo con una duración usual de $2000\mu s$.

1.8. Característica de aislamiento de equipos

Es un término general para las tensiones de aislamiento de los equipos y comprende:

<u>Nivel de aislamiento</u>	<u>Forma de onda</u>
Nivel de aislamiento por ondas cortadas (CWWL)	
Nivel de aislamiento por impulsos de rayo (LIWL)	1.2/50
Nivel de aislamiento por impulsos de maniobra (SIWL)	250/2500
Aislamiento a frecuencia industrial	50–60Hz
	Sinusoidal

1.9. Tensión residual (U_{res})

Es la tensión que aparece entre los terminales de un pararrayo durante el paso de una corriente de descarga a través de este. Depende de la magnitud además de la forma de onda de la corriente de descarga y es expresada como un valor pico. U_{res} es expresada usualmente como porcentaje de la tensión residual para la corriente nominal.

1.10. Características de protección del pararrayo

Es la combinación de tensiones residuales para diferentes impulsos de corriente. Para una buena protección, las características del pararrayo deben situarse por debajo de las características de aislamiento del equipamiento en todo punto.

1.11. Nivel de protección por impulsos de rayo (LIPL)

Es la tensión residual del pararrayo para la corriente de descarga nominal.

1.12. Nivel de protección por impulsos de maniobra (SIPL)

Es la tensión residual del pararrayo para un impulso de corriente de maniobra especificado.

1.13. Relación de protección

Es la proporción del nivel de aislamiento del equipo y el nivel de protección correspondiente al pararrayo.

1.14. Margen de protección

Es la relación de protección mínima y es expresada como porcentaje. El margen debe considerar la tensión incrementada debido a las conexiones entre el pararrayo y

el equipo a proteger, además del incremento en la tensión residual debido a la amplitud de la descarga y el tiempo de frente, siendo diferente del de la corriente nominal de descarga del pararrayo.

1.15. Corriente en régimen continuo (I_c)

Es la corriente que fluye a través del pararrayo a la tensión de operación continua (U_c). Esta corriente es predominantemente capacitiva y es expresada generalmente como un valor pico.

1.16. Corriente de referencia (I_{ref})

Es el valor pico de la corriente resistiva a frecuencia industrial al cual la tensión de referencia es medida.

1.17. Tensión de referencia (U_{ref})

Es el valor pico dividido por $\sqrt{2}$ de la tensión medida en los bornes del pararrayo a la corriente de referencia (I_{ref}).

1.18. Corriente nominal de descarga (I_n)

Es el valor pico del impulso de corriente 8/20 μs utilizado para clasificar un pararrayo.

1.19. Capacidad de energía de impulso unitario

Es la máxima cantidad de energía permisible, expresada en kJ, que el pararrayo es capaz de absorber en un impulso unitario con una duración específica. Cuando es expresada en kJ/kV (U_r), esta es llamada capacidad de energía de impulso unitario específica.

1.20. Factor de falla a tierra (K_e)

Es la relación de tensiones en las fases sin falla durante y previamente a las condiciones de falla a tierra. Si el neutro del sistema es directamente aterrado entonces $K_e \leq 1.4$ mientras un aterrado resonante o sistema aislado K_e aproximadamente es 1.73.

1.21. Capacidad de alivio de presión

Es la capacidad del pararrayo, en caso de sobrecarga debido a alguna razón, para conducir la corriente de cortocircuito resultante del sistema a través de esta sin una explosión violenta que puede dañar equipos cercanos o lesiones al personal. Después de la operación del aliviador de presión, el pararrayo tiene que ser reemplazado.

La corriente de cortocircuito puede ser alta o baja dependiendo de la impedancia del sistema y de las condiciones de aterramiento. Por lo tanto, la capacidad de alivio de presión es verificada para ambas pruebas de corriente.

CAPITULO II

CLASIFICACIÓN DE PARARRAYOS POR CICLO DE OPERACIÓN

2.1. Corriente nominal de descarga (I_n)

Las Normas Internacionales reconocen diversos ciclos de operación nominales para los pararrayos 1500A, 2500A, 5000A 10000A, 15000A y 20000A (Debemos resaltar que el régimen de 2500 A no es reconocida por las normas ANSI C62-1 o NEMA LA.1).

La prueba del ciclo de operación implica la aplicación de un número predeterminado de impulsos con una forma de onda 8/20 microsegundos. El número actual de impulsos y el punto de la onda en el cual la prueba es iniciada depende de la norma para el cual el pararrayo esta siendo probado. La prueba es realizada al total de pararrayos hasta 12 kV, en el caso de pararrayos con tensiones nominales superiores la prueba comprende únicamente a una parte del total de equipos.

Las pruebas del ciclo de operación son extremadamente valiosas ya que simula la operación real de los pararrayos bajo las condiciones mas adversas a las cuales es probable que este sujeto durante el servicio.

En general, la práctica moderna no favorece el uso de pararrayos con ciclos de operación de 1500 o 2500A excepto para uso en sistemas con niveles bajos de tensión. Ciertamente, los únicos niveles de tensión reconocidos por ANSI C62-1 para 1500A son 175 y 650V, e IEC 99-1 y BS.2914 reconocen estos ciclos de operación solo hasta 660V.

Puede haber algunas instalaciones en áreas de bajo nivel isocerámico donde pararrayos de 2500A pueden ser usados. Sin embargo, nuevos avances en el diseño

de pararrayos han hecho que solo un muy pequeño ahorro en costo puede ser logrado por el uso de tales pararrayos. Consecuentemente, ha habido una fuerte tendencia a utilizar Pararrayos con mayor corriente nominal que brindan una protección considerablemente mejorada por solo un pequeño desembolso extra.

2.2. Selección del régimen nominal de trabajo

La selección del régimen nominal de trabajo realizada para alguna instalación particular dependerá de un número de factores.

2.2.1. El tipo de construcción de línea al cual el equipo es conectado.

El tipo de construcción de línea, hasta cierto punto determinará la corriente de descarga de rayo a través de un pararrayo. Así pues, líneas con altos niveles de aislamiento a impulso darán origen a altas corrientes de descarga de rayo.

Una considerable cantidad de trabajo ha sido llevado a cabo por diversas autoridades para determinar el valor medio de la corriente de descarga de rayo. Este es considerado actualmente 30 kA.

Considerando una línea de distribución de construcción horizontal con la ferretería puesta a tierra, una descarga fase - fase ocurrirá tras el impacto de una descarga atmosférica. La corriente a través del pararrayo será un sexto (1/6) del valor original. Por lo tanto, para una descarga de 30 kA la corriente resultante será de 5 kA por fase. Con líneas de alta tensión y de construcción diferente la probabilidad de descargas fase – fase será reducida y, por lo tanto la corriente de descarga atmosférica original puede no ser repartida por todas las fases. Por lo tanto, a altas tensiones el ciclo de operación de los pararrayos no debería ser menor que 10 kA.

2.2.2. La frecuencia de las descargas atmosféricas a tierra.

Obviamente, la mayor frecuencia de las descargas atmosféricas es, el más adverso régimen de trabajo al cual el pararrayo será sometido, estas consideraciones deben tomarse en cuenta para el uso de pararrayos con

características de trabajo superiores. Tiene que destacarse que en regiones de clima templado, el número de descargas atmosféricas tenderá a incrementarse proporcionalmente con el número de días con tempestad. En regiones tropicales, sin embargo, la proporción de relámpagos que actualmente impactan a tierra es, apreciablemente menor.

2.2.3. El tipo e importancia de los equipos a ser protegidos

Las consideraciones económicas jugarán un papel muy importante en la determinación de la corriente nominal elegida. Tiene que destacarse que las características de diseño de los pararrayos son tales que para pararrayos con ciclo de trabajo más adverso, en general se tiene menores características de protección (Tensión disruptiva de impulso y tensión residual de descarga) y una alta capacidad de descarga. Por esta razón, para la protección de un equipo importante de la subestación, es normal seleccionar pararrayos con una alta corriente nominal, independientemente de la amplitud de las corrientes por descargas atmosféricas esperadas.

2.3. Clasificación de Pararrayos

Las diversas clases de pararrayo son descritas más adelante (no se hará referencia a los regímenes en 1500 y 2500A), los requerimientos para las diversas clases son mostrados en la tabla 2.1. Hay que destacar que además de los requerimientos para el ciclo de operación, las normas también solicitan el desempeño ante una alta corriente especificada (Que es una medida de la capacidad del pararrayo para resistir una descarga atmosférica directa) y una prueba con baja corriente de larga duración (Que es una medida de la capacidad de resistencia térmica del pararrayo). Esta última se puede efectuar con una prueba de onda rectangular de duración fija o una prueba de comportamiento en la línea. En la segunda prueba es preferible que se refleje las condiciones a la cual el pararrayos probablemente se encontrará durante el servicio.

2.3.1. Pararrayos Clase Distribución

Esta clase de pararrayos es reconocido por todas las normas internacionales sobre el particular. Tales pararrayos tienen un ciclo de operación nominal de 5000A a 10000A, son diseñados para montaje en soportes o palomillas como

se puede apreciar en la figura 2.1 y son usados en sistemas de distribución en todas partes del mundo, particularmente para la protección de equipos montados en postes y en el empalme de líneas aéreas y cables subterráneos. Aunque estos pararrayos están aptos para su uso en sistemas hasta 33 kV, en ocasiones se prefiere emplear pararrayos con ciclos de operación superiores en sistemas que operan a partir de 22 kV en adelante.

No es requisito para los pararrayos clase distribución contar con diafragma de alivio de presión, aunque algunos fabricantes ofrecen tal mecanismo. Otro método de prevención de destrucción de la cubierta es equiparlo con un dispositivo de desconexión, el cual, en caso de una falla interna, desconecta el pararrayos del sistema. El mejor de estos mecanismos discriminará con un fusible de 5 A. y de esta manera la continuidad de la conexión estará asegurada.

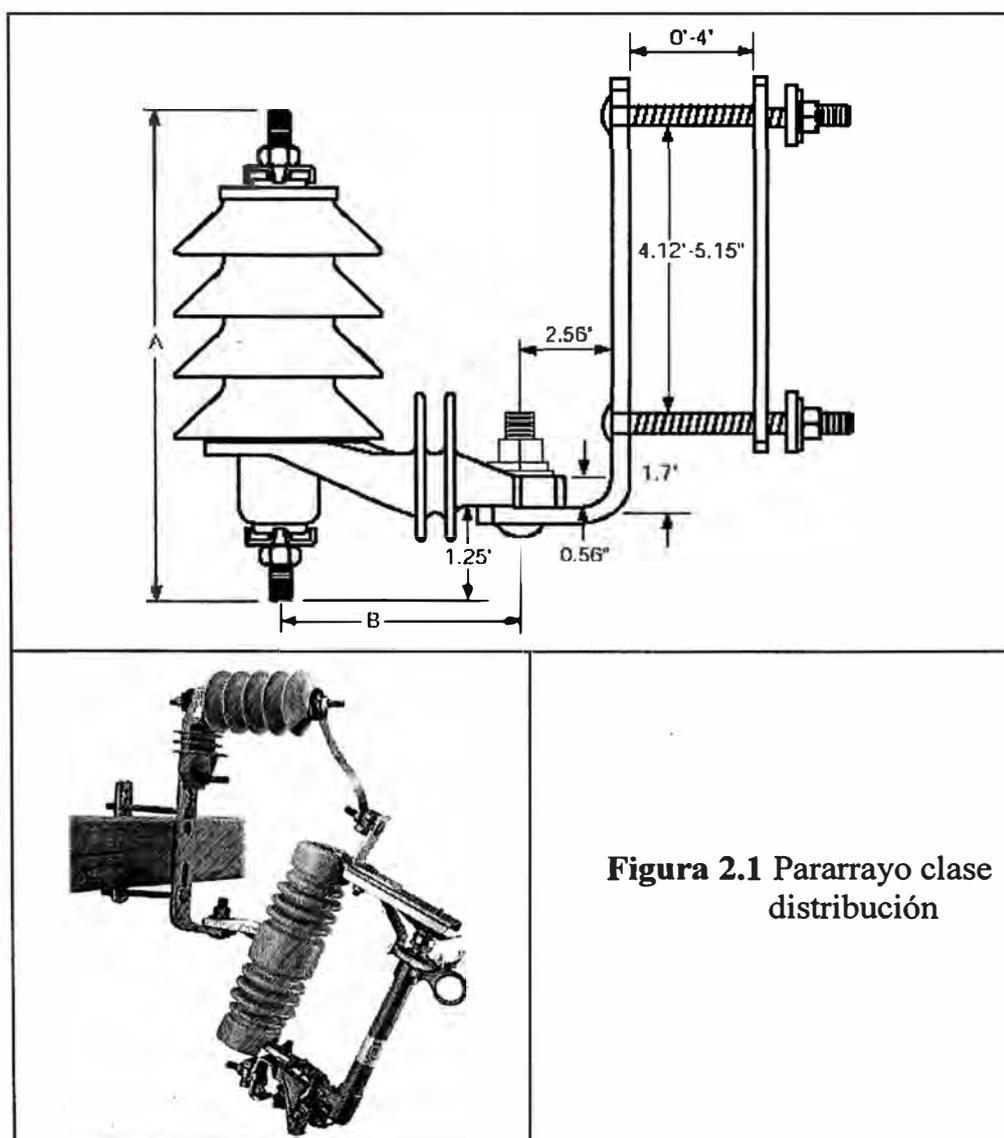


Figura 2.1 Pararrayo clase distribución

2.3.2. Pararrayos Clase Intermedia

Esta clase particular de pararrayo es reconocida solo por la norma ANSI C62-1 y NEMA LA.1, aunque las normas IEC 99-1 y BS.2914 hacen mención a una clase de pararrayo de 5000A. con una tensión nominal hasta 138 kV. (5000 A. clase A).

Debido al ciclo de operación nominal de 5000 A., el uso de los pararrayos clase intermedia es algo limitada pero son usados para la protección de transformadores pequeños e interruptores. Estos pararrayos que son suministrados con tensiones nominales hasta 120 kV deben de contar con un diafragma de alivio de presión. Normalmente estos pararrayos son suministrados para montaje en pedestal para tensiones nominales menores algunas veces se instalan en soportes o palomillas, en la figura 2.2 se muestra un pararrayo de esta clase del fabricante **Cooper Power Systems**.

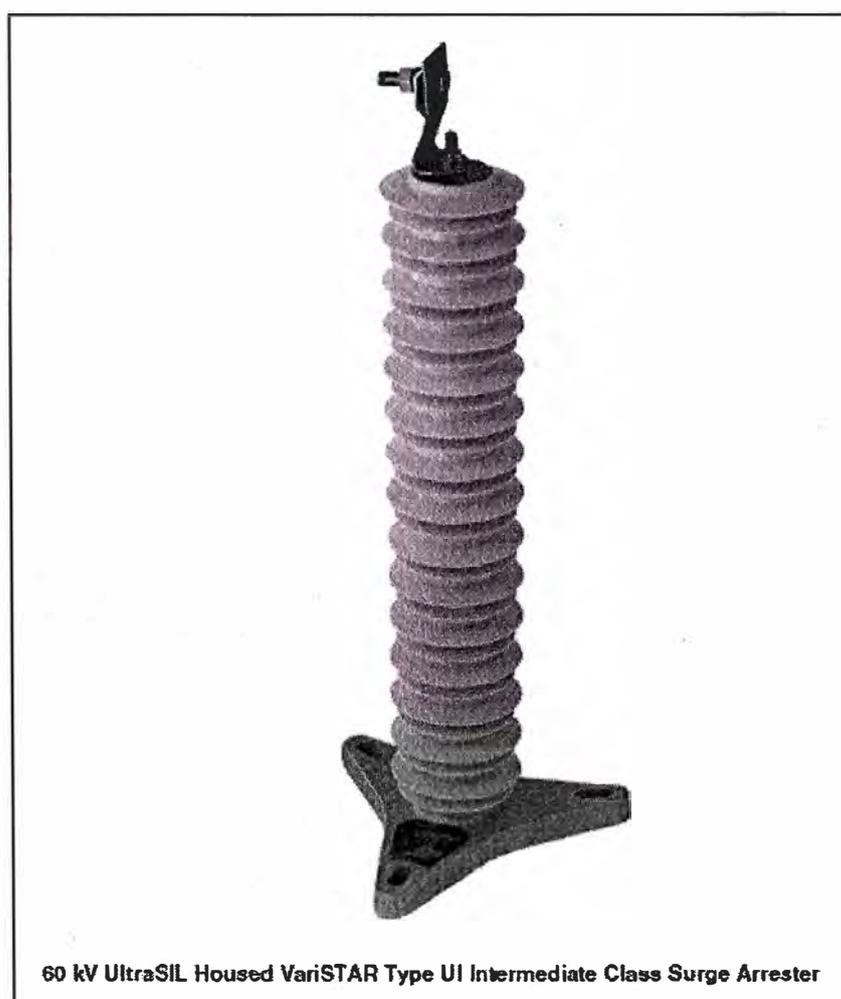


Figura 2.2 Pararrayo clase intermedia (Cooper Power Systems)

2.3.3. Clase Estación Ciclo Moderado

Estos pararrayos tienen un ciclo de operación nominal de 10000 A., son reconocidos por las normas BS.2914 e IEC 99-1 además cumplen con los requerimientos mínimos para pararrayos de 10000 A. de acuerdo a AS C338. Estos pararrayos pueden ser utilizados para la protección de casi la mayoría de las instalaciones importantes. Aunque las normas no especifican la máxima tensión nominal para esta clase de pararrayos, normalmente no es recomendable que sean utilizados en sistemas con tensiones que excedan de 132 kV, debido a su limitada capacidad para descargar sobretensiones asociadas a operaciones de maniobra en líneas de transmisión largas.

2.3.4. Clase Estación Ciclo Adverso (Normas BS e IEC) o Clase Estación (Según ANSI y NEMA).

Para sistemas hasta e incluso 66 kV, 10 kA. los pararrayos clase estación ciclo o régimen moderado de la norma IEC 99-1 y BS.2914 son muy similares a los pararrayos clase estación a los que hace alusión la norma ANSI C62-1. Sin embargo, para sistemas con tensiones mayores, la norma ANSI C62-1 especifica una mayor sobretensión de maniobra, por lo tanto, los pararrayos clase estación 10 kA. de la norma ANSI C62-1 son entonces aproximadamente equivalentes a los pararrayos clase estación ciclo adverso 10 kA. a los que hace alusión las normas BS.2914 e IEC 99-1. Estos pararrayos son utilizados para la protección de subestaciones importantes y equipos de centrales eléctricas y son usados también para la protección de máquinas rotativas. Debido a su construcción, estos pararrayos normalmente tienen características de protección menores que los pararrayos clase intermedia o estación con ciclo moderado y también están provistos de una capacidad térmica considerablemente incrementada.

Ambas normas ANSI e IEC disponen la ejecución de una prueba de comportamiento como una medida de la capacidad térmica del pararrayo. Ambas normas definen parámetros de línea dependiendo del rango de tensión. Para todos los sistemas debajo de 245 kV los parámetros mínimos de

línea aplicables de acuerdo a la norma IEC 99-1 corresponden a la clase 1; los parámetros del sistema serían:

Factor de sobretensión	= 3.0
Longitud de línea	= 300 Km.
Impedancia característica de la línea	= 450 Ohm.

