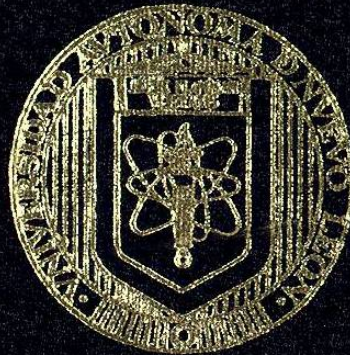


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



"PROTECCION DE EQUIPO SENSIBLE CONTRA SOBRETENSIONES"

QUE PRESENTA EL
ING. ADOLFO LOPEZ ESCAMILLA
TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE
LA INGENIERIA ELECTRICA CON ESPECIALIDAD
EN POTENCIA

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. DICIEMBRE DE 2001

TM
Z5853
.M2
FIME EF
2001
.L663

“PROTECCION DE EQUIPO SENSIBLE CONTRA SOBRETENSIONES”
M. L. E.



1020146954

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



"PROTECCION DE EQUIPO SENSIBLE CONTRA SOBRETENSIONES"

QUE PRESENTA EL
ING. ADOLFO LOPEZ ESCAMILLA
TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE
LA INGENIERIA ELECTRICA CON ESPECIALIDAD
EN POTENCIA

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. DICIEMBRE DE 2001

310013 .distua .

TH

Z5853

.M2

FIME

2001

.L663

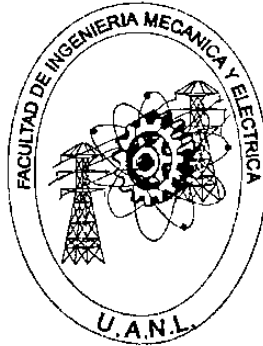


FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



"PROTECCIÓN DE EQUIPO SENSIBLE CONTRA SOBRETENSIONES"

QUE PRESENTA EL

ING. ADOLFO LÓPEZ ESCAMILLA

TESIS

**EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERIA ELECTRICA CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA**

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L. DICIEMBRE DE 2001



**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis **“PROTECCIÓN DE EQUIPO SENSIBLE CONTRA SOBRETENSIONES”** realizada por el **ING. ADOLFO LÓPEZ ESCAMILLA**, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con la especialidad en Potencia.

El Comité de Tesis



Asesor
M.C. Enrique López Guerrero



Coasesor
M.C. Felix González Estrada



Coasesor
M.C. Roberto Villarreal Garza



Vó.Bo.
M.C. Roberto Villarreal Garza
División de Estudios de Postgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, a Diciembre de 2001.

A MIS PADRES:

Que con su ejemplo de amor, lealtad, coraje y respeto, supieron darme la educación, los valores y la responsabilidad en el cumplimiento de nuestros compromisos, a ellos gracias, una palabra tal vez muy pequeña y fácil de decir, pero que encierra un inmenso significado para todos aquellos que como yo, hoy en día son padres.

Sr. Ruben López López (+)
Sra. Ma. del Socorro Escamilla de López

MI FAMILIA:

A mi esposa e hijos quienes me impulsaron para que no renunciara al proyecto de realizar esta tesis, que a parte de incrementar mi nivel de educación es una satisfacción personal que llena parte de mis expectativas de la vida.

Lic Dinorah Patricia Leal de López
Dinorah Andrea
German

MI ASESOR:

Que con su ayuda y experiencia ha sido posible desarrollar éste trabajo, como parte importante en el logro de algunas de mis metas personales, pero sobre todo con la demostración de amistad y cariño que siempre a prevalecido hacia un servidor y en particular a mis padres.

M. C. Enrique López Guerrero

P R O L O G O

Los sistemas de transmisión de energía eléctrica de corriente alterna, sobre todo de alta tensión, han evolucionado en los últimos años de una manera rápida, a pesar de que en sus inicios una gran cantidad de los parámetros que se involucran en el desarrollo de los mismos han sido de carácter empírico. Los primeros sistemas de transmisión se crean en Europa a niveles de los 100 kv y en tiempos modernos, podemos observar sistemas de 400, 800 y hasta 1200 kv, con tendencia a manejar voltajes superiores a este último.

Dado el carácter empírico de los trabajos realizados en alta tensión y extra alta tensión, se hace necesario la creación de laboratorios especializados donde puedan llevarse a cabo experimentos que normalmente resultan muy costosos, y esto a veces limita la posibilidad de que universidades como la nuestra se vean un tanto limitadas en la construcción de laboratorios de experimentación para estos niveles de tensiones.

Esto crea, sin duda, una dependencia de nuestra universidad a contar con los servicios que pueda proporcionar la Comisión Federal de Electricidad, o depender de información del extranjero, como los Estados Unidos de Norteamérica, o de Francia, o Venezuela para poder elaborar material que nos ayude a mantener actualizados nuestros conocimientos sobre estos temas.

Y uno de los problemas que se presentan en el desarrollo de los sistemas de transmisión de energía eléctrica en alta tensión y extra alta tensión es la generación de sobrevoltajes que tienden a producir problemas en estos sistemas, por lo que en este trabajo pretendemos exponer los principios fundamentales de este problemas, así como algunas formas de ayudar a resolverlos.

Esperando lograr este objetivo, me permito prologar este trabajo a todos los que con su experiencia y a través de sus escritos no permiten adquirir conocimiento del mismo.

Ing. Adolfo López Escamilla.

INDICE

	PAG.
SINTESIS	1
1. INTRODUCCIÓN.	3
1.1.Descripción del problema	3
1.2.Objetivo	3
1.3.Hipótesis	3
1.4.Limites del problema	4
1.5.Justificación	4
1.6.Metodología	4
1.7.Revisión bibliográfica	5
2. FUENTES DE SOBREVOLTAJES	6
2.1.Antecedentes	6
2.2.Estática	6
2.3.Contacto físico con un sistema de mayor voltaje	7
2.4.Efectos de resonancia en circuitos serie inductivo-capacitivo	7
2.5.Cortos circuitos intermitentes	8
2.6.Desconexión de cargas importantes	8
2.7.Interrupción a corriente cero forzado	9
2.8.Conexión de autotransformadores	9
2.9.Sobretensiones atmosféricas	10
3. PROTECCIÓN DE SISTEMAS DE POTENCIA DEBIDO A SOBREVOLTAJES CAUSADOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	11
3.1.Naturaleza del sobrevoltaje	11
3.1.1.La nube de tormenta	11
3.1.2.Teoría de Simpson	12
3.1.3.Teoría de Elster y Geitel	14
3.1.4.Teoría de Wilson	15
3.1.5.El gradiente eléctrico	16
3.1.6.La tormenta eléctrica	17
3.1.7.La descarga denominada rayo	18
3.1.8.El nivel isocerámico	22
3.1.9.Probabilidad de descarga atmosférica directa	23
3.1.10.La teoría de Schonland.	26
3.1.11.Efectos del rayo	28

3.2. Golpe directo e inducido	31
3.3. Forma de onda	33
3.4. Onda Viajera	38
3.5. Onda reflejada	42
3.6. Características del aislamiento	48
3.7. Nivel básico de impulso	48
4. EQUIPO DE PROTECCIÓN	52
4.1. Apartarrayos, conceptos básicos	52
5. PROTECCIÓN DE EQUIPO ELECTRÓNICO SENSITIVO	59
5.1. Conceptos básicos	59
5.2. Características de los componentes de protección	62
5.3. Métodos de acople de los sobrevoltajes en equipo electrónico sensitivo	70
5.3.1. Acoplamiento de espacio libre	70
5.3.2. Acoplamiento inductivo (magnético)(campo cercano)	70
5.3.3. Acoplamiento capacitivo (electrostático) (campo cercano)	71
5.3.4. Acoplamiento electromagnético (campo lejano)	72
5.3.5. Interacción con cables enterrados	72
5.3.6. Interacción con cables aéreos	73
5.4. Prácticas recomendadas de diseño para evitar daños por sobrevoltajes	73
5.5. Prácticas recomendadas para la instalación	74
5.5.1. Instalación de supresores	75
5.6. Tierra de equipo	78
5.7. Requisitos del código nacional eléctrico	80
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
6.1. Conclusiones	83
6.2. Recomendaciones	84
BIBLIOGRAFIA	85
LISTADO DE TABLAS	86
LISTADO DE FIGURAS	87
AUTOBIOGRAFÍA	88

SÍNTESIS

En el capítulo primero se presenta una breve introducción al tema, así como el planteamiento de los objetivos que se persiguen, y la metodología a emplearse en el tratamiento del problema.