Para la norma ANSI C62-1 hay tres parámetros aplicables para tensiones hasta 230 kV. Considerando el rango más apropiado de tensiones ($V_m =$ Tensión máxima línea a línea del sistema en rango 151 – 325 kV) los parámetros serían:

Factor de sobretensión	= 2.6
Longitud de línea	= 280 Km.
Impedancia característica de la línea	= 400 Ohm.

Aunque , un menor factor de sobretensión es especificado en la norma ANSI, la prueba de comportamiento ANSI a esta tensión es de hecho mas adversa que la especificada en la norma IEC.

Debe destacarse que si los parámetros del sistema al cual el pararrayo va ha ser conectado muestran una considerable divergencia con los datos anteriormente, entonces se puede pensar en utilizar un pararrayo con un régimen de operación superior. bajo estas circunstancias, es conveniente consultar al fabricante.

Debido a su alta capacidad para resistir alta energía esta clase de pararrayo es usado frecuentemente para la protección de bancos de condensadores. Actualmente la selección de pararrayos para esta aplicación es una tarea muy complicada y es conveniente consultar al fabricante ante cualquier duda. Algunas pautas son dadas en la sección 5.6.3.



Figura 2.3 Pararrayos clase estación (Cooper Power Systems)

TABLA 2.1

**COMPARACIÓN DE REQUISITOS PARA DIVERSAS CLASES DE
PARARRAYO**

	Distribución	Intermedia (2)	Estación ciclo moderado (1)	Estación (2) o Estación ciclo adverso (3)
Régimen de trabajo	5 kA	5 kA	10 kA	10 kA
Tensión nominal	Hasta 30kV (2) Hasta 39kV (3)	Hasta 120kV	Mayor de 3kV	Mayor de 3kV
Corriente baja, de larga duración	75 A 1000 μ s	Prueba de descarga en línea	150 A 2000 μ s	Prueba de descarga en línea
Corriente alta, de corta duración	65 kA	65 kA	100 kA	100 kA
Diafragma de seguridad de presión	No requiere	Alta corriente: 16 kA R.M.S. Simétrica	Alta corriente: 10 kA R.M.S. Simétrica (min)	Alta corriente: Sujeto a la clase (2) 10 kA R.M.S. Simétrica (min) (3) (4)

NOTAS

- (1) También corresponde a los requisitos mínimos para descargadores 10 kA AS 1307
(2) Para ANSI C 62-1 y NEMA LA.1
(3) Para BS.2914 y IEC 99-1
(4) IEC 99-1 y BS.2914 reconocen tres clases de diafragma de seguridad de presión para descargadores 10 kA

CAPÍTULO III

SELECCIÓN DE LA TENSIÓN NOMINAL CORRECTA DEL PARARRAYO

La tensión nominal correcta del pararrayo empleado en una instalación particular depende de tres factores:

- (i) La máxima tensión fase – fase del sistema.
- (ii) Las condiciones de aterramiento del sistema.
- (iii) El modo de conexión del pararrayo.

3.1. Máxima tensión fase – fase del sistema

En general, los pararrayos son conectados entre fase y tierra. En este caso, para obtener el máximo grado de protección, el pararrayo debe tener una tensión nominal cercana, pero no menor que, la mayor tensión fase - tierra que puede ocurrir en el punto de ubicación del pararrayo. Si un pararrayo con una menor tensión nominal es utilizado, entonces el pararrayo debería descargar, este podría ser dañado dentro de algunos ciclos por la corriente de descarga si es sometido a una tensión a frecuencia industrial mayor que la tensión nominal. En cualquier caso, utilizando un pararrayo con una tensión nominal menor es probable que conduzca a una reducción de la vida útil del pararrayo.

La máxima tensión fase – tierra que puede ocurrir bajo condiciones de falla depende de los parámetros del sistema, particularmente R_0 , X_0 , y X_1 donde :

R_0 = Resistencia en secuencia cero

X_0 = Reactancia en secuencia cero

X_1 = Reactancia en secuencia positiva

De particular importancia son los ratios R_0 / X_1 y X_0 / X_1 . Estas reactancias y resistencias son, a su vez, dependientes del aterramiento del neutro del sistema.

Un método paso a paso para la determinación correcta de las características del pararrayo línea – tierra a ser usado se detalla a continuación:

Paso 1

La máxima tensión fase – fase del sistema bajo condiciones normales de operación es determinada. de no disponerse de información, la máxima tensión de fase del sistema puede ser asumida como un 10% mayor que la tensión nominal fase – fase del sistema.

Paso 2

La máxima tensión fase – tierra del sistema bajo condiciones de falla debe ser calculada. Esta tensión puede ser calculada multiplicando la máxima tensión fase – fase del sistema hallada en el paso 1 $U_m/\sqrt{3}$ por el coeficiente de aterramiento. En general, los siguientes valores pueden ser asumidos para el coeficiente de aterramiento:

- a) Para sistemas sólidamente aterrados ($R_0 / X_1 < 1$ o $X_0 / X_1 < 3$), el coeficiente de aterramiento es 1.40 (En la práctica americana se aplican valores de 1.30 e incluso menores).
- b) Para sistemas no efectivamente aterrados ($R_0 / X_1 > 1$ o $X_0 / X_1 > 3$), el coeficiente de aterramiento es igual a 1.73.
- c) Para sistemas aterrados a través de una bobina limitadora de corriente, el coeficiente de aterramiento es 1.90.

Paso 3

El valor normado más próximo o equivalente a la tensión encontrada en el paso 2, es seleccionada. La diversidad de normas referidas dan una amplia lista de tensiones normadas. Desafortunadamente, las características exactas elegidas por los diversos comités de normas muestran muchas diferencias; Son, sin embargo, una orientación valiosa. Es recomendable para niveles de tensión que excedan los 120 kV que la

capacidad del pararrayo sea divisible por seis. Notar que utilizando un pararrayo que tiene una capacidad considerablemente mayor que la encontrada en el paso 2, implicará una considerable reducción en el grado de protección proporcionado.

Ejemplo A

¿Cual sería la tensión nominal correcta para un sistema de 66 kV sólidamente aterrado?.

Paso 1

$$\begin{aligned} \text{Máxima Tensión fase – fase del sistema} &= 66 + 10\% \\ &= 72.6 \text{ kV} \end{aligned}$$

Paso 2

Cuando el sistema es sólidamente aterrado, el coeficiente de aterramiento es 1.40. Por consiguiente la máxima tensión fase – tierra bajo condiciones de falla es:

$$\begin{aligned} &= (72.6/\sqrt{3}) \times 1.40 \\ &= 58.7 \text{ kV} \end{aligned}$$

Paso 3

El valor normado superior más próximo 60 kV es seleccionado. por consiguiente 60 kV es la tensión nominal correcta del pararrayo.

Ejemplo B

¿Cual sería la tensión nominal correcta para un sistema en 88 kV aterrado a través de una bobina supresora de arco?.

Paso 1

$$\begin{aligned} \text{Máxima tensión fase – fase del sistema} &= 88 + 10\% \\ &= 96.8 \text{ kV} \end{aligned}$$

Paso 2

Como el sistema es aterrado a través de una bobina supresora de corriente, el coeficiente de aterramiento es 1.90. Por consiguiente la máxima tensión fase – tierra del sistema bajo condiciones de falla es:

$$\begin{aligned} &= (96.8/\sqrt{3}) \times 1.90 \\ &= 106.3 \text{ kV} \end{aligned}$$

Paso 3

La tensión normada más próxima, 108 kV es seleccionada. Por consiguiente 108 kV es la tensión nominal correcta del pararrayo.

La tabla 3.1 muestra tensiones nominales recomendadas para pararrayos de uso común en sistemas con tensiones hasta 230 kV. Se ha asumido en la preparación de esta tabla, que la mayor tensión del sistema será excedida solo bajo condiciones excepcionales de operación. Si, debido a circunstancias especiales, tensiones anormales del sistema son frecuentes, entonces deben tomarse en cuenta consideraciones especiales para la tensión nominal del pararrayo. En caso de duda, se debe consultar al fabricante.

Tensiones anormales a frecuencia industrial respecto a tierra pueden ser provocadas por los siguientes:

- i) Fallas a tierra.
- ii) Regulación de líneas de transmisión largas.
- iii) Exceso de velocidad del generador.
- iv) Desconexión del sistema de aterramiento.

La tabla solo brinda pautas generales; la experiencia en sistemas particulares también debe ser considerada.

3.2. Modo de conexión del pararrayo

Para el presente, solo los valores nominales para pararrayos a ser conectados entre fase – tierra han sido considerados. Existen otros dos métodos de conexión que deben ser considerados.

3.2.1. Pararrayos conectados entre el punto neutro y tierra. En este caso la tensión nominal del pararrayo debe ser el 65% de la tensión fase – tierra.

3.2.2. Pararrayos conectados entre fases. En este caso los pararrayos deben tener una tensión nominal por lo menos tan alta como la máxima tensión de fase

del sistema bajo condiciones de falla. Tal conexión es usada normalmente solo para la protección de máquinas rotativas. Más consideraciones para la protección de máquinas es dada en la sección 5.6.2.

TABLA 3.1

**PARARRAYOS CON MODO DE CONEXIÓN LÍNEA – TIERRA
ADECUADOS PARA USO EN SISTEMAS HASTA 230 KV**

Tensión del sistema kV	Tensión nominal del pararrayo kV r.m.s.		
	Sistema sólidamente aterrado	Sistema no aterrado	Sistema aterrado a través de reactancia
3.3	3	4.5 ⁽¹⁾	4.5 ⁽¹⁾
6.6	6	7.5 ⁽¹⁾	9
11	10.5 ⁽¹⁾	12	15
13.8	12	15	18
15	15	18	18
18	15	21	21
22	21	24	27
30	27	33	36
33	30	36	42 ⁽¹⁾
44	42	48 ⁽²⁾ / 51 ⁽¹⁾	54 ⁽¹⁾
66	60	72 ⁽²⁾ / 75 ⁽¹⁾	84 ⁽¹⁾
88	84 ⁽¹⁾	96	108
110	96	120	132
115	102 ⁽¹⁾	126 ⁽¹⁾	138 ⁽¹⁾
132	120	144 ⁽²⁾	168 ⁽²⁾
150	132	168 ⁽²⁾	180 ⁽²⁾ / 186 ⁽¹⁾
161	144	180 ⁽²⁾	192 ⁽²⁾ / 198 ⁽¹⁾
220	192 ⁽²⁾ / 198 ⁽¹⁾	240 ⁽¹⁾	264
230	198 ⁽¹⁾	252 ⁽¹⁾	276 ⁽²⁾

NOTAS

(1) Tensión nominal no normada para ANSI C62.1 o NEMA LA.1

(2) Tensión nominal no normada para IEC 99-1 o BS.2914

CAPÍTULO IV

SELECCIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE PROTECCIÓN APROPIADAS

4.1. Características de protección

Las características de protección de los pararrayos tipo válvula incluye las características de tensión residual y las tensiones disruptivas de impulso y por sobretensiones de maniobra. En términos generales, las características de protección requeridas por un pararrayo son dependientes del Nivel Básico de Aislamiento (BIL) y el Nivel de Aislamiento de Sobretensiones de Maniobra (BSL) del equipo a ser protegido. Es habitual para el BSL ser considerado como el 85 % del BIL para el aislamiento de transformadores convencionales.

Obviamente, los pararrayos deben limitar sobretensiones a niveles por debajo del nivel básico de impulso del equipo a ser protegido. En general en la práctica, es coordinar las características de protección tal que la descarga disruptiva con una onda normalizada (1.2/50 μ s) es aproximadamente equivalente a la tensión residual de descarga a la corriente nominal del pararrayo.

La norma IEC 99-1A recomienda que el Nivel Básico de Aislamiento del sistema sea por lo menos 20% mayor que el nivel de protección brindado por el pararrayo. El nivel de protección es definido como la mayor de las siguientes características de protección:

- a) Frente de Onda escarpado dividido por 1.5.
- b) Descarga de rayo normalizada.
- c) Tensión residual a corriente nominal.

En general, considerando la tensión de sistema, es habitual permitir un mayor margen de seguridad.

4.2. Comparación de características entre normas

Las diversas normas internacionales han considerado en una lista las máximas características de protección pero, como puede verse en la Tabla 4.1, hay considerables divergencias entre las normas, particularmente con respecto a las máximas tensiones residuales. La Tabla 4.1 compara las características de protección para pararrayos clase estación dadas en las normas IEC 99-1 y NEMA LA.1. De la tabla se puede ver que la tensión residual dada en las normas americanas es considerablemente menor que las dadas en las normas IEC (hasta 20% menores).

Debe también recordarse que aunque las características de protección son dadas en diversas normas, pararrayos con la misma tensión nominal pueden ser utilizados en sistemas con niveles de tensión diferente, y por lo tanto diferente Nivel Básico de Impulso dependiendo de las características de aterramiento del sistema. Por ejemplo, un pararrayo con tensión nominal de 120 kV podría ser utilizado en un sistema aterrado de 132 kV o en un sistema de 110 kV no aterrado (Ver tabla 4.1). Como el Nivel Básico de Impulso de los sistemas en 132 kV será desde luego mayor que en los sistemas en 110 kV, se deduce que un mayor grado de protección será brindado a los sistemas en 132 kV comparado con el sistema en 110 kV si el mismo pararrayo es utilizado para ambas aplicaciones. Debe notarse que en general, un pararrayo conectado a un sistema aterrado dará un mayor grado de protección que conectado a un sistema no aterrado.

Es recomendable que, para uso general, las características de protección de un pararrayo de estar conforme a las normas referidas, de esta manera se asegurará un buen desempeño durante el servicio. Pararrayos con muchas características de protección mejoradas están disponibles, pero estos son generalmente propuestas para situaciones especiales tales como BIL reducido o niveles de aislamiento debilitados. Un pararrayo con niveles de tensión disruptiva de impulso y maniobra reducidos operará con más frecuencia y en consecuencia tiene una vida útil reducida.

TABLA 4.1

**COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE PROTECCIÓN DE
PARARRAYOS CLASE ESTACIÓN**

TENSIÓN NOMINAL kV r.m.s.	FRENTE DE ONDA DEL IMPULSO DE DESCARGA				TENSIÓN RESIDUAL A 10KA (2)	
	NEMA LA.1		IEC 99-1		NEMA LA.1	IEC 99-1
	Pendiente de onda (1)	Descarga (2)	Pendiente de onda (1)	Descarga (2)		
3	25	12	25	15	9	13
6	50	24	50	26	19	22.6
9	75	35	75	38	26	32.5
12	100	45	100	50	35	43
15	125	55	125	62	44	54
20/21	167	72	175	88	60	76
24/25	208	90	200	100	71	87
30	250	105	250	125	87	108
39/40	333	130	325	162	114	141
50/51	417	155	425	212	142	184
60	500	190	500	250	174	216
73/75	608	230	625	310	212	270
96	800	300	790	371	280	325
108	900	335	870	418	316	363
120	1000	370	940	463	350	400
138	-	-	1030	530	-	460
144	1200	437	-	-	408	-
150	-	-	1080	577	-	500
168	1200	503	-	-	490	-
174	-	-	1160	660	-	570
180	1200	535	-	-	510	-
192/198	1200	565	1200	746	545	649

(1) Pendiente de onda (Tasa de incremento) $kV/\mu s$

(2) Todas las características de protección están en kV cresta.

CAPÍTULO V

COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO Y APLICACIONES

5.1. Tensión residual después de altos picos de corriente

Antes los pararrayos empleaban principalmente bloques de carburo de silicio no lineal, que pueden ser formados en más de una manera. Actualmente los pararrayos utilizan resistores adheridos cerámicamente. Estos alcanzan temperaturas que exceden los 1200 °C y presentan una característica de tensión residual muy estable, aún después del paso de impulsos extremadamente altos. Por otra parte, resistores con uniones no cerámicas que pueden calentarse a menores temperaturas pueden mostrar cambios en la tensión residual en más del 100 % después de tal impulso.

La inestabilidad eléctrica de resistores no lineales puede ser asegurada a diferencia de la medida de la tensión de descarga a corriente nominal después de la prueba de corriente pico de acuerdo a norma. La mayoría de autoridades no acepta un cambio de más del 20 %.

Aunque no siempre reconocidos como tales, esta es una característica extremadamente importante para el diseño de pararrayos. Puede verse en seguida que si la tensión residual cambia tanto como 100 % a consecuencia de una descarga de rayo entonces tal pararrayo, aunque aparentemente este en buenas condiciones, tendrá una tensión residual que excederá el BIL del equipo que se intenta proteger. Esto podría presentarse en el pararrayo causando daño al equipo en la próxima operación.

5.2. Desempeño en líneas de transmisión

Todas las normas internacionales incluyen una prueba de comportamiento o desempeño en líneas de transmisión en la condición más desfavorable para el pararrayo en vez de una prueba con onda cuadrada. Antes de las ediciones actuales

de estas normas, no había métodos específicos de evaluación del desempeño de los pararrayos clase estación cuando están conectados a una línea de transmisión.

5.3. Niveles de seguridad de presión en el diafragma

Todos los pararrayos para ciclos de trabajo adverso y muchos de los de ciclo de trabajo moderado son equipados con diafragma de alivio de presión.

Durante la operación normal del pararrayo una presión de gas no apreciable es generada, pero, si el pararrayo pierde esta condición al interrumpir la corriente de descarga, causado por tener que hacer frente a una falla superior a los límites de diseño, entonces la máxima corriente del sistema fluirá a través del pararrayo. Esto ocasionará una elevación extremadamente alta de la presión del gas dentro de la cubierta de porcelana.

El propósito del diafragma es mantener una presión considerablemente menor que la que puede resistir la cubierta. Esto alivia la presión interna y de esta manera previene la explosión de la cubierta de porcelana.

Como la única característica límite bajo condiciones de falla será la potencia de cortocircuito en el punto del sistema donde el pararrayo es conectado, entonces un pararrayo debería ser seleccionado teniendo un diafragma de alivio de presión probado al menos para la corriente correspondiente a la potencia de cortocircuito. Las diversas normas reconocen diversas clases de alivio de presión, un resumen puede ser visto en la tabla 2.1.

5.4. Encebado y corriente límite del pararrayo tipo peine

Los pararrayos clase estación pueden emplear dos notablemente diferentes sistemas de peine o explosores (**gaps**) excitados magnéticamente.: El tipo mas común es generalmente denominado “limitador de corriente” se refiere al hecho que el campo electromagnético es utilizado para estirar y aplacar el arco dentro de una cámara cerámica que sucesivamente causa una caída de tensión a través de los arcos, de esta manera se reduce la corriente en los bloques. El sistema anterior es particularmente adecuado para líneas de transmisión largas donde la duración de las descargas de

corriente es típicamente dos (2) milisegundos o más. Sin embargo, este sistema debería ser utilizado con precaución en líneas de transmisión cortas o redes complejas donde hay tiempo insuficiente de descarga para que este sistema opere completamente.

Gaps activos no son “limitadores de corriente” generalmente emplean magnetos permanentes y gran cantidad de electrodos de cobre. Como no generan tensiones de arco no brindan tan buenos niveles de protección como los “limitadores de corriente”. Sin embargo, son extremadamente durables y son particularmente adecuados para frecuentes operaciones en redes cortas o instalaciones con hornos de arco.

5.5. Impedancia característica del sistema y su efecto en el diseño de pararrayos

El pararrayo ideal debería ser diseñado para derivar corrientes de descarga a tierra con la mínima cantidad de disturbios en el sistema. Estas características en el diseño ideal del pararrayo debería tener una impedancia muy alta a la tensión nominal del sistema. Sin embargo, esta condición ideal aún no puede ser alcanzada y todos los pararrayos fabricados actualmente tomarán una corriente del sistema eléctrico al cual están conectados.

El valor de la corriente tomada del sistema dependerá de dos (2) impedancias, la primera es la impedancia del sistema y la segunda la impedancia de las resistencias serie no lineales del pararrayo. Por lo tanto, si la impedancia del sistema es considerada insignificante, entonces solo el factor limitador para la corriente de descarga será la impedancia del pararrayo a la tensión nominal. Algunos de los aspectos de la corriente de descarga han sido ya discutidos en la sección 5.4.

Se ha sostenido que en el caso del limitador de corriente el desgaste del gap es despreciable debido al hecho que la tensión de arco generada reduce la tensión de descarga a un orden mucho menor. Esa no es la razón, como pruebas hechas en un número de limitadores de corriente de diferentes fabricantes lo demuestran.

5.6. Pararrayos para aplicaciones especiales

5.6.1. Protección de transformadores del tipo seco

A causa de que los transformadores del tipo seco tienen un nivel básico de impulso (B.I.L.) considerablemente menor que los transformadores convencionales de la misma tensión nominal inmersos en aceite, consideraciones especiales deben ser tomadas en cuenta para la selección adecuada de los pararrayos para su protección. La norma NEMA LA.1 cita la Tabla F en el apéndice B la lista de características de protección para tales pararrayos. la Tabla 5.1 muestra una comparación entre las características recomendadas para la protección de transformadores secos y los pararrayos de distribución típicos. Puede verse claramente que características menores son especificadas para transformadores secos. Las características disruptivas inferiores probablemente conduzcan a la operación más frecuente del pararrayo y por consiguiente más adversa para el pararrayo. Por esta razón, pararrayos con un ciclo de operación de 10 kA son utilizados con frecuencia.

TABLA 5.1

CARACTERÍSTICAS DE PROTECCIÓN PARA TRANSFORMADORES DEL TIPO SECO

Tensión nominal kV r.m.s.	Impulso de descarga kV Cresta		Tensión nominal a 5 kA kV Cresta	
	Normado	Tipo seco T/X	Normado	Tipo seco T/X
3	25	10.5	15.5	11.5
6	40	19.5	31	23
9	56	30	46.5	35
12	72	37	54	46
15	83	46	61	58

5.6.2. Protección de máquinas rotativas

Para dar una protección completa a las máquinas rotativas, seis pararrayos son necesarios para cada máquina trifásica, tres (3) conectadas entre fase y tierra y tres (3) conectados entre fases. Un considerable ahorro en costo puede ser alcanzado por el uso de la disposición mostrada en la figura 5.1, que empleando cuatro pararrayos y especificando cada sección a la mitad de la máxima tensión fase - fase, brinda una protección completa. Debe resaltarse que esta disposición es solo una solución práctica para máquinas hasta 33 kV, a menudo se considera que tres pararrayos conectados entre fase y tierra dan una protección adecuada.

Como en el caso de los transformadores secos, el BIL para máquinas rotativas normalmente es menor. En la norma NEMA LA.1 citan características de protección recomendadas.

Es normal en la práctica utilizar pararrayos clase estación para la protección de máquinas rotativas, aunque si la máquina es de menor importancia, entonces los pararrayos clase distribución suelen ser utilizados en ocasiones.

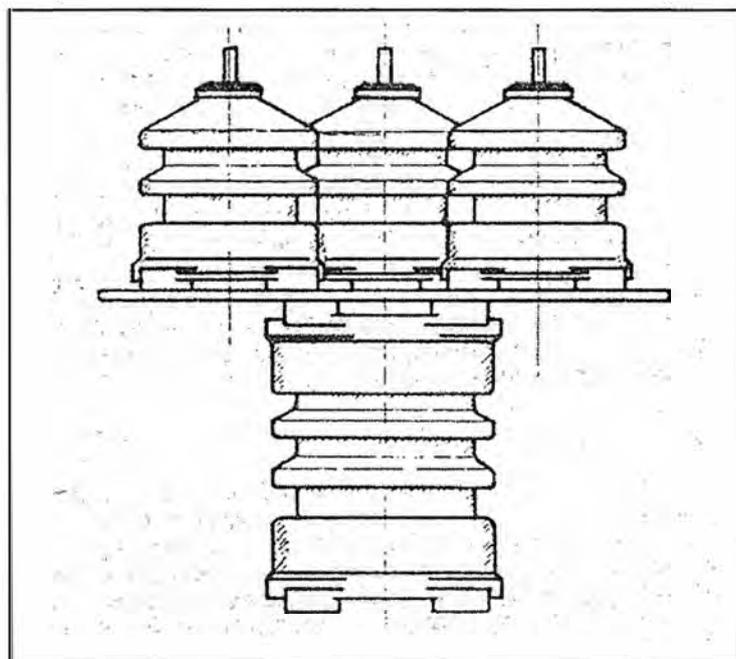


Figura 5.1 Arreglo de pararrayos para la protección de máquinas trifásicas

5.6.3. Protección de bancos de condensadores

Los pararrayos en ocasiones son utilizados para la protección de bancos de condensadores. Si tal pararrayo opera, entonces podría descargar el capacitor a tierra. Bajo ciertas condiciones, el condensador podría ser cargado hasta la tensión de descarga del pararrayo. La energía involucrada ($1/2 CV^2$) puede ser extremadamente alta y un pararrayo utilizado en tales aplicaciones debe ser capaz de disipar esta energía. Obviamente, como la máxima energía que el pararrayo podría descargar es proporcional a V^2 (Donde V es la tensión pico de descarga del pararrayo), consideración que deberá darse al hacer uso de un pararrayo con características de descarga inferiores. También, el uso de reactores limitadores de corriente en serie pueden reducir el trabajo del pararrayo.

En la figura 5.2 se muestran los diagramas de las posibles conexiones de pararrayos utilizadas para la protección de bancos de condensadores

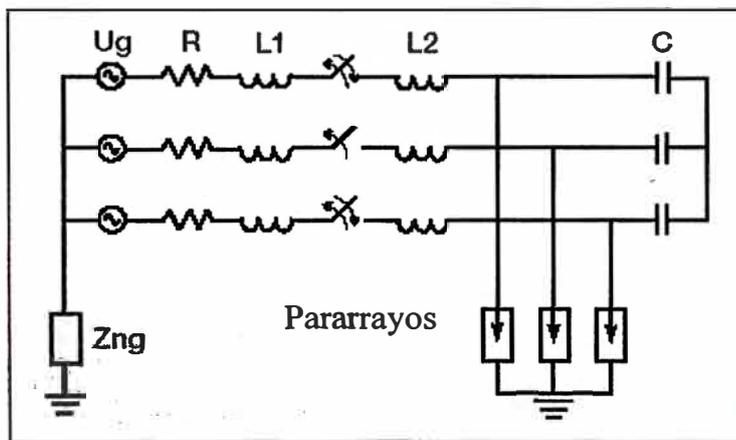


Figura 5.2a
Diagrama del circuito para el caso con pararrayos conectados fase-tierra

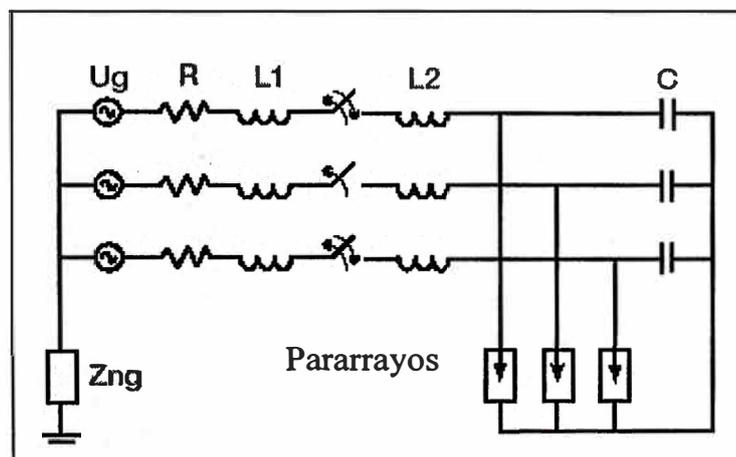


Figura 5.2b
Diagrama del circuito para el caso con pararrayos conectados fase-neutro

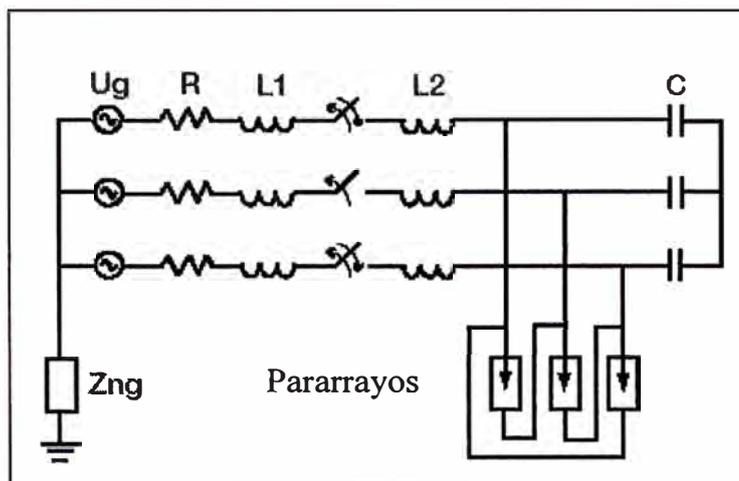


Figura 5.2c
Diagrama del circuito
para el caso con
pararrayos conectados
fase-fase

Es recomendable solicitar información del fabricante de pararrayos si es requerido para tales aplicaciones.

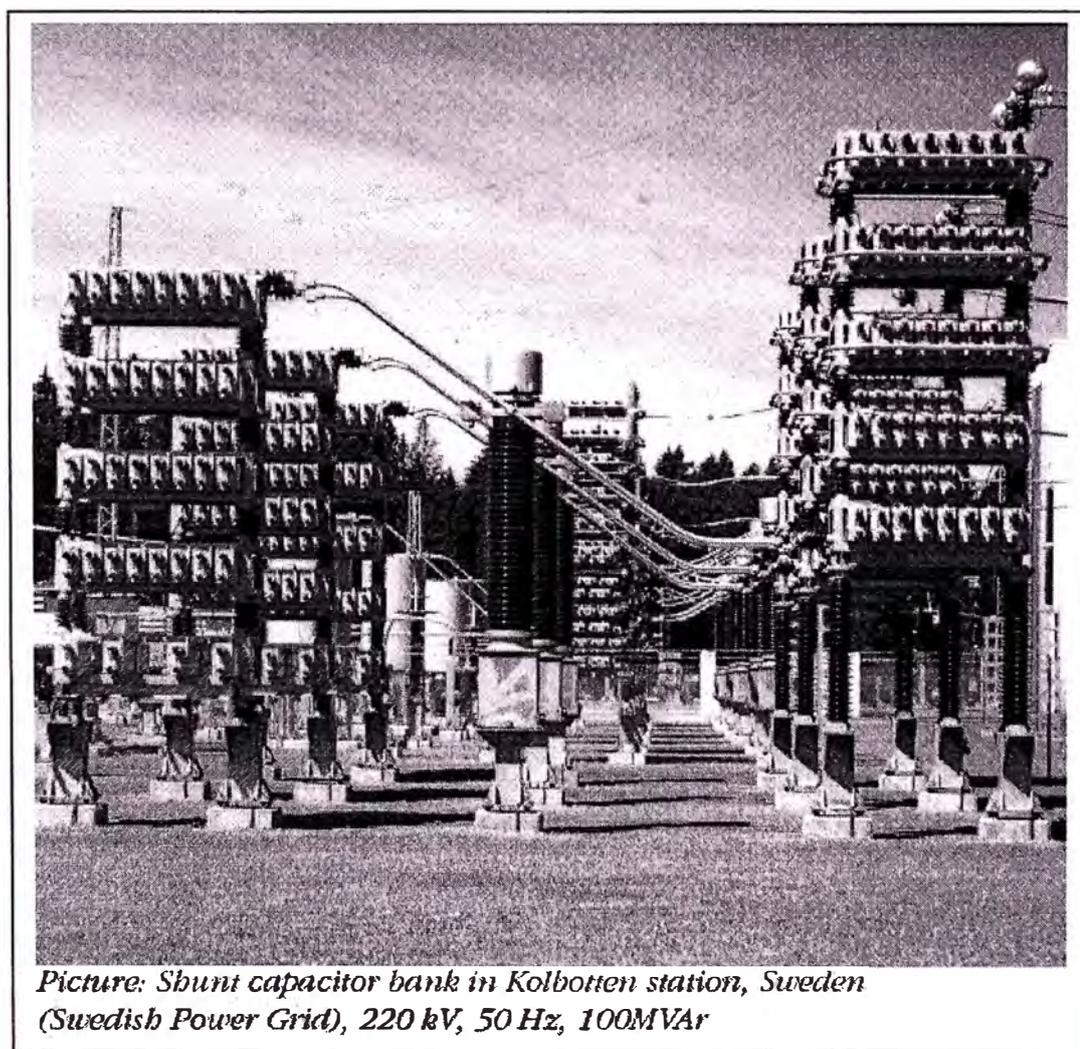


Figura 5.3 Banco de condensadores en la Subestación Kolbotten

CAPÍTULO VI

PARARRAYOS DE ÓXIDO METÁLICO

La presente generación de pararrayos se basa en el nuevo concepto de eliminación de los explosores (gaps). Componentes tales como el óxido metálico tienen una característica de resistencia extremadamente no lineal y es posible proporcionar protección adecuada para un sistema de potencia sin la inclusión de los explosores (gaps) en serie. Las ventajas de tal sistema son de por sí evidentes no solo desde la construcción mecánica simple del dispositivo, también la respuesta instantánea a las condiciones de sobretensión transitoria, alta capacidad de disipación de energía y operación segura.

El pararrayo es una pieza vital del equipamiento y una protección contra daños a otros equipos de la subestación. Por lo tanto, es esencial que el pararrayo sea estable por sí mismo bajo todas las condiciones de operación del sistema. Este, sucesivamente requiere que el comportamiento del sistema, especialmente bajo condiciones de sobretensiones temporales, debe ser conocido (desafortunadamente esto se puede apreciar solo en sistemas de extra alta tensión). cuando no se da tal caso, el pararrayo tiene que ser seleccionado con un margen de seguridad suficiente.

La selección correcta de U_c y la capacidad TOV (Sobretensiones temporales) es por consiguiente de vital importancia. En cada caso U_c debe ser mayor o equivalente a U_{ca} la cual es la tensión a frecuencia industrial continua actual entre los terminales del pararrayo. U_{ca} depende de la tensión del sistema además de la forma de conexión del pararrayo.

Por ejemplo, U_{ca} para un pararrayo conectado entre fase y tierra en un sistema trifásico es $U_m/\sqrt{3}$, mientras U_{ca} para un pararrayo conectado entre fases es U_m . tanto la amplitud y la duración de las sobretensiones temporales son importantes a la vez, determinan el esfuerzo sobre el pararrayo.

Seleccionar un pararrayo para una aplicación específica es un compromiso entre el nivel de protección, capacidad ante sobretensiones temporales y disipación de energía. El incremento de la capacidad TOV (por adición de bloques en serie) incrementa la posibilidad de que el pararrayo siga operando bajo los esfuerzos de tensión del sistema pero reduce el margen de protección proporcionado por el pararrayo para un nivel de aislamiento dado. Un pararrayo con una alta capacidad de disipación de energía reduce el riesgo de falla. La optimización depende de que tan bien las solicitaciones actuales del pararrayo son conocidas o pueden ser estimadas.

Los pararrayos de óxido metálico son aplicados a diversos sistemas incluyendo equipos de subestaciones, convertidores AC DC, vehículos de transporte y sistemas de distribución. Estos pararrayos demuestran excelentes características de protección en diversas aplicaciones como se muestra en la figura 6.1.

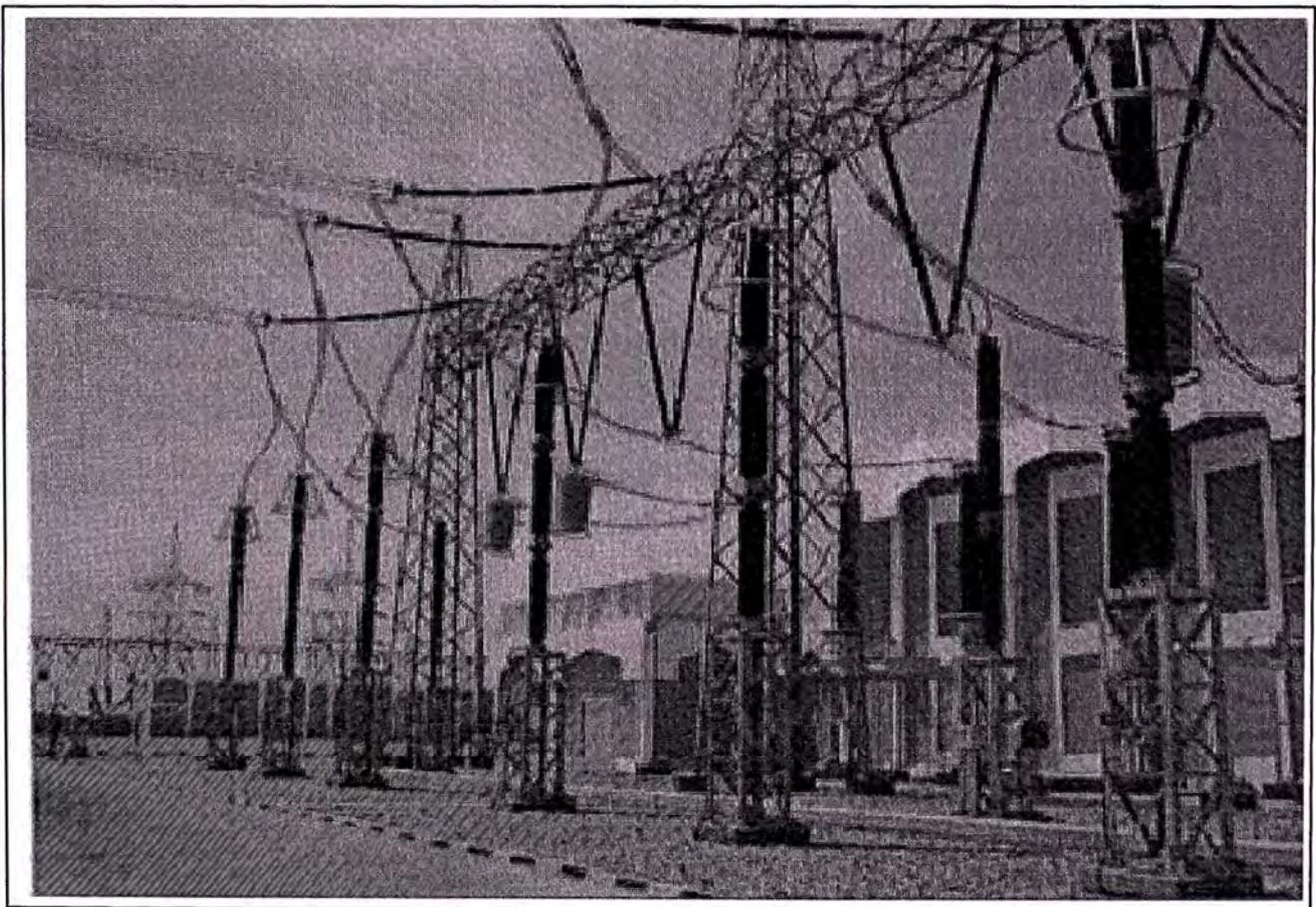


Figura 6.1a. Aplicación de pararrayos en Subestaciones (400 kV)