En el capítulo (2) dedicado a las Fuentes de Sobrevoltajes se tratan las diferentes causas que generan los disturbios en los sistemas eléctricos, desde la generación de sobrevoltajes causados por la fricción del polvo en las líneas de transmisión, el contacto de sistemas de alto voltaje con sistemas de bajo voltaje, el efecto de resonancia en circuitos serie inductivos - capacitivo creados por el efecto capacitivo de las líneas de transmisión conectadas a transformadores en vacío o con poca carga. Los sobrevoltajes generados en casos de falla de corto circuito intermitente, así como la operación de conectar y desconectar cargas importantes. También se comentan los casos de la conexión de autotransformadores, pero se pondrá especial atención a los sobrevoltajes de origen atmosférico.

En el capítulo (3) dedicado a la Protección de Sistemas de Potencia Debido a Sobrevoltajes Causados por Descargas Atmosféricas, se comenta la naturaleza del sobrevoltaje, como se produce la descarga denominada rayo de acuerdo a las diferentes teorías como la de Simpson, analizando la gota de lluvia, la teoría de Elster Y Geitel muy similar a la de Simpson. La teoría de Wilson conocida como la de la ionización de la gota de lluvia. Se comenta sobre el gradiente eléctrico de la tierra. También se describe la tormenta eléctrica para la formación del rayo, el nivel de isodensidad o nivel isoceráunico, que define el número de tormentas eléctricas por día mes y año, como se calcula la probabilidad de una descarga. La teoría de Schonland de la formación del rayo, así como los efectos del mismo, los sobrevoltajes generados por el golpe directo del rayo o por el golpe inducido. Se define la forma de onda de sobrevoltaje generado por el rayo, la onda viajera y la onda reflejada, las características del aislamiento. El

nivel básico de impulsos (NBI), así como los valores de este para los diferentes equipos y para los diferentes valores de voltaje nominal de operación.

En el capítulo (4) llamados Equipos de Protección se definen los conceptos de los dispositivos denominados apartarrayos, sus fundamentos, forma de operación, su constitución. Las características de los apartarrayos, como se hace la selección de los mismos de acuerdo al voltaje de operación del sistema eléctrico que va proteger, así como su mejor localización.

En el capítulo (5) Protección del Equipo Electrónico Sensitivo, se dan los conceptos básicos al respecto, las características de los elementos de protección como son los dispositivos llamados pata de cabra (crow bar), las trampas de voltaje (clamps), así como los diodos avalancha y los varistores.

También se ofrecen las formas de conexión de estos dispositivos, así como unos comentarios respecto al modo de acoplamiento del sobrevoltaje al sistema de equipo electrónico sensitivo. Se hacen las recomendaciones prácticas para su instalación y las reglas a seguir para el aterrizamiento de estos equipos.

Por último en el capítulo (6) se ofrece un paquete de conclusiones y recomendaciones para un diseño adecuado de protección de un sistema eléctrico contra las sobretensiones, y se ofrece en un anexo características de los dispositivos de protección como los apartarrayos y los pararrayos.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

Los sistemas de transmisión, generación y distribución de energía eléctrica, así como los sistemas que consumen y controlan estos procesos, están íntimamente ligados al control, supervisión y monitoreo hecho con equipo altamente sensible a los cambios de voltaje que ocurren en los sistemas eléctricos.

Estas variaciones de voltaje tienen su origen en diversas causas las cuales pueden someter al equipo sensible a fallas irreparables que afectan al funcionamiento de todo el sistema.

1.2 OBJETIVO.

Este trabajo pretende ser una guía práctica para los ingenieros que incursionan en el diseño de la protección contra sobrevoltajes en los equipos sensibles.

Así mismo la protección de sistemas de distribución y de potencia.

1.3 HIPOTESIS

La correcta selección y aplicación de los sistemas de protección contra los sobrevoltajes asegura el buen funcionamiento de los sistemas de control, supervisión y monitoreo que realizan los equipos electrónicos sensibles.

1.4 LIMITES DEL PROBLEMA

Este trabajo esta dedicado a la industria productiva en general, pero no considera esta misma aplicación a la Comisión Federal de Electricidad, la industria ferroviaria, navegación aérea y marítima, naves espaciales y los sistemas de telefonía y televisión. Estas últimas se rigen bajo normas específicas.

1.5 JUSTIFICACIÓN

Este trabajo lo avala la inmensa cantidad de equipo electrónico sensible que se emplea en la industria, tanto de control, de computo, de supervisión, el cual debe ser adecuadamente protegido dado el costo del mismo, así como los daños secundarios que se pueden provocar cuando estos equipos fallan, producto de no haber resuelto este problema.

1.6 METODOLOGÍA

Se abordan primero las diferentes causas que generan sobrevoltajes en los sistemas de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica. Una de las principales causas de sobretensiones que se producen en los sistemas eléctricos es la descarga atmosférica, comúnmente denominada rayo, y por lo tanto se le prestará especial atención a este problema.

En seguida se abordarán los temas relacionados al diseño y selección, características de los dispositivos de protección, tanto para los sistemas de distribución como para los sistemas de potencia.

Por supuesto se le presta atención a la selección, diseño y características de los dispositivos de protección para los equipos electrónicos sensitivos.

1.7 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

Las recomendaciones prácticas que se ofrecen en este trabajo, están sustentadas básicamente en los papeles escritos por el Instituto de Ingenieros en Eléctrica y Electrónica (IEEE). Así como la experiencia practica del grupo de académicos del departamento de maquinas eléctricas de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la U.A.N.L.

CAPÍTULO 2.

FUENTES DE SOBREVOLTAJES

2.1 ANTECEDENTES

Los sobrevoltajes se originan por diferentes causas las cuales ocurren durante la operación normal del sistema por lo cual se requiere un medio de protección seguro para evitar daños a causa de una falla.

Un sobrevoltaje se define como un voltaje anormal entre dos puntos de un sistema, siendo este voltaje más grande que el mayor voltaje de los mismos dos puntos, bajo condiciones de servicio normal. Estos sobrevoltajes pueden ser del tipo de baja frecuencia, temporales y transitorios (alta frecuencia). La mayoría de los sobrevoltajes son transitorios durando unos cuantos ciclos en microsegundos, el rayo siendo un fenómeno impredecible ocasiona grandes esfuerzos mecánicos y eléctricos en los componentes del sistema.

En los siguientes apartados, se comentarán algunas de las diferentes causas que pueden generar sobrevoltajes en los sistemas de distribución y transmisión de energía eléctrica así como en los equipos sensibles.

2.2 ESTÁTICA

Altos voltajes pueden ser generados por el movimiento de partículas de polvo y arena friccionando conductores de alta tensión aéreos. Y en los sistemas industriales pueden ser provocados por movimientos de bandas no metálicas sobre rodillos.

2.3 CONTACTO FÍSICO CON UN SISTEMA DE MAYOR VOLTAJE.

La causa de este sobrevoltaje puede resultar del contacto accidental entre los devanados primario y secundario de una transformador industrial.

También por el contacto accidental entre dos líneas aéreas de diferente voltaje.

Ambas pueden ser causa de sobrevoltajes peligrosos sobre todo en sistemas no aterrizados y una efectiva protección pudiera ser la de conectar el circuito de menor tensión a un buen sistema de tierras a través de una conexión de impedancia baja capaz de aceptar la máxima corriente de falla a tierra del sistema de alto voltaje.

2.4 EFECTOS DE RESONANCIA EN CIRCUITOS SERIE INDUCTIVO-CAPACITIVO.

Tal vez el efecto que produce sobrevoltajes de importancia en los sistemas eléctricos de potencia (limitado a sistemas de C.A.) sea el denominado ferorrresonancia, el cual sin entrar mucho en detalles se define como: fenómeno oscilatorio creado por la capacitancia del sistema, en conjunto con la inductancia no-lineal de un elemento con núcleo ferromagnético.

Este puede ser un transformador de potencia, de medición, o un reactor de compensación.

Este fenómeno se observa por lo general en sistemas de alta tensión y casi nunca en sistemas de distribución de energía, ya que es precisamente la capacitancia de líneas muy largas la que induce la ferorrresonancia, siempre y cuando la inductancia del circuito asociado se encuentre en condiciones favorables para entrar en resonancia.

Un transformador en vacío u operando con poca carga, puede crear una de esas condiciones favorables. En sistemas con cables de energía la causa puede ser la

desproporción entre la gran capacitancia del cable y su resistencia óhmica, la primera de las cuales alimenta y sostiene entonces al fenómeno.

2.5 CORTOS CIRCUITOS INTERMITENTES

Este es un caso de generación de sobrevoltajes que pueden desarrollarse en sistemas industriales no-aterizados y son producto del chisporroteo o conexión de la vibración que causa un conductor eléctrico al hacer contacto intermitente con la tierra, o por la dispersión de partículas de metal conductor que establece un camino intermitente a tierra. En cualquier caso, si se establece una separación fija entre el conductor u la tierra, el incremento progresivo del rompimiento del voltaje entre separación, es un elemento esencial para la producción de sobrevoltajes.

En sistemas de bajo voltaje se pueden provocar sobretensiones de hasta cinco o seis veces el voltaje normal de operación. Estos sobrevoltajes en los sistemas de distribución pueden ser eliminados con un efectivo sistema de neutro aterizado.

2.6 DESCONEXIÓN DE CARGAS IMPORTANTES.

La operación específica de maniobra de interruptores de cargas importantes, fallas u otras causas, en un punto dado del sistema contribuyen un cambio brusco de los parámetros de los circuitos del sistema y pueden provocar sobrevoltajes que no excedan de 2 ó 3 veces el valor del voltaje normal y generalmente por corto tiempo. Una de las causas que provocan los sobrevoltajes más severos por switcheo es la apertura de un enlace entre dos sistemas o partes de un sistema, al salirse de sincronismos por alguna causa y el switcheo se produce cuando el voltaje de los dos sistemas se encuentra cerca de los 180 grados fuera de fase entre ambos. Otra fuente de sobrevoltaje de este tipo puede darse en los circuitos que alimentan hornos de arco eléctrico.

2.7 INTERRUPCIÓN A CORRIENTE CERO FORZADO

Los sobrevoltajes por maniobras (switcheos) son muy rápidamente interrumpidos solamente cuando la corriente normal pasa por el valor de cero. El término “corriente cero forzada” ó “interrupción fuera del valor cero de corriente” es usado para describir un mecanismo interruptivo (puede ser un fusible, interruptor, tramos de conductores de pequeño calibre) que tiene la propiedad de desarrollar contra-voltaje en oposición al flujo de corriente, lo suficientemente grande para poder forzar la caída del valor de dicha corriente a cero en un tiempo diferente al de la corriente cero normal, propia del circuito. Debido a los problemas de sobrevoltajes que puede presentarse, es que los interruptores en vacío tienen poca aplicación, pues estos aparatos tienden a cortar completamente la corriente al instante de abrir sus contactos, por lo cual deben contar con un supresor de voltaje. Los fusibles limitadores de corriente es un ejemplo típico de los mecanismos antes mencionados y debe tenerse cuidado con su uso pues no deberán usarse en un circuito con un fusible de este tipo de voltaje nominal mayor que el voltaje particular del circuito porque durante su operación se presentan voltajes peligrosos para el nivel de aislamiento del circuito en cuestión.

2.8 CONEXIÓN DE AUTOTRANSFORMADORES

Un banco de auto transformadores conectados en estrella que no cuente con un devanado conectado en delta en su construcción, presentará durante su operación problemas de sobrevoltajes peligrosos, debido a la forma no lineal de las curvas de magnetización del transformador, la corriente de magnetización requerida para producir el voltaje de forma senoidal a la frecuencia fundamental, presentará una gran cantidad de corrientes armónicas, predominando las corrientes de tercera armónica, por no contar con una fuente de corrientes de tercer armónica (devanado en delta) estas producen voltajes de tercera armónica, que pueden ser fuentes de sobrevoltajes.

2.9 SOBRETENSIONES ATMOSFÉRICAS

Los fenómenos atmosféricos, en especial la descarga denominada rayo, han sido desde los comienzos de nuestra civilización objeto de estudios y especial interés por parte de reyes, monjes y sabios de todas las épocas, quienes observan el infinito desde las terrazas de los templos y palacios.

La representación más antigua que se conoce del rayo data del año 2000 a.c., y se le atribuye a un paje de Bursin, rey de la ciudad de Isin en Mesopotamia. Ya para el año 700 a.c. se observa la representación del rayo en la cultura griega, y así sucesivamente, hasta nuestros días.

Desde un punto de vista más técnico, el rayo adquiere gran importancia cuando Benjamin Franklin, en el mes de junio de 1752, pone de manifiesto la electricidad en las nubes al hacer saltar chispas de su célebre cometa. Otros hechos, como la destrucción de edificaciones y embarcaciones causadas por el rayo, entre las cuales resalta el barco de guerra inglés Rodney el 6 de Diciembre de 1838, y la muerte de muchas personas, entre ellas el profesor Richman, de la Academia Real de San Petersburgo, quien muere fulminado por un rayo experimentando con la electricidad de las nubes el 6 de Agosto de 1753, motivaron a prestarle una atención cada vez mayor a tan interesante fenómeno.

Sin embargo, el estudio sistemático del rayo y sus efectos se inicia en el año de 1924 en Suecia, debido en primer lugar a que el rayo comienza a perturbar las líneas de transmisión de la época. Casualmente en esa misma fecha empieza la aplicación práctica de una de las herramientas más valiosas en su observación y medición, como lo es el osciloscopio de rayos catódicos.

Desde entonces la alta tensión dispensa especial cuidado al estudio de todos los fenómenos eléctricos que en una u otra forma afectan a los sistemas de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica.

En el siguiente capítulo comentaremos algunas teorías acerca de cómo se forma este fenómeno así como los efectos del mismo en los sistemas eléctricos.

CAPÍTULO 3.