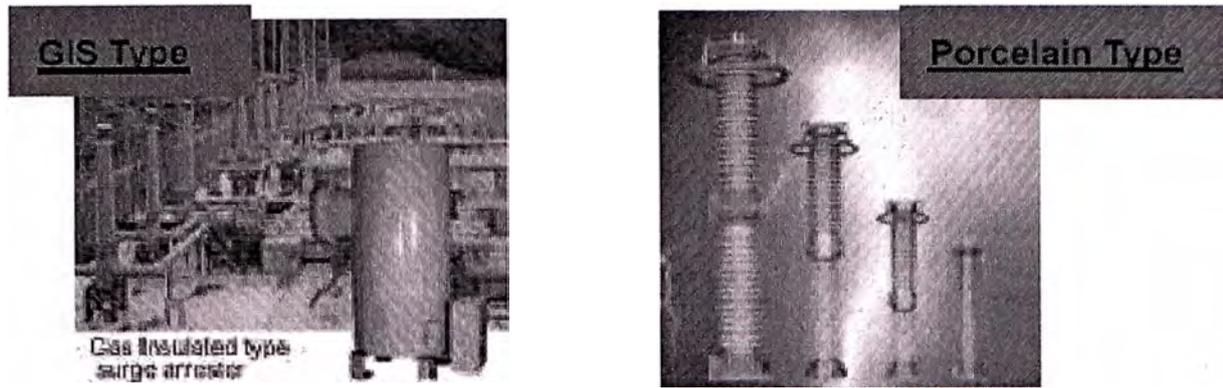


Figura 6.1b. Aplicación de pararrayos en Subestaciones

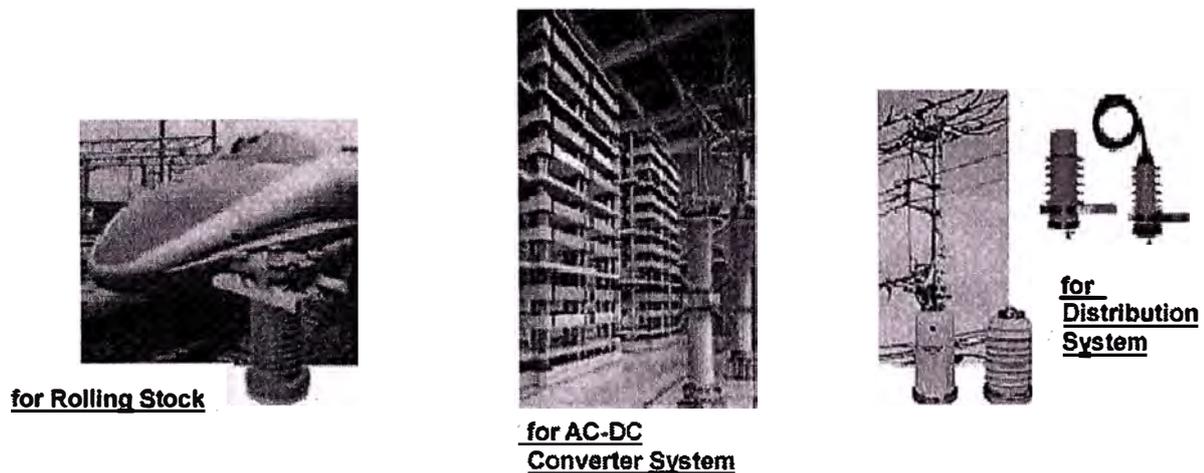


Figura 6.1c. Aplicación de pararrayos en sistemas de transporte, convertidores AC-DC y sistemas de distribución

La precaución es esencial cuando se selecciona la máxima tensión de operación continua para los pararrayos de óxido metálico, en cuanto a bajas tensiones para un sistema específico podría ocasionar un embalamiento térmico.

Bajo ninguna circunstancia un pararrayo de óxido metálico debe ser utilizado en un sistema donde la regulación de tensión a frecuencia industrial puede exceder los valores máximos establecidos. Consideraciones especiales deben ser tomadas en cuenta para tales

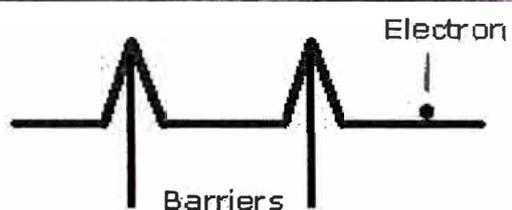
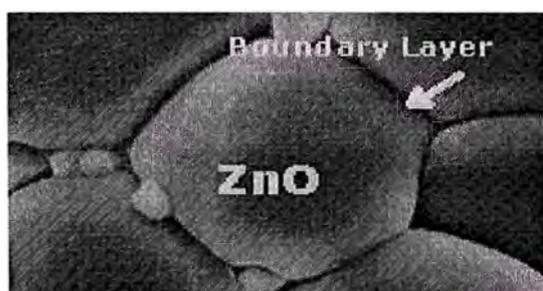
condiciones como rechazo de carga, efecto Ferranti y sobretensiones armónicas que podrían ocasionar una falla precipitada del pararrayo.

El monitoreo continuo de la corriente de operación en estado de reposo es un método de registro de la estabilidad en un pararrayo de óxido metálico. Es por lo tanto recomendable que durante la instalación de los pararrayos se implemente un contador de descargas y un amperímetro para la medición de la corriente de fuga.

6.1. Principio de operación

Los elementos resistivos no lineales consisten principalmente de componentes de óxido de zinc (ZnO) y diversos tipos de aditivos, que están mezclados, en gránulos, formando y aglomerado en un bloque completo con electrones en ambas superficies.

La figura 6.2 muestra un panorama típico interior del elemento resistivo no lineal bajo un microscopio electrónico con barrido. Se compone de conexiones en serie y paralelo de los gránulos de óxido de zinc (ZnO) y las capas límite, el modelo de banda de energía es mostrado en la parte inferior de la figura 6.2. La capa límite tiene una variación alta de impedancia para un rango de corrientes pequeñas, así la tensión de operación normal es casi aplicada totalmente a esta capa límite.



Energy Band Model

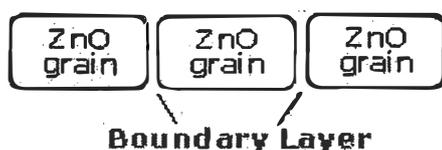


Figura 6.2. Mecanismo de conductividad de los elementos resistivos no lineales

La figura 6.3 muestra la característica tensión vs. corriente de un pararrayo clase 550 kV como ejemplo. La corriente que fluye a través de los elementos resistivos no lineales a la tensión nominal línea – tierra esta en el orden de los micro - Amperes (μA). Como resultado, la actuación de la protección de los elementos resistivos no lineales son estables en periodos extensos de uso.

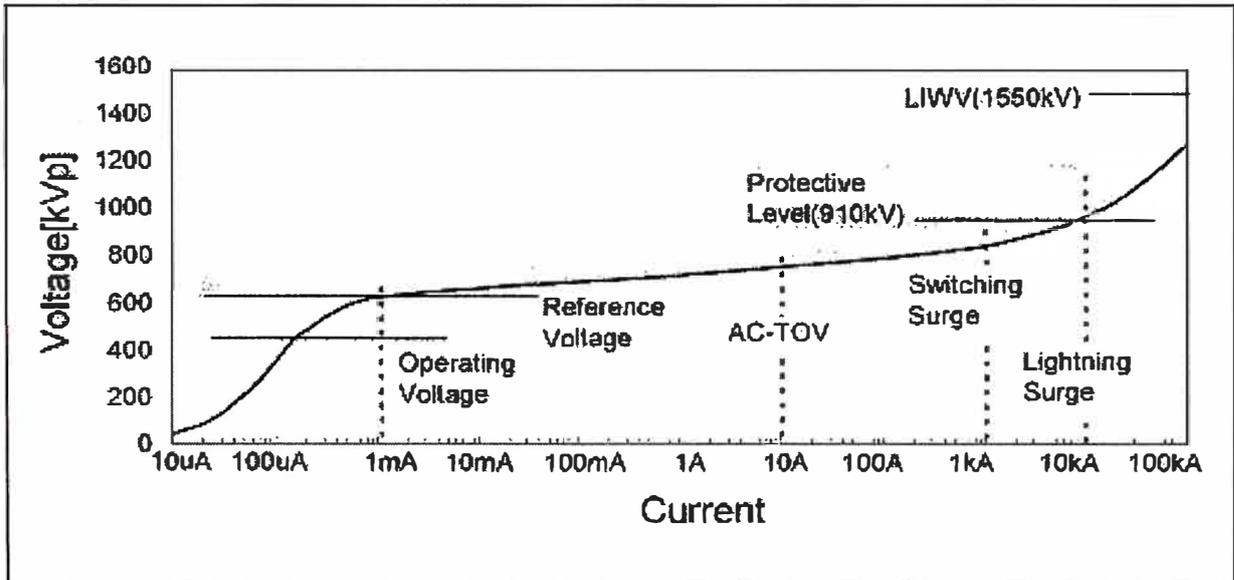


Figura 6.3. Curva característica tensión – corriente para un Pararrayo de 550 kV.

6.2. Estructura

La estructura típica de los pararrayos es mostrada en la figura 6.4 (tipo porcelana) y figura 6.5 (tipo GIS). Los pararrayos están compuestos básicamente de los elementos resistivos no lineales, cubierta protectora y componentes asociados con la carga de gas aislante como se muestra en las figuras. El sellado hermético de la cubierta protectora esta constituido de caucho sintético impermeable. El diafragma de alivio de presión, esta construido con láminas de metal especial, que se apertura cuando una elevación inesperada de presión ocurre en caso de una falla interna.

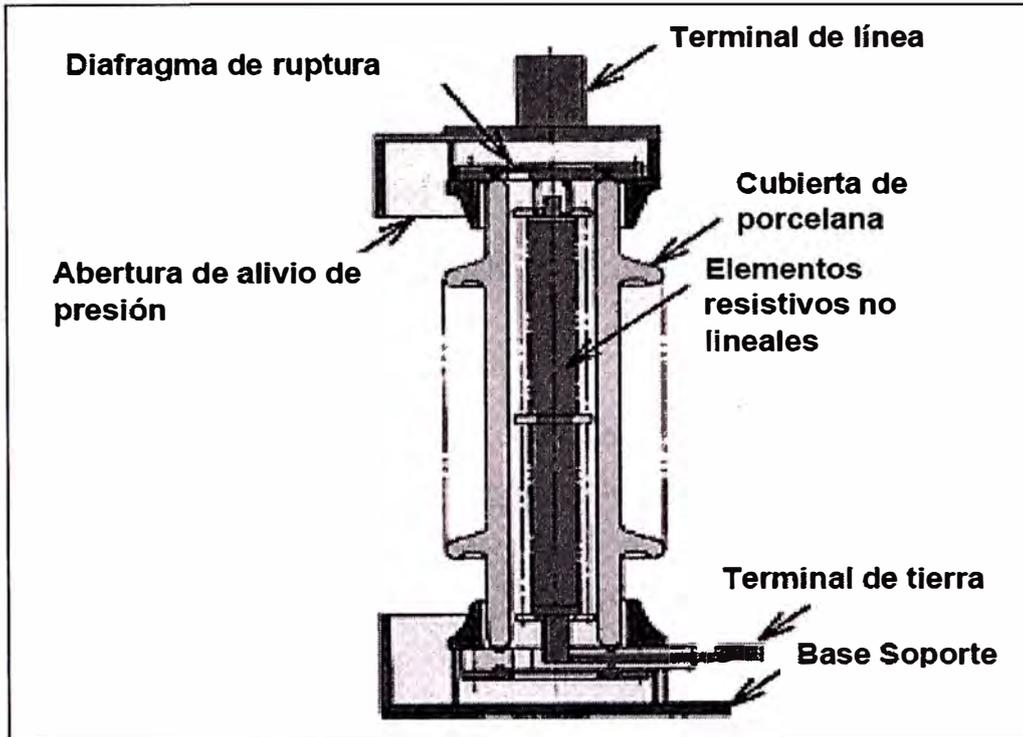


Figura 6.4. Estructura típica de pararrayo tipo porcelana

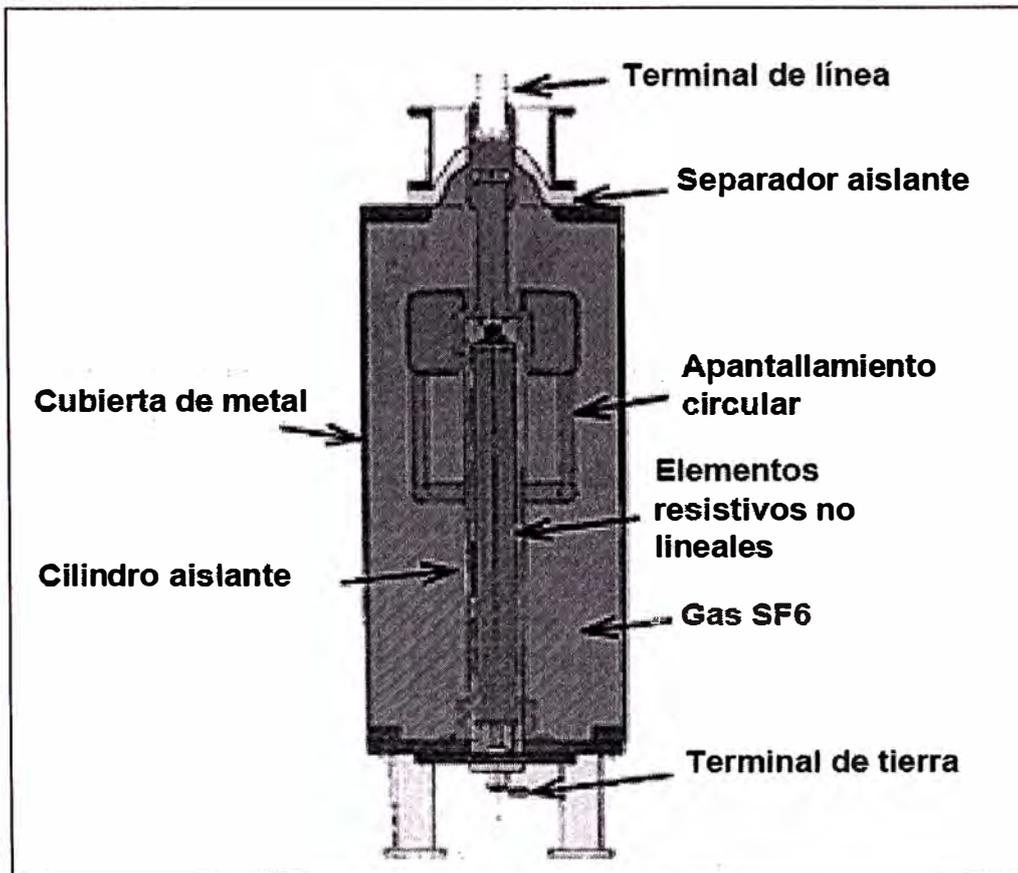


Figura 6.5. Estructura típica de pararrayo tipo GIS

6.3. Selección de los parámetros de los pararrayos de óxido metálico

6.3.1. Obtención o estimación de la Tensión Máxima del Sistema (U_m).

Si solo la tensión nominal del sistema es conocida, U_m puede ser estimada como un 5 o 10% mayor. El estado o tensión nominal de diseño de otros equipos es también una referencia.

6.3.2. Condiciones de falla a tierra.

La comúnmente más conocida sobretensión temporal (TOV) es originada por las fallas monofásicas a tierra. La amplitud se obtiene multiplicando $U_m/\sqrt{3}$ por el factor de falla a tierra K_e que a su vez es determinado por las condiciones de aterramiento. La figura 6.6 da los valores de K_e dependiendo de la resistencia y reactancias del sistema para la más desfavorable resistencia de falla. De ser desconocidos estos parámetros del sistema, K_e es estimado como 1.4 para sistemas directamente aterrados y 1.73 para sistemas con neutro aislado y aterrado resonante.

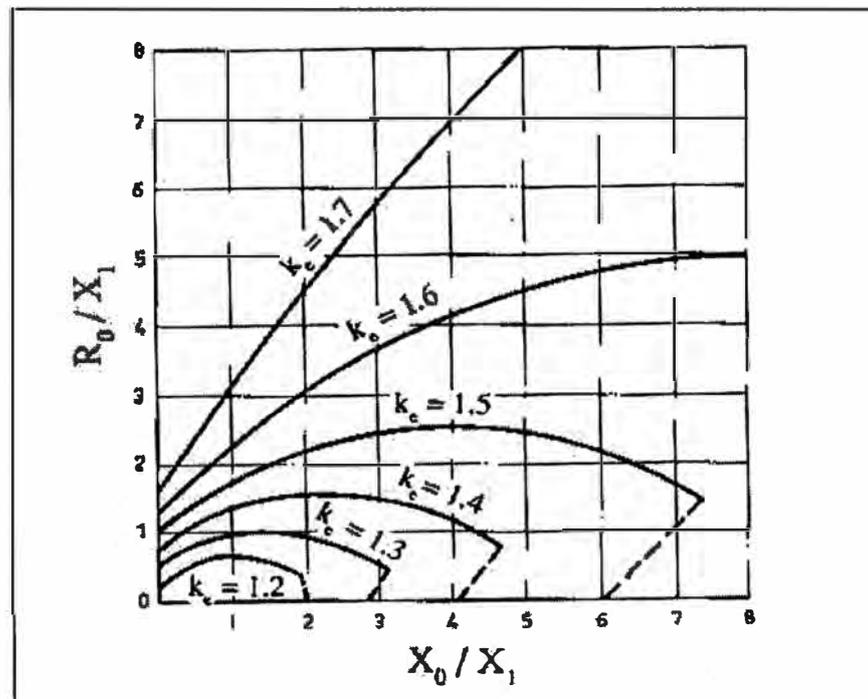


Figura 6.6. Curva de relación entre R_0/X_1 y X_0/X_1 para valores constantes de factor K_c de falla a tierra.

R_0 = Resistencia de secuencia cero

X_0 = Reactancia de secuencia cero

X_1 = Reactancia de secuencia positiva

La duración depende del tiempo de despeje de la falla y si este no es conocido, se estima como 1 a 3 segundos para sistemas de alta tensión directamente aterrados y 3 a 10 segundos para sistemas de distribución directamente aterrados. para sistemas con neutro aislado o aterrado resonante, la duración es importante puede variar de algunos segundos a algunas horas dependiendo si el aclaramiento de la falla es usado o no. Para duración de fallas previstas sobre 2 horas las sobretensiones temporales deberán generalmente ser consideradas como continuas (en muchos casos) y el pararrayo correspondiente elegido.

6.3.3. Comprobación de las condiciones anormales del servicio.

Condiciones anormales del servicio tales como temperatura ambiente por debajo de -40°C o superiores a los $+45^{\circ}\text{C}$, frecuencias menores de 15 Hz o mayores de 62 Hz, presencia de fuentes de calor (hornos) cerca a los pararrayos puede conducir a la selección de mayores U_c y/o U_r y por lo tanto la necesidad de aclarar tales condiciones.