PROTECCIÓN DE SISTEMAS DE POTENCIA DEBIDO A SOBREVOLTAJES CAUSADOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

3.1 NATURALEZA DEL SOBREVOLTAJE.

Antes de entrar en detalles acerca de los efectos del rayo es preciso saber más sobre la naturaleza y origen del mismo. En los siguientes párrafos se exponen, por consiguiente, las teorías más acertadas sobre el fenómeno en referencia. Sin embargo, antes conviene resaltar algunos aspectos de interés puestos en común de manifiesto por casi todos los postulados.

3.1.1 LA NUBE DE TORMENTA

La nube de tormenta denota una constitución bipolar, en la cual la carga negativa se encuentra especialmente por debajo de la carga positiva. Acerca de la forma en que se lleva a cabo tal distribución de cargas en la nube, no existe coincidencia de opiniones. Numerosos experimentos con globos sonda han verificado, no obstante dicha distribución. La mayor parte de estos, a nivel mundial, fueron conducidos en la década de los años 30 por institutos de física estadounidenses. La configuración simplificada de una nube de tormenta se ilustra en la figura 3.1.1.

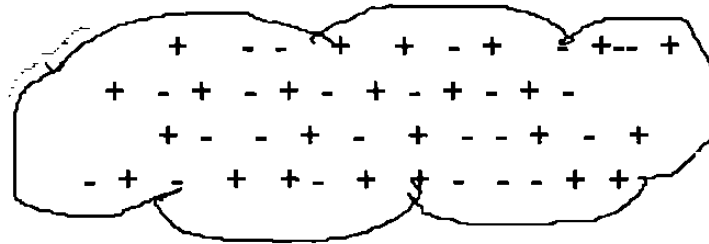


FIG. 3.1.1 Configuración típica de una nube de tormenta.

3.1.2 TEORIA DE SIMPSON.

Esta teoría es de amplia aceptación práctica, pues se fundamenta en experimentos llevados a cabo en laboratorios.

Cuando se desintegran gotas de lluvia por la acción de una fuerte corriente de aire, las partículas así formadas denotan una carga positiva, y el aire, a su vez, acusa la presencia de una gran cantidad de cargas negativas de muy poca masa, y por consiguiente, gran movilidad.

En la naturaleza sucede esto cuando la corriente de aire alcanza la velocidad suficiente para desintegrar las gotas de lluvia. La corriente de aire transporta los iones negativos hacia la parte superior de la nube, donde se combinan con las partículas de agua. Las gotas positivas que han sufrido un fraccionamiento también son llevadas hacia arriba por la acción del viento, y cuando este cesa a determinadas alturas, se unen entre ellas para formar así gotas grandes y caer de nuevo. Al llegar a la zona de vientos fuertes se desintegran otra vez, aumentando así la carga positiva.

La figura 3.1.2 muestra la distribución de cargas en la nube según Simpson, la cual ha podido ser constatada en la práctica con la ayuda de globos sonda. Es interesante apreciar que mientras la parte inferior de la nube denota una temperatura promedio de 4° C, la parte superior alcanza valores de hasta -32° C. Estos gradientes térmicos desempeñan como se verá posteriormente, un papel muy importante al formarse la descarga, ya que favorecen a esta con orientación terrestre.

La teoría de Simpson tiene gran ventaja a su favor, ya que puede ser simulada en los laboratorios: gotas de aproximadamente 5mm de diámetro se desintegran cuando el viento alcanza velocidades superiores a los 8 m/s, obteniéndose una distribución de cargas parecidas a la establecida por Simpson.

En la zona donde el viento no alcance esta velocidad crítica no se podrá formar la distribución especial de las cargas señaladas arriba, dificultándose así la precipitación.

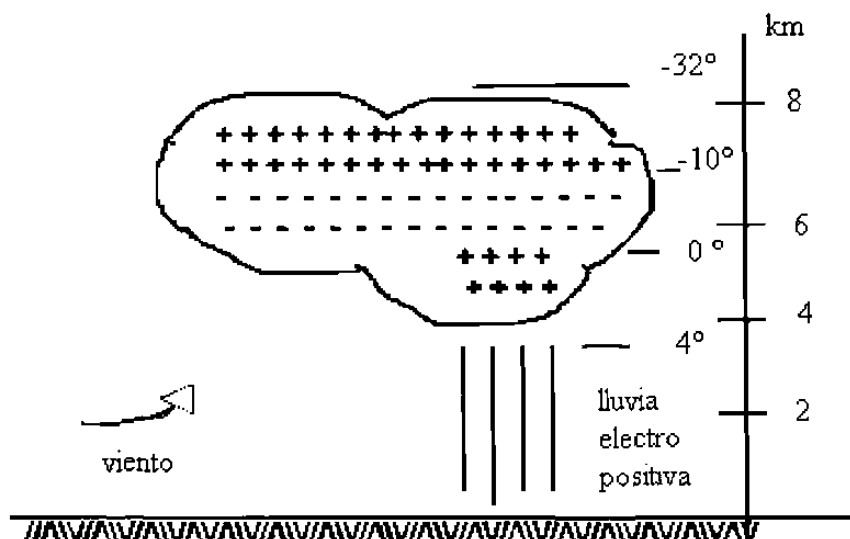


FIG. 3.1.2 Distribución de cargas en la nube según Simpson.

Según Simpson, las primeras gotas de lluvia de tormenta denotan comportamiento electropositivo, según se puede verificar en los pluviómetros. Estas proceden, del foco de la tormenta señalado en la fig. 3.1.2, las gotas siguientes denotan ya un carácter

electronegativo y solo en estados avanzados de la tormenta es cuando vuelven a observarse gotas electropositivas. Se supone que estas provienen entonces de los estratos superiores de la nube.

3.1.3 TEORIA DE ELSTER Y GEITEL

Esta teoría se conoce con el nombre de teoría de la influencia eléctrica. En la nube se encuentran gotas de diferentes tamaños las más grandes se precipitan y las más pequeñas son llevadas por el viento hacia arriba.

Las gotas polarizan por la acción del campo eléctrico existente, el cual, como se verá a continuación, denota una dirección terrestre.

Este conduce a la formación de cargas positivas en la parte inferior de la gota y cargas negativas en la parte superior de la misma.

El roce de una gota con una pequeña, al caer, trae como consecuencia un intercambio de cargas. En la gota pequeña predomina entonces la carga positiva y en la grande la negativa. Ambas gotas se desplazan en sentido opuesto. En la nube, por consiguiente, se acumulan poco a poco cargas positivas en la parte superior y cargas negativas en la parte inferior. En campo eléctrico que así se forma favorece la separación de cargas por influencia.

En la figura 3.1.3 se ilustra el pensamiento de Elster y Geitel. La formación de la nube se parece a lo establecido en la teoría anterior, no así la distribución y la separación de cargas, ya que el roce entre las gotas desempeña un papel determinante.

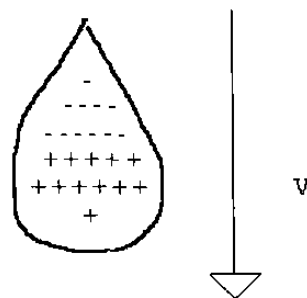


FIG. 3.1.3 Gota de lluvia según Elster y Geitel.

Informaciones recientes le restan importancia a esta teoría ya que el roce entre gotas parece ser importante sólo en la formación de la lluvia y no en la distribución especial de las cargas eléctricas.

3.1.4 TEORÍA DE WILSON.

Conocida también como la ionización de la gota de lluvia, esta teoría asume, al igual que la de Elster y Geitel, una gran influencia del campo eléctrico en la formación de la gota. Wilson reemplaza a la acción de la gota pequeña de la teoría anterior por la acción de los iones, simplificándose así el fenómeno de intercambio de cargas entre las gotas.

En la gota que cae se separan las cargas eléctricas por la acción del campo eléctrico de por sí existentes. La parte superior de la gota acusa entonces carga negativa y la inferior carga positiva.

El viento, a su vez, arrastra los iones hacia la nube, donde los negativos son atraídos por la carga positiva de la parte inferior de la gota.

Los iones positivos son repelidos al mismo tiempo y transportados por el aire hacia la parte superior de la nube, escapando así a la atracción de la mitad superior de la gota, la cual continúa su caída, por consiguiente, sólo con carga negativa. La nube denota entonces una carga positiva en su mitad superior y una negativa en la inferior.

Esta teoría tropieza con algunas dificultades que se derivan de observaciones prácticas. Así, por ejemplo, el tiempo medio de formación de una carga eléctrica de $1\text{Cb}/\text{km}^3$, por la acción de un gradiente eléctrico de $1\text{ kv}/\text{cm}$, asciende a 170 min. Para la formación de la tormenta atmosférica esta carga resulta ser muy pequeña y con un tiempo de formación muy largo. Esto le resta importancia a la teoría de Wilson, aunque la misma contribuye a explicar la distribución de cargas eléctricas en la nube.

Existen otras teorías de la formación de la nube de tormenta, entre las cuales resaltan la de R.Gunn (teoría de condensación), Workman y Reynolds, y otros. En vista de que estas no han adquirido importancia práctica, como las anteriores, solo se les menciona sin entrar en detalles.

3.1.5 EL GRADIENTE ELÉCTRICO.

El valor promedio del gradiente eléctrico, en la proximidad de la tierra oscila alrededor de los 5 v/m, para incrementarse vertiginosamente en la proximidad de las líneas de transmisión a 5 kv/m y bajo focos de tormenta de 15 y más kv/cm.

Sobre la dirección del gradiente eléctrico puede abundarse; conviene sin embargo, aclarar lo siguiente: la tierra viene siendo el electrodo negativo de un gran campo eléctrico cuyo electrodo positivo en una carga concéntrica situada a unos 120 km de distancia (capa de Heaviside-Kennely). A unos 250 km de distancia se encuentra otra capa, mas fuertemente ionizada con polaridad positiva que la anterior (capa de Appleton). Ambas capas le confieren al gradiente eléctrico una dirección terrestre. Figura 3.1.5.

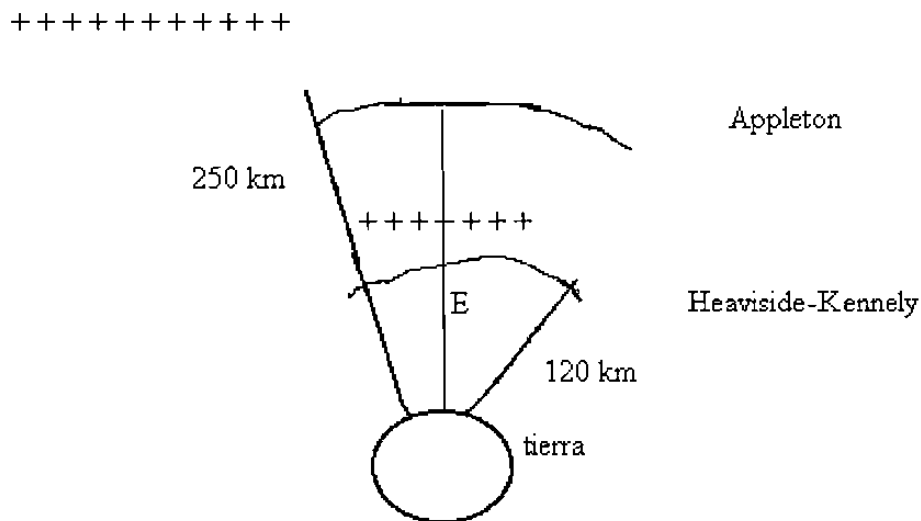


FIG. 3.1.5 Orientación del gradiente eléctrico terrestre.

Si se mide el gradiente eléctrico en la superficie de la tierra se observa que este cambia de dirección al aproximarse una nube de tormenta, para volver a su polaridad o dirección original bajo el foco de tormenta, ya que esta denotada fuerte polaridad positiva. Este comportamiento ha sido verificado por varios autores con la ayuda de un osciloscopio de rayos catódicos.

La magnitud del gradiente eléctrico ha adquirido recientemente suma importancia debido, más que todo, a la transmisión de energía a muy altas tensiones (800 y más kv). En la proximidad de los conductores que conforman estas líneas de transmisión se ha llegado a medir hasta 15 kv/m sobre el nivel del suelo. En vista de que mucho se ha especulado de los posibles efectos dañinos del gradiente eléctrico (a partir de 5 kv/m) en seres vivientes, se ha considerado seriamente la formulación de una norma al respecto, con miras a limitar el valor máximo en función de los posibles tiempos de exposición por parte de seres vivientes.

Volviendo a la nube de tormenta, el gradiente eléctrico alcanza valores de 1 kv/cm en el seno de la nube, para luego subir a 5 kv/cm antes de que se inicie la descarga atmosférica.

Luego se recupera, primero rápida y después lentamente, en la misma forma que se restablece la carga eléctrica en la nube, cuya concentración tanto positiva como negativa, denota una altura promedio de 2.5 a 4.5 km.

3.1.6 LA TORMENTA ELÉCTRICA.

Todas las teorías sobre este particular parecen coincidir en que la descarga atmosférica procede de la concentración de cargas negativas, cuando la parte superior de la nube llega a la línea isoterma correspondiente a los -30° c, acusando en la parte inferior de la misma temperaturas encima de los 0° c (aprimadamente $+4^{\circ}$ c). Esta afirmación se ve verificada en la práctica por un sencillo pero relevante hecho: las primeras descargas eléctricas hacia la tierra denotan comportamiento electronegativo.

En estas circunstancias se puede resumir al ciclo de una tormenta eléctrica de la siguiente manera:

1. Durante el crecimiento de la nube se observa la presencia de fuertes vientos ascendentes. Esto sucede aproximadamente de 10 a 15 minutos antes de la formación de las primeras gotas de agua.

2. Una vez constituida la nube se observan vientos descendentes, en especial en su parte inferior, así como descargas atmosféricas y precipitación. Esta fase intermedia dura de 15 a 30 minutos.

3. Durante el desmoronamiento de la nube, con un tiempo de duración aproximado de 30 minutos, se observan leves vientos descendentes a través de todo el volumen ocupado por la nube, al igual que una ligera atenuación de las descargas atmosféricas y de la precipitación.

El tiempo total de duración de una nube de tormenta es, por, consiguiente, de una hora pudiéndose extender temporalmente al formarse nuevos focos de tormenta.

3.1.7 LA DESCARGA DENOMINADA RAYO.

El punto de partida de una nube de tormenta cuyas cargas eléctricas se encuentran distribuidas, pero no en forma homogénea, de acuerdo con lo expuesto anteriormente, entre las concentraciones de cargas desiguales de la nube, principalmente en las de la zona inferior, comienzan a ocurrir pequeñas descargas eléctricas. Esto sucede una vez que el gradiente eléctrico alcanza valores superiores a 5 kv/cm. Así y como consecuencia de la ionización por choque, se va formando una gran cantidad de cargas eléctricas, las cuales disminuyen apreciablemente la rigidez dieléctrica de la zona afectada.