6.3.4. Comprobación de otras razones para la aparición de TOV.

Generalmente solo las sobretensiones temporales provocadas por fallas a tierra y rechazo de carga son de interés. Configuraciones de red seguras, sin embargo, pueden originar sobretensiones por resonancia. estas pueden surgir durante la operación no simultánea de interruptores. las sobretensiones por resonancia deben ser evitadas en general por un diseño adecuado del sistema (especialmente para sistemas de distribución en corriente alterna) y no tiene que ser la base para la selección de la capacidad TOV del pararrayo.

En algunos casos, se realiza esfuerzos para reducir la corriente de falla a tierra por aterramiento selectivo de los neutros de solo algunos transformadores manteniendo aún un sistema efectivamente aterrado en

conjunto. En tales casos, hay una posibilidad que algunas partes del sistema puedan hacerse no efectivamente aterrado (Incrementando el valor de K_e) por algún periodo donde uno o más transformadores con neutro aterrado sean puestos fuera de servicio. Una falla a tierra durante este periodo puede conducir a una alta TOV y avería del pararrayo si esta contingencia no es tomada en cuenta. Ya que tales eventos son raros, puede ser justificado aceptar un riesgo de falla en el pararrayo en vez de seleccionar un pararrayo con una alta capacidad TOV y de esta manera un alto nivel de protección.

Si durante un rechazo de carga, una falla a tierra es encontrada, la TOV en las fases sin falla suele elevarse más que le que habría si los eventos ocurrieran independientemente.

6.3.5. Selección de la tensión de operación continua.

En un sistema trifásico con los pararrayos conectados entre fase y tierra, $U_{ca} = U_m/\sqrt{3}$. Si el sistema no tiene condiciones anormales del servicio expuestas en el ítem 6.3.3 en adelante, U_c por lo tanto debe ser equivalente o mayor que $U_m/\sqrt{3}$. Para hacer la selección más fácil, las tablas en los catálogos relacionados contienen todas las tensiones del sistema de acuerdo a la IEC (y algunas otras tensiones de sistemas encontrados comúnmente) y los correspondientes “pararrayos de elección común”.

Debe notarse que si la tensión actual del sistema no es mayor que el voltage dado en tablas, todos los pararrayos enumerados para esta tensión específica del sistema son igualmente adecuados respecto a la tensión de operación continua. Solo si la tensión actual es superior entonces la columna que muestra U_c para cada pararrayo que tiene que ser utilizado para una selección adecuada. la U_c requerida es entonces calculada como la tensión actual del sistema dividida por $\sqrt{3}$, y un pararrayo con superior o equivalente U_c deberá ser seleccionado de la tabla.

6.3.6. Selección de capacidad TOV adecuada.

En general, los pararrayos no son utilizados para proteger equipos contra las TOV, ya que requeriría un gran número de columnas en paralelo de bloques. Tales aplicaciones pueden ser consideradas solo en caso de límite o eliminación de resonancia TOV. Estudios cuidadosamente detallados son requeridos en tales casos para seleccionar pararrayos con una capacidad de energía adecuada.

La impedancia de cortocircuito vista del pararrayo durante las condiciones de TOV juega un papel importante en la determinación del requisito de energía para el pararrayo. La figura 6.7 ejemplifica esto para un pararrayo tipo EXLIMP-A (ABB).

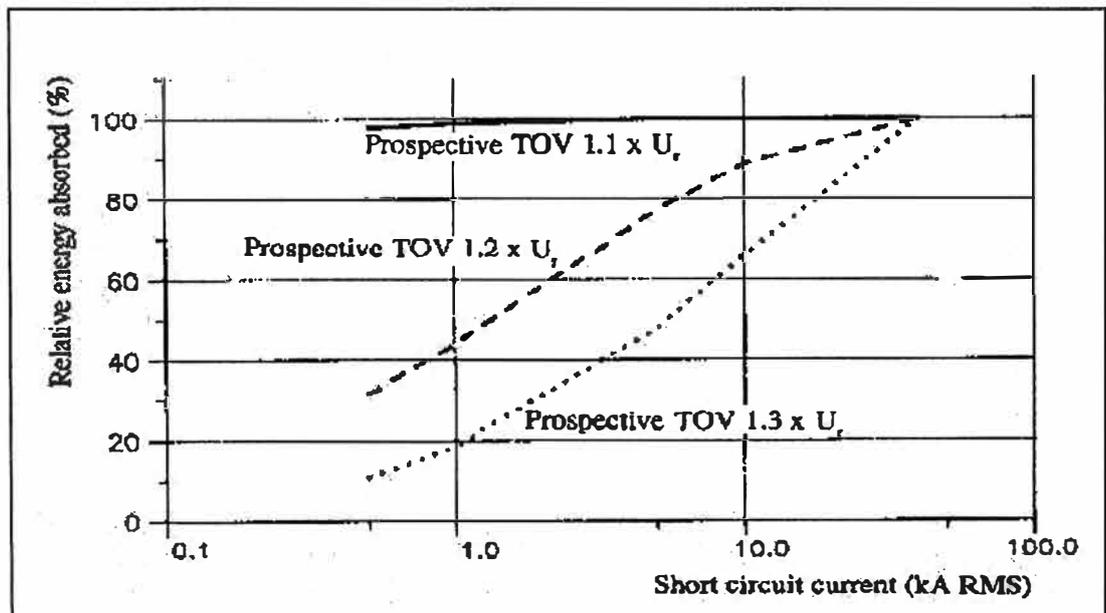
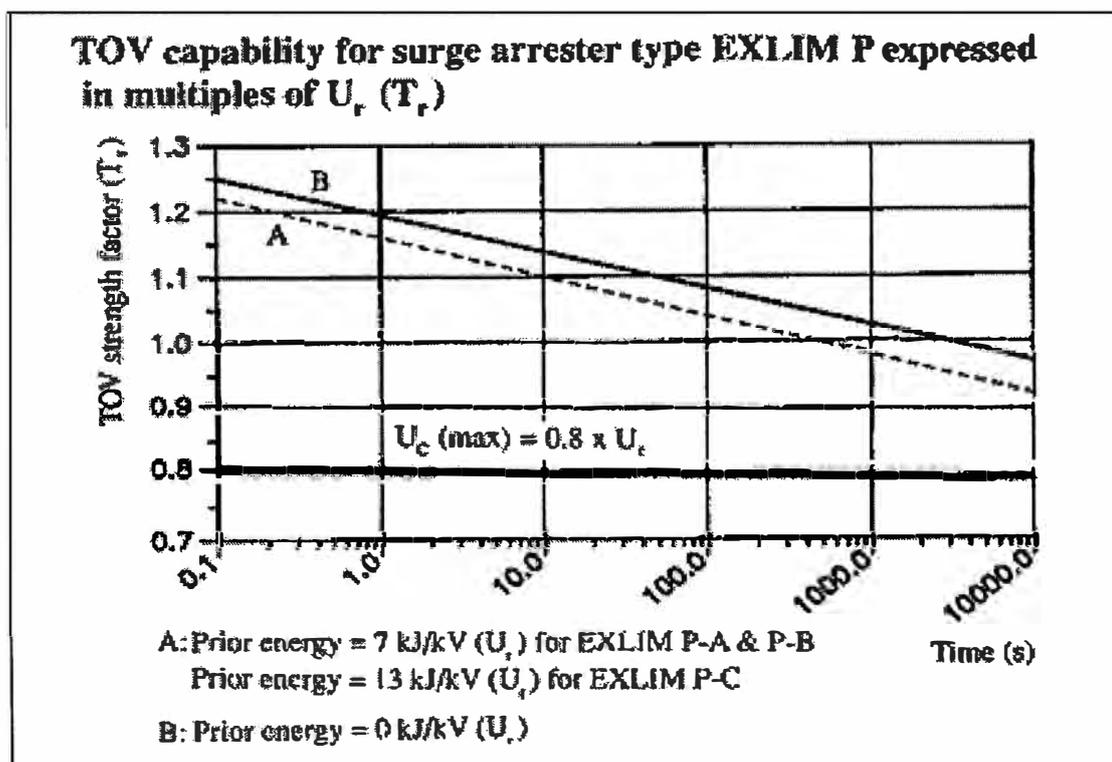


Fig 6.7 Efecto de la corriente de cortocircuito en la Energía absorbida por el pararrayo tipo EXLIMP P-A (Fabricante: ABB) a una determinada Sobretensión temporal (TOV)

Como se ve en las curvas de la figura 6.7, el pararrayo podría resistir 10 veces la duración de una posible TOV a 1.3 p.u. si la corriente de cortocircuito es reducida de 40 kA a 0.5 kA r.m.s. Por otra parte, la corriente del pararrayo es también disminuida a 1.1 p.u. para influir la posible sobretensión inclusive a solo 0.5 kA r.m.s. de corriente de cortocircuito.

Otros factores que afectan la capacidad TOV es la energía absorbida (temperatura inicial de los bloques) previa a la aplicación de TOV y la tensión aplicada tras la TOV.

Para un tipo dado de pararrayo, la tensión nominal (U_r) es una medida de la capacidad ante las sobretensiones. Por lo tanto, la capacidad TOV adicional del pararrayo puede ser especificada como un múltiplo de U_r como se muestra en la figura 6.8. Este enfoque es utilizado por todos los pararrayos EXLIM en el caso del fabricante ABB (una filosofía diferente es utilizada por otros fabricantes, es dar la capacidad TOV en múltiplos de U_c).



**Fig 6.8 Capacidad TOV para pararrayos tipo EXLIM P
 (Fabricante: ABB) expresado en múltiplos de U_r (T_r)**

Las curvas en la figura 6.8 son establecidas por pruebas con tensión a frecuencia nominal. Para TOV con frecuencias inferiores, las mismas curvas pueden ser utilizadas.

Para frecuencias mayores de 50 o 60 Hz, puede asumirse que para la misma amplitud de tensión, el pararrayo resiste el mismo tiempo en segundos como a frecuencia industrial si la duración es menor que 10 segundos. En otros casos, se debe consultar al fabricante.

Los siguientes procedimientos deben ser adoptados para la selección de un pararrayo con suficiente capacidad TOV:

- Seleccionar una tensión nominal preliminar (U_{r0}) basado en U_c como $U_{r0} = U_c/0.8$ (U_c tomado del paso 6.3.5, usualmente equivale a $U_m/\sqrt{3}$).
- Determinar la amplitud TOV y la duración de la falla a tierra como $TOV_e = K_e \times U_m/\sqrt{3}$, donde
 $K_e \leq 1.40$ para sistemas con neutro directamente aterrado.
 $K_e = 1.73$ normalmente para aterrado resonante y sistemas con neutro aislado.

Para otros casos ver figura 6.6

- Determinar otras sobretensiones temporales $TOV_1, TOV_2, \dots TOV_n$ con amplitud y duración calculadas o estimadas.
- Considerar la absorción posible de energía W , en kJ. previa a la TOV y calcular W/U_{r0} . Para cada TOV determinar la mínima tensión nominal requerida $U_{re}, U_{r1}, U_{r2} \dots U_m$ dividiendo la amplitud de la TOV determinada por el factor T_r de sobretensión temporal dado en la figura 6.8 (Para el caso de los pararrayos EXLIM P – ABB u otro catálogo relevante) para la duración actual de la TOV y la absorción de energía calculada W/U_{r0} . si la absorción de energía específica calculada W/U_{r0} es mayor que los valores dados en la figura 6.8 (O

figuras correspondientes) incrementar U_{r0} o seleccionar un pararrayo con una mayor capacidad de energía.

Por consiguiente

$$U_{re} = TOV_e/T_{re}, U_{r1} = TOV_1/T_{r1}, U_{r2} = TOV_2/T_{r2} \text{ etc.}$$

- Seleccionar una tensión nominal final, U_r , que es el mayor de los valores U_{r0} , U_{re} , U_{r1} , U_{r2} , ... U_m . Si este no es un valor establecido o común, elegir el valor mayor más próximo del catálogo.

6.3.7. Tablas de selección.

Para los sistemas trifásicos más comunes, ABB recomienda clases de pararrayos de acuerdo a la tabla 6.2, basado en las siguientes asunciones en la tabla 6.1.

TABLA 6.1

Asunciones	Sistemas con neutro directamente aterrado		Aterrado resonante y sistemas con neutro aislado
	$U_m \leq 123 \text{ kV}$	$U_m > 123 \text{ kV}$	
TOV en p.u. de $U_m/\sqrt{3}$	1.55	1.5	1.73
Duración de falla	1 s	1 s	10 s y 2 h
Energía previa	Nominal	Nominal	Nominal

Las suposiciones hechas en la Tabla 6.1 para sistemas con neutro directamente aterrado incluye algunos efectos combinados de fallas a tierra y rechazo de carga, como se menciona el paso 6.3.4.

TABLA 6.2 CLASES DE PARARRAYOS RECOMENDADOS (ABB)

Sistema	Directamente aterrado			Aterrado resonante o neutro aislado					
	$\leq 1s$			$\leq 10s$			$\leq 2h$		
Tiempo de aclaramiento de falla									
Tipo de pararrayo	EXLIM P&T	EXLIM Q	EXLIM R	EXLIM P&T	EXLIM Q	EXLIM R	EXLIM P&T	EXLIM Q	EXLIM R
Capacidad de energía específica kJ/kV U_r	7 ¹⁾ 10 ²⁾ 13 ³⁾	4.5	2.5	7 ¹⁾ 10 ²⁾ 13 ³⁾	4.5	2.5	7 ¹⁾ 10 ²⁾ 13 ³⁾	4.5	2.5
U_m kV	U_r kV	U_r kV	U_r kV	U_r kV	U_r kV	U_r kV	U_r kV	U_r kV	U_r kV
4	4	4	4	4	4	4	6 ^{*)}	6 ^{*)}	6 ^{*)}
7	6	6	6	9	9	9	9	9	9
12	12	12	12	12	12	12	15 ^{*)}	15 ^{*)}	15 ^{*)}
18	15	15	15	18	18	18	21	21	21
24	21	21	21	24	24	24	27	27	27
36	30	30	30	33	33	33	42 ^{*)}	42 ^{*)}	42 ^{*)}
45	36	36	36	42	42	42	54	54	54
52	42	42	42	48	48	48	60	60	60
60	48	48	48	60	60	60	66	66	66
72	60	60	60	66	66	66	84	84	84
84	66	66	66	84	84	84	96	96	96
100	84	84	84	96	96	96	120 ^{*)}	120 ^{*)}	120 ^{*)}
123	96	96	96	120	120	120	144 ^{*)}	144 ^{*)}	144 ^{*)}
145	120	120	120	132	132	132	162 ^{*)}	162 ^{*)}	162 ^{*)}
170	132	132	132	162	162	162	192 ^{*)}	192 ^{*)}	192 ^{*)}
245	192	192	192						
300	228								
362	276								
420	330								
550	420								

Tensiones nominales recomendadas para pararrayos ABB tipo EXLIM T, P, Q y R. Selección basada en asunciones de acuerdo a la tabla 6.1.

1) Capacidad de energía para EXLIM P-A y EXLIM P-B

2) Capacidad de energía para EXLIM T-A

3) Capacidad de energía para EXLIM P-C

6.4. Capacidad de Energía

Esta parte esta dedicada principalmente a la consideración de esfuerzos debido a sobretensiones de maniobra y la energía almacenada en una línea de transmisión en los pararrayos instalados al inicio y al final de la línea como se muestra en la figura 6.9. este caso es generalmente considerado como el caso decisivo.

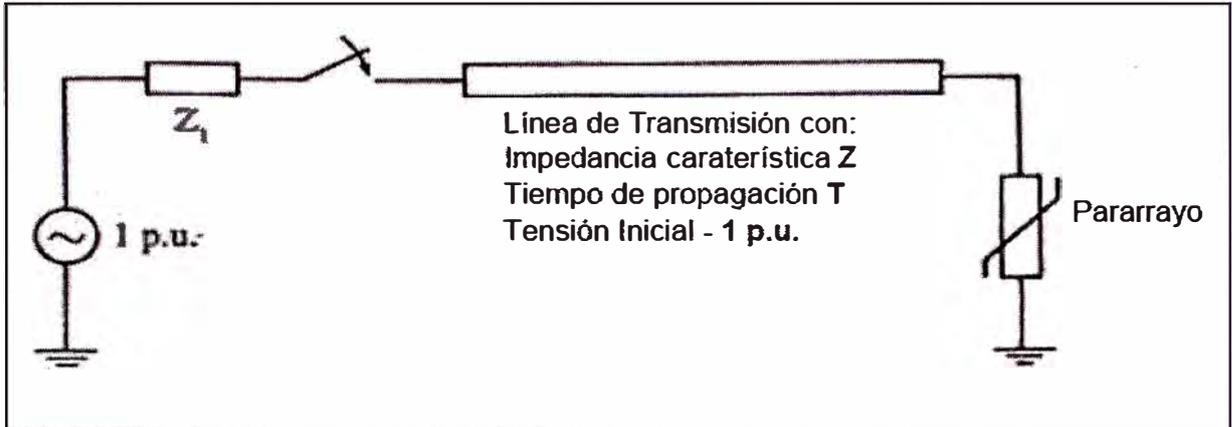


Figura 6.9. Modelo monofásico simple

Si el tiempo de propagación de la sobretensión en la línea es pequeña comparado con un ciclo de la tensión a frecuencia industrial y Z_1 representa una baja impedancia, la corriente a través del pararrayo tendrá una forma rectangular con una duración equivalente a 2 veces el tiempo de viaje T de la onda en la línea. La corriente a través del pararrayo y la tensión residual a esta corriente están dadas por la intersección de la característica de sobretensión de maniobra y la de carga de la línea y puede ser determinado trazando un diagrama de carga como en la figura 6.10.

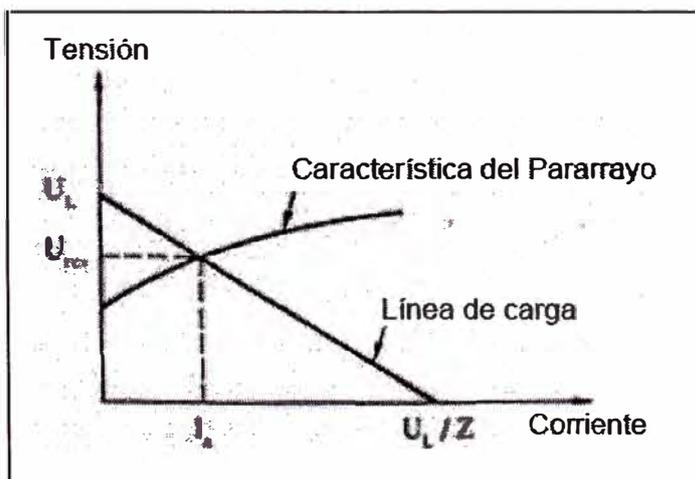


Figura 6.10.

Diagrama de carga

U_L = Sobretensión probable

Z = Impedancia característica

I_a = Corriente del pararrayo

U_{res} = Tensión residual del pararrayo

En un caso real, la corriente del pararrayo no tiene una forma de onda rectangular pura. La impedancia de la fuente, Z_1 afectará la onda de tensión impuesta en la línea al cierre del interruptor, la onda de tensión será distorsionada durante su desplazamiento en la línea, retornará ondas que causarán reflejos en el extremo transmisor, para sistemas polifásicos, las fases interactuarán.