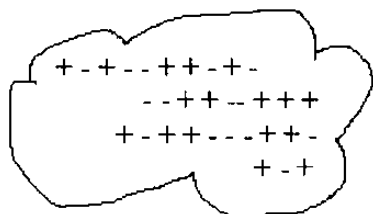


FIG 3.1.7.1 Nube de tormenta
con distribución irregular
de las cargas eléctricas.

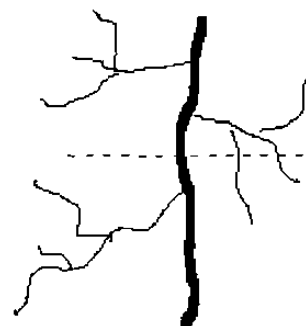


FIG 3.1.7.2 Crecimiento tortuoso
de la descarga piloto

Estas cargas eléctricas comienzan entonces a crecer en forma de avalancha, formando una especie de cono llamado descarga piloto (pilot streamer), el cual, por la acción de gotas de agua y corriente eléctrica, crece en ambas direcciones (fig 3.1.7.2) la intensidad de corriente que acompaña a la descarga piloto es tal leve (solo algunos amperios) que no la puede registrar una cámara fotográfica.

La velocidad de propagación de esta descarga, no obstante, si es considerable (1/20 de la velocidad de propagación de la luz, 15000 km/seg), con un recorrido o existencia promedio de solo 50 m.

La tortuosa trayectoria de dichas descargas le confiere al rayo su aspecto característico.

Una vez que la descarga piloto llega a la tierra, cuyos pormenores se expondrán más adelante, queda trazado en el espacio interelectrónico (nube-tierra) un canal o sendero plasmático, donde el aire ha sido fuertemente ionizado y por el cual pasarán las descargas sucesivas (return, streamer, dart leader). En el breve tiempo que estas fugan se

produce un súbito calentamiento del aire, y se supone que el trueno se debe a la brusca dilatación que este calentamiento trae consigo. Al mismo tiempo se producen fenómenos de luminiscencia (relámpagos), como los que se observan en el seno de los gases enrarecidos, atribuidos a la explosión de un compuesto muy inestable –la materia cerámica o fulminante- de los elementos de la atmósfera. Cuando el estrépito de trueno es perceptible, se puede calcular fácilmente la distancia a la que ocurrió la descarga: omitiendo la velocidad del sonido (332 m/seg), en comparación con la de la luz, se obtiene la relación de 1 km por cada 3 seg. de retraso, entre la percepción del fenómeno óptico y la del acústico, más sensible de noche que de día. Así mismo, cuando la descarga en forma de canal (pilot streamer) se va acercando a la tierra, aumenta considerablemente el gradiente eléctrico, favoreciendo la formación de un canal de recepción.

Este, partiendo de la superficie de la tierra, crece en sentido opuesto. Cuando ambos se encuentran comienza a fluir la intensidad de corriente de descarga. Este fenómeno se trata detalladamente mas adelante, en la teoría de Schonland.

Este último detalle se ha podido verificar en la práctica con cámaras ultrarrápidas, entre ellas la cámara de Boys. En las placas se pueden observar una solución de continuidad del canal plasmático en intervalos de 30 a 90 seg. se cree que esto obedece a ionizaciones por choque, las cuales van preparando la próxima descarga, mientras que las ramificaciones (stepped leader) se atribuyen a la acción del viento. Estas no siempre llegan al electrodo opuesto ya que la intermitencia en forma de canal les quita toda la energía. Los rayos globulares pueden ser el resultado de estas descargas inconclusas aureales.

Preparado ya el camino o canal de la descarga se produce la descarga principal: gran cantidad de cargas eléctricas negativas abandonan la nube. Inmediatamente, y con el fin de neutralizar la carga eléctrica en esta, una gran cantidad de cargas positivas abandonan la tierra (return streamer). En la mayoría de los casos el choque de estas cargas es tan fuerte que, como consecuencia del excedente de cargas, en la nube se produce una segunda descarga hacia la tierra a través del mismo canal (dart leader) y así sucesivamente. La velocidad de propagación de estas últimas es mas lenta (3 % de la velocidad de la luz). El número de ellas puede llegar en algunos casos hasta 54.

La estadística arroja los siguientes valores para el rayo, los cuales deben ser considerados por el ingeniero de potencia:

1. El 50 % de todos los rayos consta de dos descargas, y el 10 % aproximadamente de siete descargas sucesivas.
2. Del 60 % al 95 % de los rayos que caen en la tierra son electronegativos, lo que hace suponer que el rayo proviene de la parte inferior de la nube. Solo cuando la tormenta se encuentra en un estado mas avanzado se registran rayos con cargas positivas, lo que hace suponer que provienen de la parte superior de la nube.
3. La duración promedio de un rayo, con sus descargas, es de 0.15 seg., la duración máxima no excede de 1.5 seg.
4. Se supone que en la tierra caen aproximadamente 100 rayos por segundo. Esto ha movido a algunos científicos a tratar de hacer uso, con fines experimentales, de su contenido energético.

Para efectos de protección en los sistemas de transmisión de energía es conveniente saber lo siguiente:

5. El 50 % de las descargas atmosféricas acusa una intensidad de corriente inferior a los 20 kA.
6. Sin embargo, el 5 % de los rayos que caen en la tierra acusa intensidades de corriente hasta 160 kA, habiéndose registrado descargas de hasta 400 k A. Estos valores conllevan al peligro de descarga retroactiva.
7. La energía de un rayo es, por consiguiente, aproximadamente de 10 a 100 kWh, pero con una potencia destructiva de 10 a 10 kW. La longitud que puede

alcanzar una chispa eléctrica con dicha energía llega a los 20 km, siendo la de 10 o 12 km la mas frecuente.

3.1.8 EL NIVEL ISOCERÁUNICO.

Cuando se diseñan líneas de transmisión de energía eléctrica es conveniente saber hasta que punto estas se encontrarán expuestas a los daños de las descargas atmosféricas, en particular si las líneas denotan tensiones nominales de operación inferiores a 300 kV. De allí que la frecuencia local de las mismas sea de interés para el técnico de alta tensión. Para tal efecto se utiliza el concepto de nivel isoceráunico, el cual indica el número de días por mes y año en que se puede oír truenos en un área de 10 km de radio, cuyo centro viene siendo el sitio en cuestión.

Esta observación o registro del fenómeno se venía haciendo visualmente, lo cual en realidad resultaba ser una apreciación muy subjetiva. El nivel que se obtiene, además, al medir o cuantificar a los truenos es el isobróntico.

Afortunadamente la universidad técnica de Darmstadt, en Alemania Occidental, desarrolló un instrumento para el registro automático de los rayos, el cual fue muy pronto aceptado por el CIGRE; hoy en día se conoce por consiguiente, como CIGRE COUNTER. Este instrumento, con la del gradiente eléctrico superior a 5 V/m en un área aproximada de 500 km². El establecimiento de un tiempo muerto de 1 seg. impide, inclusive, que un rayo de larga duración sea contando el doble. El instrumento de CIGRE indica la densidad de rayos por año y km², operando a 10 kHz y 500 Hz en dos unidades diferentes. A partir de los años 80 este instrumento se ha visto en parte desplazado por instrumentos altamente sofisticados, basándose en radares muy sensibles con soporte de computadoras y graficadores, los cuales indican la ubicación y avance de la tormenta en un radio de hasta 400 km.

No obstante, la mayoría de los países han levantado mapas isoceráunicos con la ayuda de los contadores del CIGRE citados anteriormente. En vista de la importancia que revisten estos contadores, es prudente resaltar sus ventajas:

Contador de 10 kHz: Este instrumento se recomienda para la medición de altas densidades de descargas atmosféricas ($> 5/\text{km}^2$), como las que suelen presentarse en

zonas tropicales y subtropicales. Tiene la ventaja, además de poder diferenciar las descargas atmosféricas que inciden directamente sobre la tierra, de aquellas que ocurren dentro de la misma nube o entre nube y nube.

Es de señalar que a los efectos de las líneas de transmisión interesan fundamentalmente las descargas que caen sobre la tierra.

Contador de 500 Hz: Este es el más sensible de todos los contadores y su aplicación se recomienda en áreas de baja actividad cerámica ($< 2/\text{km}^2$), o también se quiera detectar prematuramente la aproximación de nubes de tormenta.

3.1.9 PROBABILIDAD DE DESCARGA ATMOSFÉRICA DIRECTA.

Muy importante en la práctica es la determinación del parámetro N_e , el cual estipula el número de rayos por día de tormenta para un sitio determinado en función de la distancia al ecuador:

$$\text{Ec. 3.1.9} \quad N_e = (0.1 + 0.35 \sin \lambda) (0.4 \pm 0.20)$$

N_e indica el número de rayos por día de tormenta y por km^2 y λ es la latitud geográfica.

De la expresión 3.1.9 se puede deducir, en forma aproximada, el riesgo que tiene una estructura cualquiera de ser alcanzada por una descarga atmosférica. El área de atracción de la estructura depende de la intensidad de la corriente de la descarga atmosférica. El área de atracción de la estructura depende de la intensidad de la corriente de la descarga (fig 3.1.9.3). La distancia radial d varía entre $2H$ y $10H$, siendo H la altura de la estructura.

Ejemplo: Para el caso particular de $2H$, al cual le corresponde, según la fig. 3.1.9.4, el 50 % de las descargas (20 kA), el área total de atracción está dada por:

$$S = LA + 4H(L + A) + 4H^2$$

Si $L=50$, $A=30$ y $H=30$ m respectivamente, se obtiene un área de atracción de 0.022 km^2 . Si la estructura se encuentra en una latitud geográfica de 50° .

La relación 3.1.9 suministra 0.01 rayos por día de tormenta y km^2 . Si el nivel isoceráunicos es de por ejemplo 30 , entonces la probabilidad de descarga será de $1/0.30=3.3 \text{ km}^2$ de área por año, es decir, un impacto por cada $3.3/0.02=160$ años.

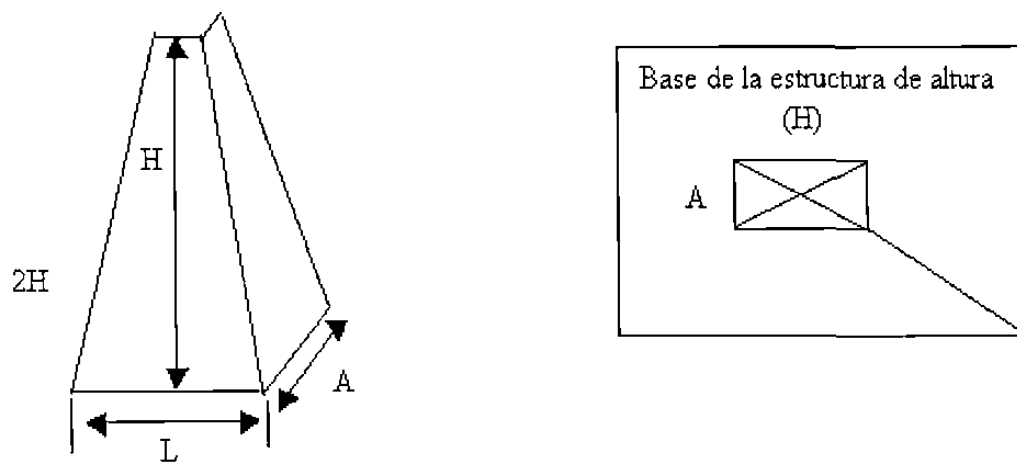


FIG. 3.1.9.3 Estructura de dimensiones conocidas, y área de atracción del rayo

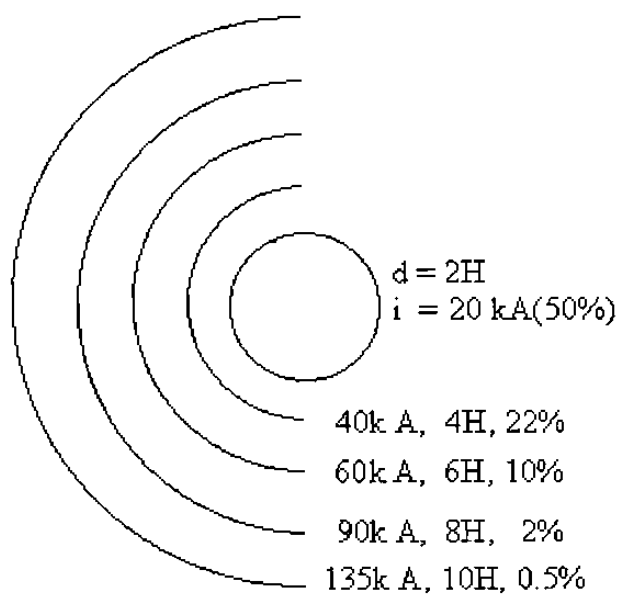


FIG. 3.1.9.4 Variación de la distancia radial d en función de i (kA) y H (m)

3.1.10 LA TEORIA DE SCHONLAND.

El ciclo de la nube y la consiguiente descarga denominada rayo se puede resumir de la siguiente manera:

a) Las cargas eléctricas en la nube se encuentran distribuidas en forma no homogénea, existiendo, por consiguiente, concentraciones desiguales de carga en el seno de la misma.

Mientras el gradiente eléctrico de la tierra permanece casi invariable (100v/cm), el gradiente eléctrico en la nube se aproxima al valor crítico (5 kv/cm), de allí que la descarga provenga de la nube y no de tierra.

b) El gradiente eléctrico sobrepasa el valor crítico, comenzando a ocurrir pequeñas descargas en el seno de la nube. Estas, en virtud de la ionización por choque descrita anteriormente, van degenerando en una especie de avalancha, denominada descarga piloto (pilot streamer), la cual avanza con una velocidad promedio de 250 km/seg.

La parte superior de la nube se encuentra a una temperatura promedio de -30°C , acusando la presión, por lo tanto, un valor mucho más bajo que la parte inferior de la misma.

A la cual le corresponde una temperatura de aproximadamente 0°C . La rama de la descarga orientada hacia la tierra tiene entonces, las mejores condiciones para su propagación.

c) La rama de la descarga piloto orientada hacia la tierra logra imponerse en su crecimiento, viéndose acompañada de pequeños puntos luminosos, característicos de las descargas escalonadas (stepped leader), cuyo tiempo de duración es relativamente corto recorriendo un trayecto aproximado de sólo 50 m a una velocidad de 50 000 km/seg.

Las descargas escalonadas parecen tener su origen en la acción del viento, llegando raras veces a la tierra. Esto se debe a que la intermitencia de la descarga piloto (de 30 a 90) les sustrae la energía necesaria para tales fines. El incremento del gradiente eléctrico, al aproximarse la descarga a la tierra, favorece la formación de un canal de recepción.

d) El canal de recepción sale al encuentro de la descarga piloto, la cual trae gran cantidad de cargas negativas consigo, formándose así un canal plasmático. Para neutralizar la carga de la nube, una gran cantidad de cargas eléctricas positivas abandona entonces la tierra, utilizando el mismo canal o sendero previamente ionizado, a través del cual ocurrirán todas las descargas sucesivas, la primera de las cuales se denomina descarga de retorno (return streamer).