Sin embargo, este modelo monofásico simple es utilizado en muchos casos. para evitar costosos programas y análisis transitorio de la red, el método simplificado puede ser aplicado como un primer intento para estimar los esfuerzos en los pararrayos provocados por las sobretensiones de maniobra. Si estos cálculos revelan altas energías y la necesidad de más estudios calificados que los considerados inicialmente, un estudio más riguroso es justificable.

6.4.1. Determinación de los parámetros de maniobra

Para usar el método simplificado, los parámetros de la figura 6.10 tienen que ser determinados por algún método. valores típicos para diferentes tensiones del sistema son dados en la tabla 6.3.

TABLA 6.3

Tensiones del sistema	Impedancia característica	Sobretensión posible sin pararrayo
U_m (kV)	Z (ohm)	U_L (p.u.)
Debajo de 145	450	3.0
145 a 345	400	3.0
362 a 525	350	2.6
765	300	2.2

La posible sobretensión U_L depende de parámetros tales como la ubicación del pararrayo, tipo de operación de maniobra, preinserción de cargas, la alimentación de la red y la compensación en paralelo. Además de los valores típicos dados en la tabla 6.3. el diagrama (publicado por CIGRE) mostrado

en la figura 6.11 puede dar una orientación para la estimación de U_L para un caso específico.

En la figura 6.11 valores mayores que los sugeridos en la tabla 6.3 pueden ser encontrados en algunos casos. Sin embargo, tales factores de sobretensión deberían ser analizados críticamente antes de ser utilizados en la estimación de la energía del pararrayo dado que usualmente los valores más altos encontrados en la figura 6.11 corresponden a raras situaciones, por ejemplo en la primera etapa de un sistema de alta tensión con líneas largas, radial sin compensación energizado de fuentes inductivas puras.

El tiempo de propagación de onda (T) depende de la longitud de la línea y la velocidad de propagación de la onda. Para líneas aéreas y tipo GIS la velocidad de propagación es aproximadamente equivalente a la velocidad de la luz ($0.3 \text{ Km}/\mu\text{s}$). para cables la velocidad es mucho menor (alrededor de $0.15 \text{ Km}/\mu\text{s}$).

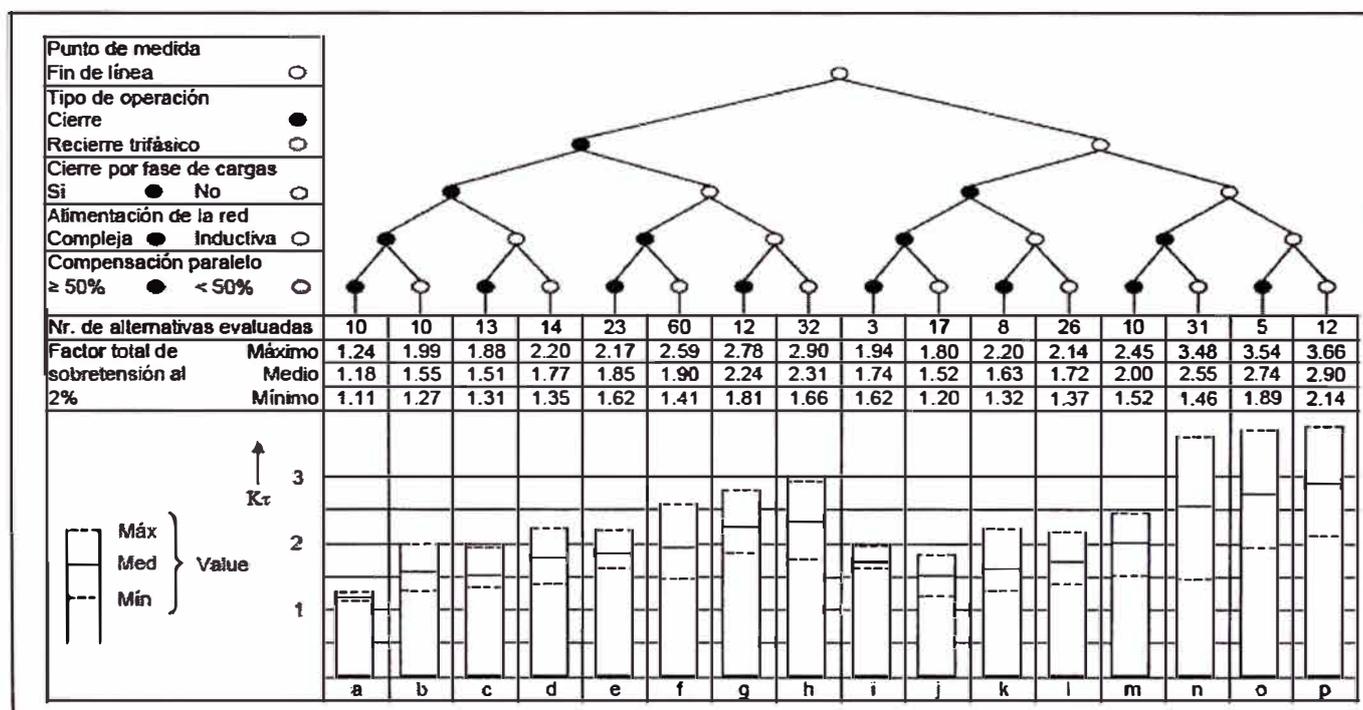


Figura 6.11 Evaluación de factores de sobretensión (valores al 2%) dependiendo del tipo de operación, cierre de cargas, alimentación de la red y compensación paralelo. (Fuente: CIGRE/ELECTRA)

6.4.2. Cálculo de la energía del pararrayo

La energía (W,kJ) absorbida por el pararrayo es dada por la ecuación

$$W = [(U_L - U_{res})/Z] \times U_{res} \times 2T \times n \dots\dots\dots (6.1) , \text{ donde:}$$

U_L = Posible sobretensión (kV)

U_{res} = Tensión residual del pararrayo (kV)

Z = Impedancia característica (Ohm)

T = Tiempo de propagación de la onda (μs) = l/v , donde

l = Longitud de la línea (Km)

v = Velocidad de propagación (Km/ μs)

n = Número de descargas consecutivas

se aprecia que la energía absorbida depende del nivel de protección. Por consiguiente un nivel de protección alto reduce las demandas de energía en kJ/kV.

6.4.3. Selección de un pararrayo con capacidad de energía adecuada

En las normas existentes o propuestas para pararrayos, la capacidad de absorción de energía para sobretensiones de maniobra ha de ser probada en la también denominada prueba de descarga en línea. Como ejemplo, para el caso de los pararrayos ABB y TOSHIBA, las clases correspondientes de acuerdo a las propuestas por la norma IEC son dadas en la tabla 6.4.

TABLA 6.4 CLASES DE DESCARGA

TIPOS DE PARARRAYO		CLASE DE DESCARGA EN LÍNEA
ABB	TOSHIBA	
EXLIM R-A	RVLQD	2
EXLIM Q-A	RVLQC	3
EXLIM P-A y EXLIM P-B	RVLQ	4
EXLIM T-A	RVLQE	5
EXLIM P-C	RVLQA	5

La energía absorbida por un pararrayo en una prueba de descarga en línea es una función de tanto la clase de descarga en línea y el nivel de protección de impulso por sobretensiones de maniobra del pararrayo. Esto se muestra en la figura 6.12.

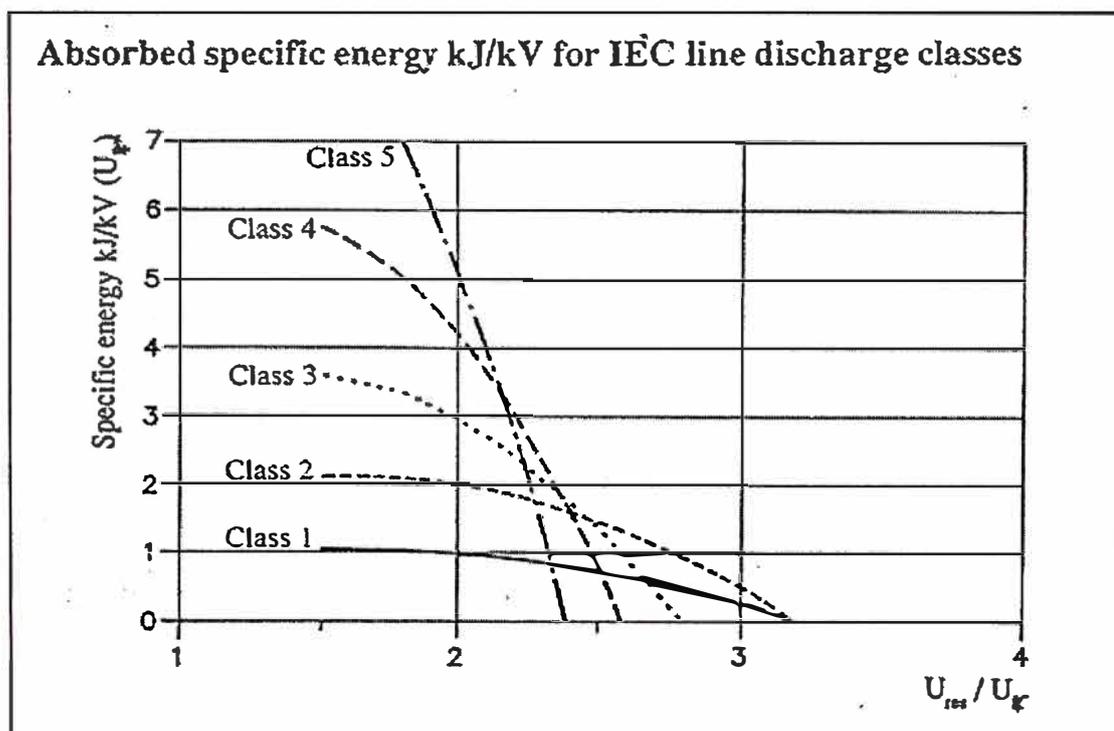


Figura 6.12. Energía específica en kJ por kV de tensión nominal, U_r , vs. la Relación de la Tensión Residual por Impulso de Maniobra, U_{res} , entre el valor eficaz de la Tensión Nominal, U_r , del pararrayo.

Parámetro: Clase de descarga de línea. (Fuente:IEC)

Nota: Debido a tolerancia requeridas en la prueba, la energía actual de las pruebas es usualmente 10-20 % mayor.

Para el caso de un pararrayo ABB específico, una estimación de la energía absorbida en la prueba de descarga de línea podría ser obtenida utilizando el nivel de protección de sobretensiones de maniobra del pararrayo de los catálogos y comprobando para la energía absorbida en la figura 6.12. este valor es entonces comparado con la energía de descarga requerida de la ecuación 6.1.

La prueba de descarga de línea IEC comprende repetidas descargas y la estabilidad térmica del pararrayo ha de ser verificada por 2 descargas consecutivas con 50 a 60 segundos entre ellas.

Usualmente, el caso diseño tiene una muy baja probabilidad de ocurrencia y es suficiente, por lo tanto, diseñar para una operación simple y no para 2 descargas consecutivas. Como ejemplo la capacidad de energía de impulso individual es dada en la tabla 6.5. EXLIMP-C es un pararrayo de doble columna para que ambas corrientes y por lo tanto el reparto de energía este asegurado en las pruebas de rutina.

TABLA 6.5 CAPACIDAD DE ENERGÍA (PARARRAYOS ABB)

Tipo de pararrayo	Capacidad de energía de impulso individual específica kJ/kV (U_r)	Corriente cresta aproximada para Onda rectangular 4 ms (A)
EXLIM R-A	2.5	300
EXLIM Q-A	4.5	600
EXLIM P-A y EXLIM P-B	7.0	1000
EXLIM T-A	10.0	1400
EXLIM P-C	13.0	1800

Para todos los tipos de pararrayo la energía total puede ser tomada para cualquier impulso con forma de onda rectangular y una duración de 4 ms o mayor

Si la capacidad de energía elegida no es suficiente, la solución más económica es incrementar la tensión nominal del pararrayo. Si esto conduce a un nivel de protección no aceptable, entonces se selecciona otro tipo con una mayor capacidad de energía.

En algunos casos pararrayos en paralelo deben ser utilizados para satisfacer altos requerimientos de energía. Los pararrayos deben entonces ser compatibles entre si para asegurar una adecuada distribución de la corriente.

6.4.4. Verificación de capacidad de energía por descargas atmosféricas

A tensiones del sistema menores (por debajo de 200 kV), la energía involucrada por sobretensiones de maniobra será generalmente menor. Al mismo tiempo, menor atención es prestada al aterramiento efectivo y protección de tales sistema. Por lo tanto, la capacidad de diseño será determinada por los esfuerzos originados por descargas atmosféricas.

Un cálculo conservador para la capacidad de energía del pararrayo por sobretensiones producidas por descargas atmosféricas es obtenida en la prueba de alta corriente empleando impulsos 4/10 . Esta onda somete al pararrayo a una alta energía durante un muy corto tiempo y por lo tanto a un choque térmico también. Notar que descargas de amplitudes estipuladas en las pruebas ocurren con una muy baja probabilidad en situaciones reales. Lo que es más, la duración del impulso real puede ser mayor que el contemplado en la prueba.

Las amplitudes de corriente pico normadas son 65 kA y 100 kA de acuerdo a ANSI / IEC. Como ejemplo se muestra en el caso de los pararrayos ABB la tabla 6.6, en la que se puede apreciar que en algunos casos resisten corrientes mayores.

TABLA 6.6

Tipo de pararrayo	Resistencia de alta corriente (2 descargas, Impulso 4/10) kA cresta
EXLIM R-A	100
EXLIM Q-A	100
EXLIM P-A y EXLIM P-B	100
EXLIM T-A	150
EXLIM P-C	200

Un pararrayo con bloques de mayor diámetro resisten mejor los esfuerzos provocados por descargas atmosféricas por dos razones:

1. La densidad de corriente será menor
2. La tensión residual será menor y consecuentemente también la energía descargada.

Por esta razón, es ventajoso elegir un pararrayo con bloques de diámetro mayor (y consecuentemente una mayor capacidad de descarga) para

- Áreas con alta intensidad de descargas atmosféricas.
- Instalaciones importantes.
- Líneas y subestaciones donde el aterramiento o condiciones de protección son inadecuadas

6.5. Aplicación a selección de pararrayos 22.9 kV

A continuación se detalla la forma de cálculo del pararrayo para 22.9 kV, el cual trabajará a 4100 MSNM.

Cabe mencionar que el gran riesgo de todo equipamiento por sobretensiones viene a través de sobretensiones transitorias causadas por descargas atmosféricas y operaciones de maniobra propias del sistema. Por lo tanto, la selección del pararrayo debe considerar estas variables.

Variables consideradas en el cálculo:

Tensión del sistema	22.9 kV
Máxima Tensión fase-fase	24 kV
Sistema radial	
Transformador principal	60 kV / 22.9 kV
Lado de 22.9 kV	A tierra a través de resistencia de 24
Ohm	
Transformadores de llegada	23 kV / 7.2 kV
Lado de 22.9 kV llegada	Delta

Duración de fallas a tierra	3 segundos
BIL de equipo a proteger	170 kV

Cálculos justificativos:

Tensión del sistema	$U_r = 22.9 \text{ kV}$
Máxima Sobretensión	$U_m = 24 \text{ kV}$

Sobretensión temporal a tierra

Estas sobretensiones temporales ocurren principalmente durante fallas a tierra, también después de disminución de cargas. La amplitud y duración de esta sobretensión temporal es un factor crítico en la selección del pararrayo.

Como tiempo máximo de despeje de falla (para fallas a tierra), se asume un TOV para 3 segundos de duración como máximo, esto nos asegura que el pararrayo que se seleccione debe soportar esta sobretensión sin problemas durante este tiempo sin que sufra desgaste o daño prematuro. Tener en cuenta que el sistema es puesto a tierra a través de una resistencia.

Estimación de U_c

Si usamos un TOV para $t = 3$ segundos

Entonces

$$T_c = 1.55$$

De acuerdo a las curvas de la figura 6.13.

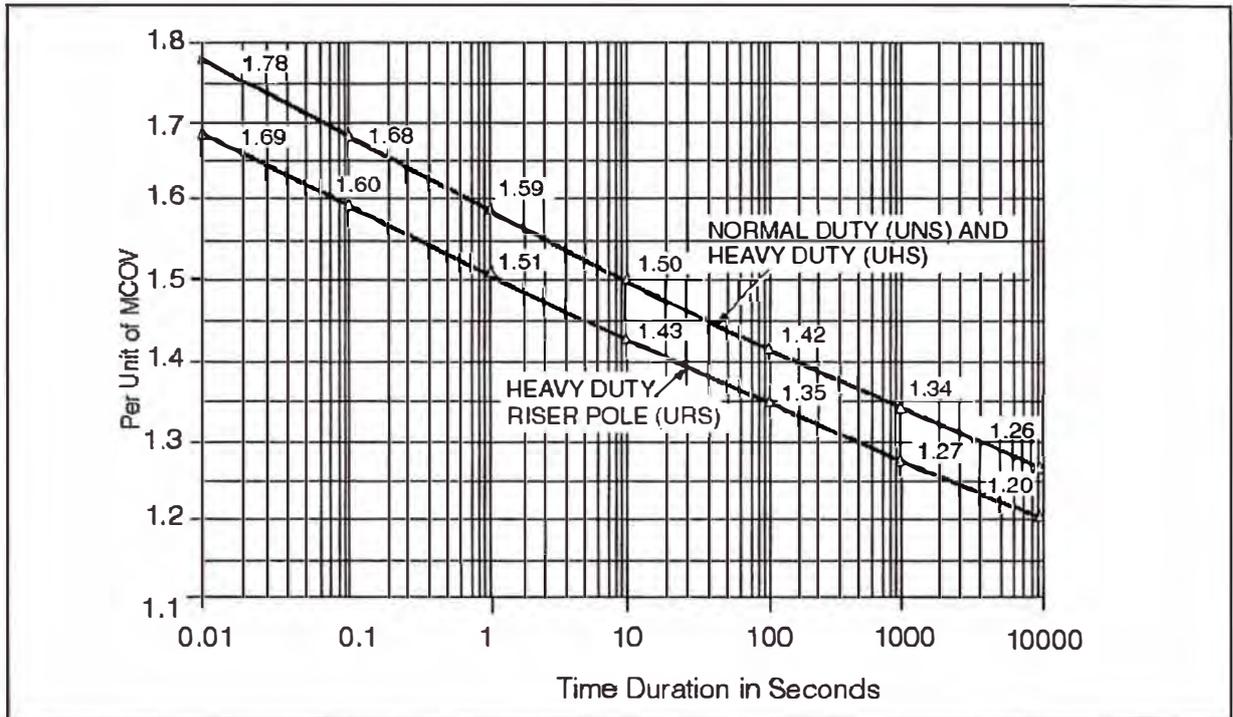


Figura 6.13. Curva de sobretensión temporal T_c (Por unidad de MCOV) vs. Tiempo de duración (Seg.) (Fabricante: Cooper Power Systems)

Usamos un factor K_e de 1.4 por tener resistencia de puesta a tierra según la tabla 6.7.

$$MCOV = \frac{U_{mx} K_e}{T_c x \sqrt{3}} \quad \dots(6.2)$$

$$MCOV = \frac{24 \times 1.4}{1.55 \times 1.732} = \frac{19.40}{1.55}$$

$$MCOV = 12.52 \text{ kV}$$

TABLA 6.7

Tipo de conexionado a malla de tierra	Factor a utilizar
Sistema directamente aterrizado	1.35 (Max.)
Sistema no efectivamente aterrizado	1.40
Sistema aterrizado por impedancia	1.70
Sistema con neutro flotante o alta impedancia	1.80

Por lo tanto la tensión nominal del pararrayo debería ser como mínimo de

$$U_r = 24 \text{ kV}$$

$$U_c = 19.5 \text{ kV}$$

Escogido el pararrayo con tensión nominal $U_r = 24 \text{ kV}$ cuyas características de protección se detallan en el ANEXO A, se procede a calcular las otras variables.

Cálculo de márgenes de protección

Considerando un BIL de equipo de 170 kV (Normado para 23 kV)

- Margen de protección por descargas atmosféricas:

Considerando un impulso de 10 kA; la tensión residual del pararrayo Ultrasil Heavy Duty UHS de $U_r = 24 \text{ kV}$ es de 72.8 kV

Considerando una longitud total de conexión de 3.0 metros, cable 2/0. El cual puede tener una tensión residual de 4-5 kV/m

Entonces

$$\text{M.P.} = [(170 - (72.8 + 3 \cdot 5)) / (72.8 + 3 \cdot 5)] = 93.6\%$$

Valor considerado muy aceptable

- Margen de protección por maniobra:

Tomando un impulso 500A por maniobra; la tensión residual del pararrayo Ultrasil Heavy Duty UHS $U_r = 24 \text{ kV}$ es de 55.5 kV

Asumiendo

$$\text{BSL} = 80\% \text{ BIL} = 136 \text{ kV}$$

$$\text{M.P.} = [(136 - (55.5 + 3 \cdot 5)) / (55.5 + 3 \cdot 5)] = 92.9\%$$

Valor considerado muy aceptable

6.6. Mantenimiento

Se recomienda efectuar cuidadosamente los siguientes trabajos de mantenimiento:

- Medición de corriente de fuga
- Medición de resistencia de aislamiento
- Inspección visual externa

6.7. Accesorios

Entre los accesorios especiales podemos destacar los siguientes:

- Contador de descargas
- Registro de corriente de descarga
- Dispositivo de medición de corriente de fuga

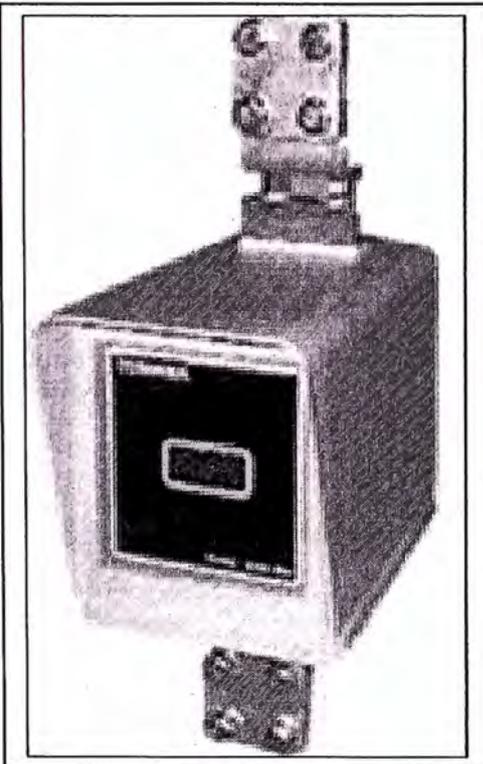
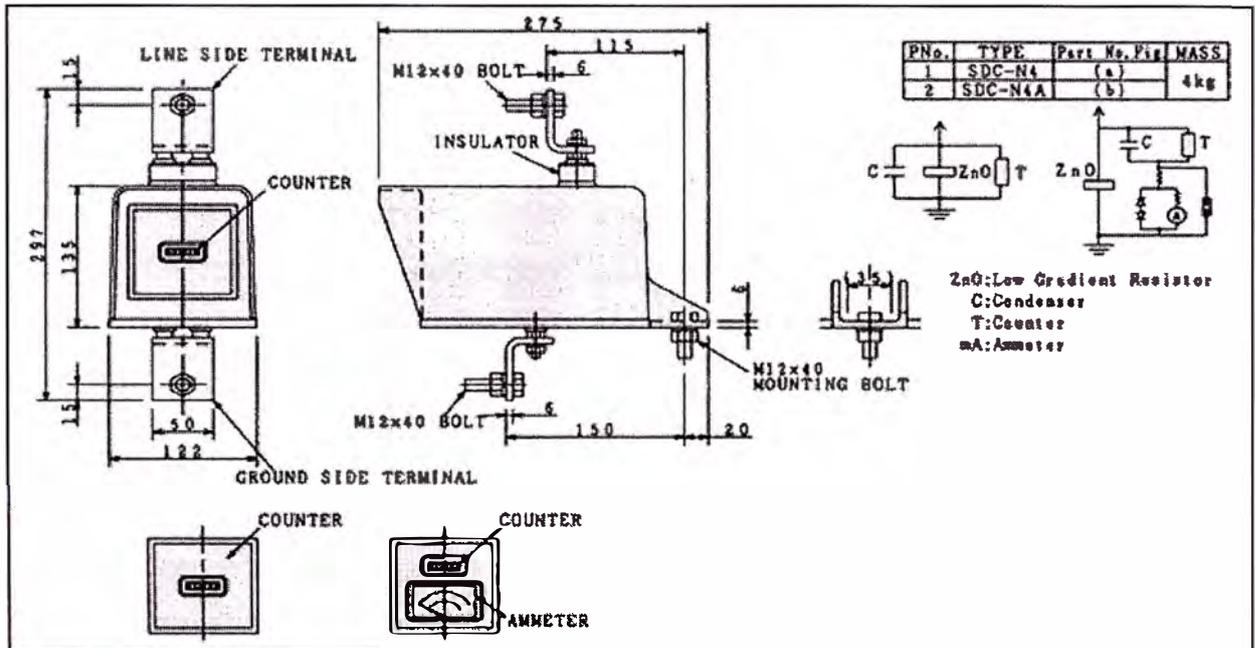


Figura 6.14. Diagrama de contador de descargas

CONCLUSIONES

1. Para una buena selección de pararrayos, es necesario evaluar correctamente las condiciones del sistema. Es decir, la impedancia y las condiciones de aterramiento.
2. La protección contra sobretensiones, no solo es cuestión de que pararrayo elegir. Para la protección contra sobretensiones por descargas atmosféricas cercanas es aún más importante instalar pararrayos de la manera más eficiente.
3. Los niveles de protección y las solicitaciones del aislamiento cambian dependiendo del frente de onda, duración y amplitud del impulso aplicado. El margen de protección ha de ser bastante importante, por lo tanto, especialmente si existen amplias distancias de separación o si la protección contra descargas atmosféricas cercanas es necesaria y solo un grupo de pararrayos se utiliza dentro de la subestación. Una mejor solución entonces puede ser instalar pararrayos también a la llegada de la línea o líneas.
4. ¿Por qué un alto margen de protección es requerido?. Los márgenes de protección calculados, son solo válidos si el pararrayo está directamente montado sobre el equipo a proteger. Cuando hay una distancia entre el pararrayo y el equipo a proteger, entonces el objeto protegido estará sometido a una mayor sobretensión.
5. Pese al predominio actual de los pararrayos de óxido metálico, cabe resaltar que presentan algunas desventajas frente a sus antecesores aunque los casos de destrucción son menos frecuentes debido a su alta capacidad de disipación de energía.
6. Es importante monitorear periódicamente en el caso de los pararrayos de óxido metálico la corriente de fuga, la misma que no debe superar los 2.8 mA.

ANEXO A



Certified Test Report

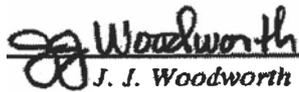
File Ret: Cat. Sec. 235-35

**UltraSIL™ Housed VariSTAR®
Normal Duty, Heavy Duty and Riser Pole
Distribution Arresters**

UltraSIL™ Housed VariSTAR®
Normal Duty, Heavy Duty and Riser Pole
Distribution Arresters

CERTIFICATION

*Statements made and data shown are, to the best of our knowledge and belief,
correct and within the usual limits of commercial testing practice.*


J. J. Woodworth
Engineering Manager


J. J. Kester
Chief Engineer
Advanced Arrester Development

INTRODUCTION

This test report certifies that the UltraSIL VariSTAR arresters were successfully tested to IEEE Standard C62.11-1993 "*IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating Current Power Circuits*",

TEST PROGRAM

OBJECT

To demonstrate that the UltraSIL VariSTAR Arrester meet all performance requirements.

PROCEDURE

The following design tests were performed on a sufficient number of samples to demonstrate all performance requirements are met.

DESIGN TESTS,

- A. Insulation Withstand.....Per IEEE C62.11-1993, Para. 8.1.1
- B. Discharge Voltage Current Characteristics Per IEEE C62.11-1993, Para. 8.3.1
- C. Discharge Voltage Time Characteristics Per IEEE C62.11-1993, Para. 8.3.2.1
- D. Accelerated Aging Procedure.....Per IEEE C62.11-1993, Para. 8.5
- E. High-Current, Short-Duration.....Per IEEE C62.11-1993, Para. 8.6.1
- F. Low-Current, Long-Duration.....Per IEEE C62.11-1993, Para. 8.6.2.2
- G. Duty Cycle.....Per IEEE C62.11-1993, Para. 8.7
- H. Internal Ionization and RIV.....Per IEEE C62.11-1993, Para. 8.8
- I. Fault Current WithstandPer IEEE C62.11-1993, Para. 8.10
- J. Disconnecter Test.....Per IEEE C62.11-1993, Para. 8.11
- K. Contamination TestPer IEEE C62.11-1993, Para. 8.12
- L. Temporary Overvoltage (TOV).....Per IEEE C62.11-1993, Para. 8.15
- M. Accelerated Aging Test of External Polymeric
 Insulating SystemsPer IEEE C62.11-1993, Para. 8.16
- N. Seal Integrity Per IEEE C62.11-1993, Para. 8.17

RESULTS

The UltraSIL VariSTAR arresters met all performance requirements.

TEST A
INSULATION WITHSTAND

OBJECT

To verify that assembled insulating members of the arrester withstand impulse and power frequency voltage tests in accordance with IEEE C62.11-1993, para. 8.1.1.

PROCEDURE

New clean arrester housings of several ratings including the longest and highest stressed designs were assembled over insulator cores. The samples were mounted in several configurations, including short and long insulating hangers with and without NEMA brackets and base mountings. Test samples were subjected to positive and negative 1.2 x 50 μ s voltage impulses which were larger than the minimums in C62.11-1993, Table 2a.

- These samples were also subjected to both wet and dry 60 Hertz withstand voltages higher than the minimums in C62.11-1993, Table 2a.
- A 60 Hertz voltage equal to 1,5 X MCOV was applied between the arrester ground terminal and the grounded NEMA bracket while the hanger bracket was wet for 10 seconds. This test was performed on all available hanger models.

RESULTS

None of the samples flashed over during any of the above tests in accordance with the insulation withstand requirements of IEEE C62.11-1993, Para. 8.1.1.

TEST B
DISCHARGE VOLTAGE CURRENT
CHARACTERISTICS

OBJECT

To determine maximum discharge voltage characteristics of the arrester at 1.5, 3, 5, 10, 20 and 40 kA crest in accordance with IEEE C62.11-1993, para. 8.3.1.

PROCEDURE

- Sample arresters were impulsed using an 8 x 20 μ s wave shape at 1.5, 3, 5, 10, 20 and 40 kA crest.
- The discharge voltage crest was measured.

RESULTS

Chart 1 shows the maximum discharge voltages for the normal duty arresters. Chart 2 shows the maximum discharge voltages for the heavy duty arresters. Chart 3 shows the maximum discharge voltages for the riser pole arresters.

TEST C
DISCHARGE VOLTAGE TIME
CHARACTERISTICS

OBJECT

To obtain the front-of-wave protective level of the arrester based on an impulse that results in a discharge voltage cresting in 0.5 μ s in accordance with IEEE C62.11-1993, Para. 8.3.2.

PROCEDURE

- A classifying current of 5 kA crest for normal duty and 10 kA for heavy duty and riser pole was used to determine the equivalent front-of-wave protective level.
- The arresters were impulsed using front times of 8 μ s, 2 μ s and 1 μ s.
- The maximum discharge voltage and the time to voltage crest were measured.
- The voltage/time measurements were plotted on linear voltage versus log time paper and the maximum at 0.5 μ s was determined and recorded.

RESULTS

Chart 1 shows front-of-wave protective levels for the normal duty arresters. Chart 2 shows front-of-wave protective levels for the heavy duty arresters. Chart 3 shows front-of-wave protective levels for the riser pole arresters.

TEST D
ACCELERATED AGING PROCEDURES

OBJECT

To verify K_C and K_R ratios of the arresters in accordance with IEEE C62.11-1993, Para. 8.5.

K_C = MCOV Ratio
 K_R = Duty Cycle Ratio

These ratios were determined to calculate the test values of MCOV and duty cycle voltages used during testing,

PROCEDURE

- MOV valve elements were placed in an oven at 115 °C and energized at MCOV for 1,000 hours.
- The watts loss was measured at the MCOV and duty cycle voltage levels within two to five hours after the start of the test.
- The watts loss was remeasured at 1,000 hours at MCOV and duty cycle voltage levels.

$$K_C = \frac{\text{WattsLoss @ 1,000Hrs @ MCOV}}{\text{WattsLoss @ 2 - 5Hrs @ MCOV}}$$

$$K_R = \frac{\text{WattsLoss @ 1,000Hrs @ RatedVoltage}}{\text{WattsLoss @ 2 - 5Hrs @ RatedVoltage}}$$

- If K_C and $K_R \leq 1$, then K_C and K_R are equal to 1.

RESULTS

- K_C and $K_R < 1$ for normal duty, heavy duty and riser pole arresters.

TEST E
HIGH-CURRENT, SHORT-DURATION

OBJECT

To demonstrate that arresters meet the high-current, short-duration requirements in accordance IEEE C62.11-1993, Para 8.6.1.

PROCEDURE

- Three 10 kV rated equivalent thermal sections, with isolators, were used for this test.
- Each sample was impulsed with a 65 kA (normal duty) or 100 kA (heavy duty and riser pole) crest current wave with a wave shape of $4 \times 10 \mu\text{s}$.
- The samples were allowed to cool to ambient temperature.
- Each sample was impulsed a second time.
- Immediately following the second impulse, the samples were energized at the thermal recovery voltage per C62.11, paragraph 7.2.2 ($\text{MCOV} \times K_w \times K_C$) for 30 minutes to verify thermal recovery.
The samples were inspected after testing to make sure that there was not any physical damage.

RESULTS

The arresters met the high-currents short-duration requirements of two impulses, thermal recovery, and no physical damage.

TEST F
LOW-CURRENT, LONG-DURATION

OBJECT

To demonstrate that arresters meet the low-current, long-duration requirements in accordance with IEEE C62.11-1993, Para. 8.6.2.2.

PROCEDURE

Three 10 kV rated equivalent thermal sections, with isolators were used for this test.

Each sample was impulsed with a 5 kA (normal duty) or 10 kA (heavy duty and riser pole) crest, $8 \times 20 \mu\text{s}$ wave and the discharge voltage measured.

Each sample was impulsed using a 75 amp (normal duty) or 250 amp (heavy duty and riser pole) by 2,000 μs square wave six times, once every 50 to 60 seconds. The samples were allowed to cool to room temperature. This procedure was repeated two more times. Immediately after the 18th shot, the samples were placed into an oven until they stabilized at 60°C .

The samples were removed from the oven and impulsed two more times. Immediately after the 20th shot, the samples were energized at the thermal recovery voltage per C62.11. paragraph 7.2.2 ($\text{MCOV} \times K_w \times K_C$) for 30 minutes minimum to verify thermal recovery.

Each sample was impulsed with a 5 kA (normal duty) or 10 kA (heavy duty and riser pole) crest $8 \times 20 \mu\text{s}$ wave and the discharge voltage measured. The discharge voltage was compared to the discharge voltage taken prior to the low-current, long-duration testing to make sure that it did not vary by more than $\pm 10\%$.

The samples were inspected after testing to assure that no physical damage occurred,

RESULTS

The arresters met the low-current, long-duration requirements of 20 impulses, thermal recovery, $<10\%$ change in discharge voltage, and no physical damage.

TEST G **DUTY CYCLE**

OBJECT

To demonstrate arresters meet the duty cycle requirements in accordance with IEEE C62.11-1993, Para. 8.7.

PROCEDURE

Three 10 kV prorated equivalent thermal sections, with isolators were used for this test.

Each sample was impulsed with a 5 kA (normal duty) or 10 kA (heavy duty and riser pole) crest, 8x20 μ s wave and the discharge voltage measured.

Each sample was energized at K_R times the duty cycle voltage ($K_R = 1$), for the duration of time needed to allow 20 impulses.

Each sample was impulsed with a 5 kA (normal duty) or 10 kA (heavy duty and riser pole) crest surge 8x20 μ s wave shape. The impulse occurred at approximately 60° before the crest on the power frequency wave.

Each sample was impulsed once every 50 to 60 seconds for 20 consecutive impulses.

After the 20th impulse, the samples were de-energized and placed into an oven until they stabilized at 60°C.

Each heavy duty or riser pole sample was removed from the oven and immediately energized at the thermal recovery voltage per C62.11, paragraph 7.2.2 ($MCOV \times K_W \times K_C$) and impulsed twice more at a 40 kA crest within one minute.

Each normal duty sample was removed from the oven and immediately energized at ($MCOV \times K_W \times K_C$) and impulsed twice more at a 5 kA crest within one minute.

Samples remained energized at the thermal recovery for 30 minutes minimum to verify thermal recovery.

Each sample was impulsed with a 5 kA (normal duty) or 10 kA (heavy duty or riser pole) crest 8x20 μ s wave and the discharge voltage measured. The discharge voltage was compared to the discharge voltage taken prior to duty cycle to make sure that it did not vary by more than $\pm 10\%$.

The samples were inspected after testing to assure that no physical damage occurred.

RESULTS

The arresters met the duty cycle test requirements of 22 impulses, thermal recovery, < 10% change in discharge voltage, and no physical damage.

TEST H **INTERNAL IONIZATION AND RIV**

OBJECT

To verify that arresters do not generate unacceptable levels of internal ionization current or REV noise in accordance with IEEE C62.11-1993, Para. 8.8.

PROCEDURE

A 1.05 x MCOV power frequency voltage was applied across the line and ground terminals of arresters with different voltage ratings.

RIV and ionization voltage measurements were taken at 1.0 MHertz.

RESULTS

All of the arresters had measured RIV and ionization voltages much lower than 10 μ V which was in accordance with IEEE C62.11-1993, Para. 8.8.

NOTE

All production arresters are 100% tested for RIV noise using a partial discharge tester ($P_d \leq 5pC$).

TEST I
FAULT CURRENT WITHSTAND

OBJECT

To verify that failed arresters are able to conduct fault current without violent disintegration in accordance with IEEE C62.11-1993, Para. 8.10.

PROCEDURE

- The tests were performed on extra creep normal duty, heavy duty and riser pole arresters - including hanger bracket and isolator-rated 36 kV.
- The arresters were pre-failed by shunting the MOV disks using a fuse wire and by thermally overloading the MOV disks using excessive power frequency voltage.
- The following test currents were applied to the arresters:

Fault Current Amplitude (kA rms)	Fault Current Duration (cycles)
0.8	120
2.5	60
5.0	30
10.0	10
20.0	10

RESULTS

All of the arresters withstood the fault current without ejecting any internal components in accordance with IEEE C62.11-1993, Para. 8.10.

TEST J
DISCONNECTOR TEST

OBJECT

To verify that the disconnector can withstand, without operation, the arrester design test and provide a current-time characteristic operating curve, in accordance with IEEE C62.11-1993, para. 8.11.

PROCEDURE

- The arrester samples in all the electrical tests, including the following tests, were performed with disconnectors attached:
 - 1—High Current, Short Duration (Test E)
 - 2—Low Current, Long Duration (Test F)
 - 3—Duty Cycle (Test G)
 - 4—Contamination Test (Test K)
 - 5—TOV (Test L)
 - 6—Seal Integrity Test (Test N)
- A disconnector time-current curve was established using five samples at current levels of 20, 80, 200 and 800 amps rms, as shown in Graph 2.

RESULTS

The performance of the arrester electrical tests did not cause any disconnectors to operate and the disconnector time-current curve was determined in accordance with IEEE C62.11-1993, Para. 8.11.

TEST K
CONTAMINATION TEST

OBJECT

To demonstrate the ability of the arresters to withstand the electrical stresses caused by contamination on the housing, in accordance with IEEE C62.11-1993, Para. 8.12.

PROCEDURE

- Normal duty, heavy duty and riser pole arrester samples were energized for a minimum of one hour at MCOV.
- The watts loss at MCOV was measured at the end of the hour.
- The samples were de-energized. Within 13 minutes, a 400-500 Ωcm slurry was applied to the housing heavily enough to form drops on the skirts.
- The samples were energized at the MCOV voltage.
- The watts loss was measured after 15 minutes.
- The samples were de-energized again and another slurry application was performed.
- The samples were energized at MCOV for 30 minute intervals and the watts loss was monitored to verify decreasing levels towards the original measurement.
- Once the samples were cleaned and dried, they were inspected for internal damage using partial discharge measurements at MCOV.

RESULTS

The arrester samples passed the test by having stabilized lower watts loss over time, by not flashing over and by not having any internal physical damage in accordance with IEEE C62.11 -1993. Para. 8.12.

TEST L
TEMPORARY OVERVOLTAGE (TOV)

OBJECT

To verify what levels of 60 cycle temporary overvoltage the arresters survive in accordance with IEEE C62.11-1993, Para. 8.15.

PROCEDURE

- Each sample was impulsed with a 5 kA (normal duty) or 10 kA (heavy duty and riser pole) crest, 8x20 μs wave and the discharge voltage measured.
- Samples were preheated to 60 °C.
- Each sample was removed from the oven and immediately energized at the overvoltage.
- The overvoltage was removed after the guaranteed duration.
- Within 1 mS, each sample was energized at the thermal recovery voltage per C62.11, paragraph 7.2.2 (MCOV x K_w x K_C) for 30 minutes. Sample current and temperature were monitored for thermal runaway.
- Each sample was impulsed with a 5 kA {normal duty) or 10 kA (heavy duty and riser pole) crest 8x20 μs wave and the discharge voltage measured. The discharge voltage was compared to the discharge voltage taken prior to the Temporary Overvoltage testing to make sure that it did not vary by more than ±10%.
- The samples were inspected after testing to assure that no physical damage occurred.
- Temporary overvoltage test points were plotted.

RESULTS

Graph 1 and Chart 4 show the performance results.

TEST M
ACCELERATED AGING TESTS
OF EXTERNAL POLYMERIC
INSULATING SYSTEMS

OBJECT

To demonstrate a high performance level of the external polymer insulating system of the arresters when exposed to accelerated light and electrical stress in accordance with IEEE C62.11-1993, Para. 8.16.

PROCEDURE

- The arrester housing and hanger bracket materials were subjected to UV testing per ASTM G53-1991 for over 1,000 hours without any cracking of the surfaces.
- The discharge voltage of four full arrester samples was measured using an 8 x 20 μ s impulse with a 5 kA (normal duty) or 10 kA (heavy duty and riser pole) crest.
- The hanger brackets of the samples were grounded at their mounting hole.
- The following test cycle was performed for 4,000 hours:
 - One minute dip into a 400-500 Ω cm slurry bath.
 - One minute drip rest period.
 - One minute energization at MCOV.
 - One minute pause.
- After 4,000 hours of cycling, the discharge voltage of the samples was measured using an 8 x 20 μ s impulse with a 5 kA (normal duty) or 10 kA (heavy duty and riser pole) crest.
- With the arrester samples effectively shorted, the maximum system voltage was applied across the hanger bracket for 20 hours using the above described cycle.

RESULTS

The samples passed by not having any evidence of flashovers or surface tracking and the arrester discharge voltage did not change more than $\pm 10\%$ from the initial value in accordance with IEEE C62.11-1993, Para. 8.16.

TEST N
SEAL INTEGRITY

OBJECT

To verify that the seal design of the UltraSIL arrester is robust in accordance with C62.11-1993, Para. 8.17.

PROCEDURE

- Three samples were subjected to all of the following tests.
- The RIV and watts loss was measured at the duty cycle rating.
- An AWG No.1 solid wire was installed on the top and bottom terminals and torqued to 20 ft lbs.
- The samples were temperature conditioned by heating them to 70°C for 14 days.
- Once the samples returned to ambient temperature, they were heated to 60 °C for one hour.
- The samples were then placed in a 4°C cold water bath for two hours.
- The 60° to 4°C cycle was repeated 10 times.
- Within 24 hours of the last cycle, the RIV and watts loss were measured at the duty cycle voltage to verify that the RIV did not increase more than 20 μ V and the watts loss did not increase more than 50% than the initial value.
- The samples were internally inspected to verify that there was no moisture present.

RESULTS

The arrester samples met the test requirements in accordance with IEEE C62.11-1993, Para. 8.17.

CHART 1 — ULTRASIL NORMAL DUTY VARISTAR ARRESTER DISCHARGE VOLTAGES

Duty Cycle Voltage Rating (kV)	MCOV (kV)	Equivalent Front-of-Wave (kV)*	Maximum Discharge Voltage (kV crest) 8/20 μ s Current Wave						Switch Surge (kV)**	
			1.5 kA	3 kA	5 kA	10 kA	20 kA	40 kA	@125A	@500A
3	2.55	11.0	9.0	9.7	10.4	11.4	13.0	15.1	7.9	8.5
6	5.1	22.0	18.0	19.4	20.8	22.7	26.0	30.2	15.7	16.9
9	7.65	31.7	26.0	28.0	30.0	32.8	37.4	43.5	22.7	24.4
10	8.4	33.0	27.0	29.1	31.2	34.1	38.9	45.3	23.6	25.4
12	10.2	41.5	33.9	36.6	39.2	42.9	48.9	56.9	29.6	31.9
15	12.7	51.8	42.4	45.7	49.0	53.6	61.1	71.1	37.0	39.9
18	15.3	62.2	50.9	54.9	58.8	64.3	73.4	85.3	44.4	47.9
21	17	66.0	54.0	58.2	62.4	68.2	77.9	90.6	47.2	50.8
24	19.5	77.0	63.0	67.9	72.8	79.6	90.8	106	55.0	59.3
27	22	87.2	71.4	76.9	82.4	90.1	103	120	62.3	67.1
30	24.4	97.1	79.5	85.7	91.8	100	115	133	69.4	74.7
33	27	108	87.8	95.1	102	112	127	148	77.1	83.1
36	29	116	95.3	103	110	120	137	160	83.1	89.6

* Based on a 5 kA current impulse that results in a discharge voltage cresting in 0.5 μ s.

** Based on a square wave with a 30/60 μ s rise time.

CHART 2 — ULTRASIL HEAVY DUTY VARISTAR ARRESTER DISCHARGE VOLTAGES

Duty Cycle Voltage Rating (kV)	MCOV (kV)	Equivalent Front-of Wave (kV)*	Maximum Discharge Voltage (kV crest) 8/20 μs Current Wave						Switch Surge (kV)**	
			1.5 kA	3 kA	5 kA	10 kA	20 kA	40 kA	@125A	@500A
3	2.55	11.5	8.6	9.1	9.5	10.4	11.5	13.0	7.4	7.9
6	5.1	23	17.2	18.2	19.1	20.8	23.0	25.9	14.8	15.9
9	7.65	33.1	24.8	26.3	27.5	30.0	33.2	37.4	21.4	22.9
10	8.4	34.4	25.8	27.4	28.6	31.2	34.5	38.9	22.2	23.8
12	10.2	43.3	32.4	34.4	35.9	39.2	43.3	48.8	27.9	29.9
15	12.7	54.1	40.4	43.0	44.9	49.0	54.2	61.0	34.9	37.4
18	15.3	64.9	48.5	51.6	53.9	58.8	65.0	73.2	41.9	44.8
21	17	68.9	51.5	54.7	57.2	62.4	69.0	77.7	44.4	47.6
24	19.5	80.3	60.1	63.9	66.7	72.8	80.5	90.7	51.9	55.5
27	22	90.9	68.0	72.3	75.5	82.4	91.1	103	58.7	62.8
30	24.4	101	75.8	80.5	84.1	91.8	101	114	65.4	70.0
33	27	113	84.2	89.5	93.5	102	113	127	72.4	77.8
36	29	121	90.8	96.5	101	110	122	137	78.4	83.9
39	31.5	132	99.1	105	110	120	133	149	85.5	91.5
42	34	143	107	114	119	130	144	162	92.6	99.1
45	36.5	154	116	123	128	140	155	174	99.7	107
48	39	166	124	132	137	150	165	187	107	114
54	42	179	134	142	148	162	179	202	115	124
60	48	201	150	160	167	182	201	227	130	139

* Based on a 10 kA current impulse that results in a discharge voltage cresting in 0.5 μs.

** Based on a square wave with a 30/60 μs rise time.

CHART 3 — ULTRASIL RISER POLE VARISTAR ARRESTER DISCHARGE VOLTAGES

Duty Cycle Voltage Rating (kV)	MCOV (kV)	Equivalent Front-of Wave (kV)*	Maximum Discharge Voltage (kV crest) 8/20 μ s Current Wave						30/60 Switch Surge (kV)**	
			1.5 kA	3 kA	5 kA	10 kA	20 kA	40 kA	@125A	@500A
3	2.55	10.3	7.7	8.2	8.6	9.4	10.3	11.7	6.7	7.1
6	5.1	20.7	15.5	16.4	17.2	18.7	20.7	23.3	13.3	14.3
9	7.65	29.8	22.3	23.7	24.7	27.0	29.8	33.6	19.2	20.6
10	8.4	31.0	23.2	24.6	25.7	28.1	31.0	35.0	20.0	21.4
12	10.2	39.1	29.2	31.1	32.4	35.4	39.1	44.1	25.2	27.0
15	12.7	48.7	36.4	38.7	40.4	44.1	48.8	54.9	31.4	33.6
18	15.3	58.4	43.7	46.4	48.5	52.9	58.5	65.9	37.7	40.4
21	17	62.0	46.4	49.3	51.5	56.2	62.1	70.0	40.0	42.8
24	19.5	72.3	54.1	57.5	60.0	65.5	72.4	81.6	46.7	50.0
27	22	81.4	60.9	64.7	67.6	73.8	81.6	91.9	52.6	56.3
30	24.4	91.0	68.1	72.4	75.6	82.5	91.2	103	58.8	62.9
33	27	100	75.0	79.7	83.3	90.9	100	113	64.7	69.3
36	29	108	80.6	85.6	89.4	97.6	106	122	69.5	74.4

* Based on a 10 kA current impulse that results in a discharge voltage cresting in 0.5 μ s.

** Based on a square wave with a 30/60 μ s rise time.

GRAPH 1

TOV Recovery Curve of Riser Pole VariSTAR Arresters

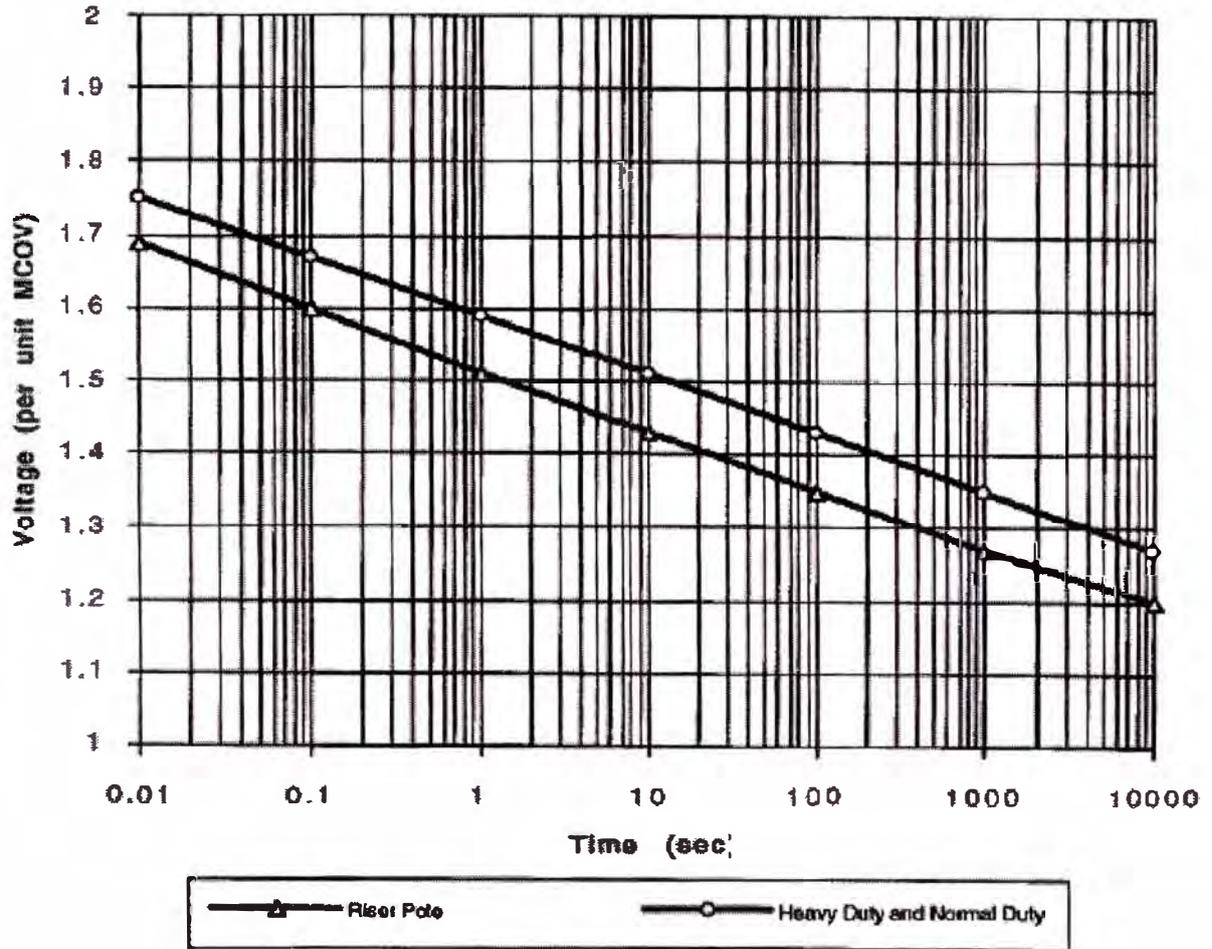
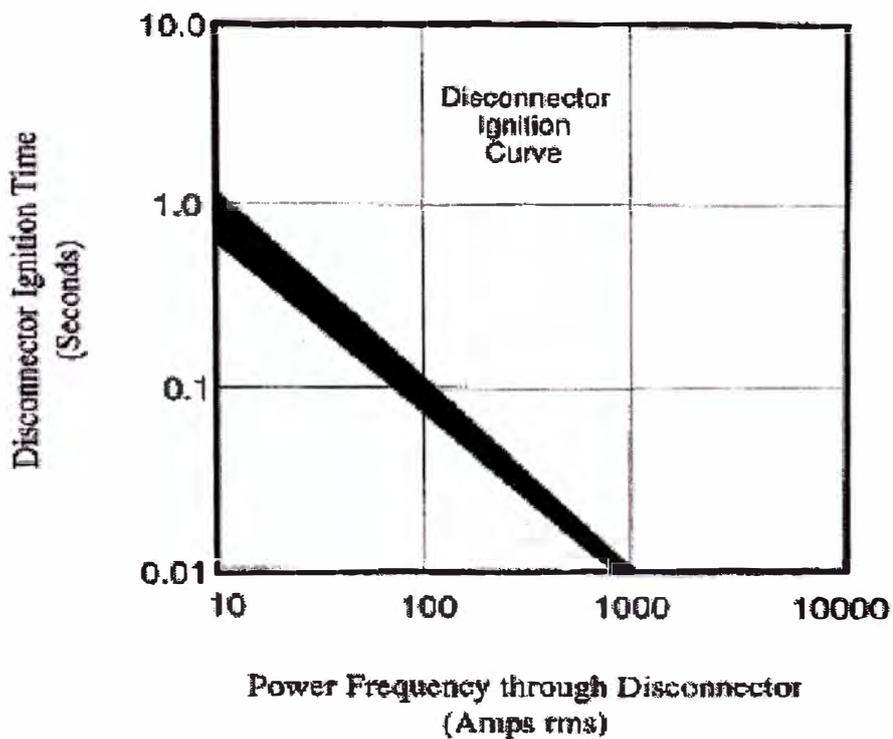


CHART 4 — TOV RECOVERY CAPABILITY OF THE VariSTAR ARRESTERS

Time, Seconds	Per Unit of MCOV	
	Normal Duty and Heavy Duty	Riser Pole
.02	1.756	1.665
.1	1.684	1.599
1	1.590	1.510
10	1.501	1.426
100	1.417	1.346
1000	1.338	1.271
10000	1.263	1.199

GRAPH 2**Distribution Arrester Disconnecter Time-Current Characteristic Plot**

BIBLIOGRAFÍA

1. Ing. Justo Yanque Montufar, “Alta Tensión y Técnicas de Pruebas de Laboratorio”, Universidad Nacional de Ingeniería – Perú, 2004.
2. International Electrotechnical Commission, Non-Linear Resistor Type Gapped Surge Arresters for A.C. Systems (IEC 99-1), 1999.
3. British Standards Institution, Specification for Surge Diverters for Alternating Current Power Circuits (BS.2914), 1986.
4. American National Standards Institute, Standard for Gapped Silicon-Carbide Surge Arresters for AC Power Circuits (ANSI C62.1), 1989.
5. National Electrical Manufacturers Association , Surge Arresters (NEMA LA.1), 1999.
6. ABB, Selection Guide for ABB HV Surge Arrester, Pub. SESWG/A 2300 E Edition 1, 1990.
7. ABB, ABB Surge Arrester – Buyer`s Guide, Edition 5, 2003.
8. Cooper Power Systems, UltraSIL™ Housed VariSTAR Normal Duty, Heavy Duty and Riser Pole Distribution Arresters, Certified Test Report Cat. Sec. 235-35, 1996.
9. Hubbell Power Systems, DynaVar Polymer Arrester Type IEC 99-4 Type Tests, Design Test Report EU1164-HR1, 1998.
10. Toshiba, Surge Arrester RVLQ Series, Catalog 5060-4, 2000.
11. Fabrica de Peças Elétricas Delmar Ltda, Pára-raios Modelo “NLZ-P” – 10 kA, Catalago Técnico, 2003.