La velocidad de propagación de esta descarga es de aproximadamente 30,000 km/seg, siendo apreciable el valor de la intensidad de corriente que las caracteriza (hasta 200 kA). Mientras la descarga principal requiere de un tiempo aproximado de 20 000 μ seg en llegar a la tierra, la descarga de retorno acusa un tiempo promedio de 100 μ seg en lograr su cometido.

e) El impacto provocado por las cargas eléctricas, que la descarga de retorno introduce en el seno de la nube es tan fuerte que en la mayoría de los casos se origina una segunda descarga orientada hacia la tierra, denominada descarga secundaria (dart leader), con una velocidad promedio de 3 000 km/seg.

Este dúo (return streamer, dart leader) puede repetirse un número de veces apreciable (hasta 7 combinaciones sucesivas). Las cargas positivas procedentes de la nube se observan sólo en estados avanzados de la tormenta, cuando la descarga secundaria se las trae a la tierra.

Obsérvese: La velocidad más lenta de todas las descargas mencionadas hasta ahora es la correspondiente a la descarga piloto o principal, la cual al penetrar en el aire virgen no excede de los 150 km/seg.

Esta descarga en consecuencia, necesita según el caso un tiempo promedio de 20 000 μ seg para llegar a la tierra. En la fig 3.1.10 se representa este fenómeno en función del tiempo.

3.1.11 EFECTOS DEL RAYO.

Las consecuencias más importantes del rayo en el sistema de transmisión afectado se puede resumir de la siguiente manera:

Efecto dinámico: el rayo se puede caracterizar por corrientes de hasta 400 kA, las cuales en caso de reflexiones desfavorables puede ascender hasta 800 kA. En un conductor eléctrico la corriente ejerce una fuerza, la cual se obtiene directamente de la ley circuital de Ampere, A saber

$$F = B L I = \mu_0 L I^2 / 2\pi a$$

donde B es la inducción magnética, I es la intensidad de corriente del rayo y L la longitud del conductor. La distancia que separa un conductor de otro es a.

En el caso de un lazo formado por el conductor, o en el de barras colectoras en una subestación, la misma intensidad de corriente es la que genera o engendra al campo magnético dado por B. La fuerza que ejerce un rayo en conductores en paralelo es por lo general muy superior a la que se observa en caso de corto circuito, de allí que sea imperativo tomar las prevenciones correspondientes.

Efecto térmico: Toda intensidad de corriente, al pasar por una resistencia, produce la siguiente potencia térmica de disipación $P = I^2R$. El calor que se disipa es proporcional al tiempo de la acción de la intensidad de la corriente.

Despreciando la derivada respectiva se puede suponer la temperatura del conductor proporcional al tiempo de acción. La energía así disipada será entonces:

$$Dw = u I dt$$

en la práctica el tiempo de acción promedio no excede, por lo general, los 120 μ seg. Si se supone ahora, a título de ejemplo, un conductor de cobre de 10 m de longitud, 25 mm² de sección, afectado por una corriente de 50 kA, se obtiene

$$R = 7.15 \Omega \text{ y } W = I^2 R t = 2140 \text{ W seg} = 512 \text{ cal.}$$

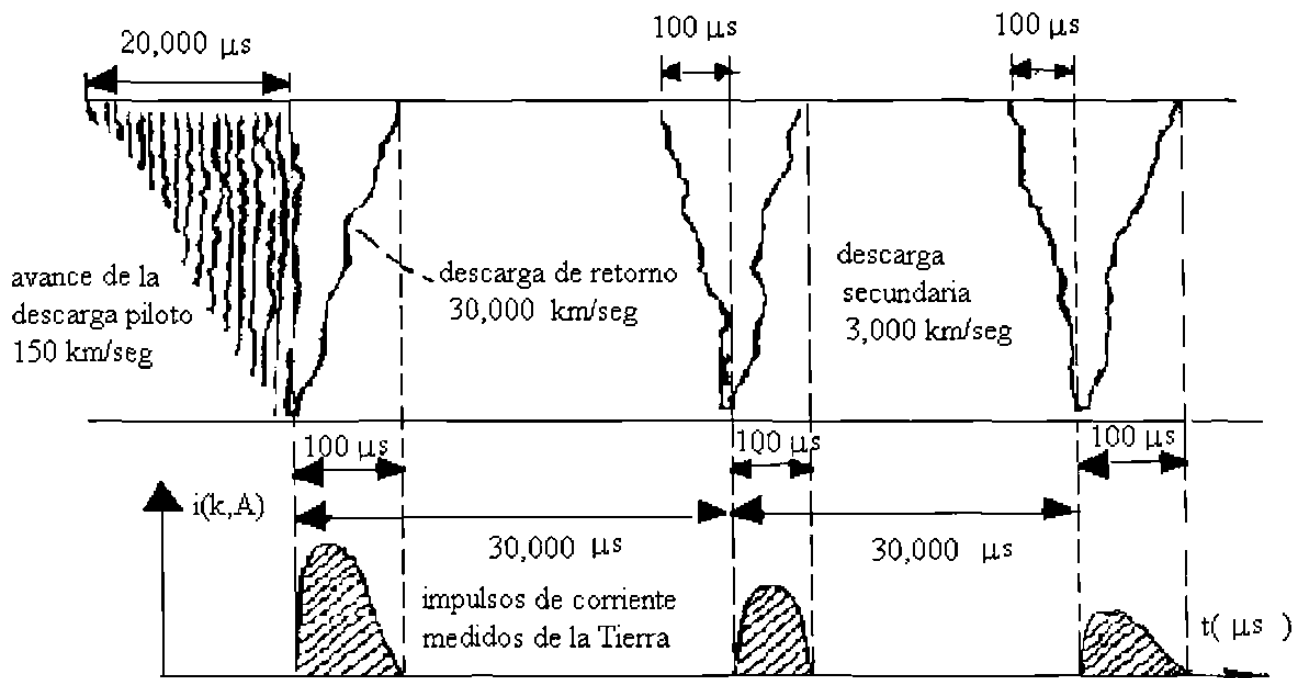


FIG. 3.1.10 Representación esquemática del proceso de descarga de una nube de tormenta según schonland y collens

Este valor es relativamente pequeño si se toma en cuenta que para derretir un gramo de cobre se requiere 48.9 calorías. La cantidad de energía antes mencionada podría derretir 10.6 gramos de cobre únicamente. En los pararrayos es menester considerar este particular al diseñar la masa de cobre requerida para las derivaciones a tierra.

Efecto químico: En su trayecto el rayo encuentra tres medios diferentes, aire, metal y tierra. En el primero no se produce nada descomunal, formándose ozono, ácido nítrico y ácido nitroso, los cuales se utilizan como fertilizantes. En el metal la reacción química de importancia es una ligera corrosión, la cual no condice a una inutilización del pararrayos. En el tercer medio, la tierra, y en especial en la zona de transición metal-tierra, se podría desgastar teóricamente el hierro o la cubierta galvánica anticorrosiva.

La carga eléctrica en movimiento (unos 6 Aseg) es capaz de desprender solamente unos cuantos miligramos de zinc, de allí que el pararrayos no se encuentra expuesto. En la propia tierra no se originan procesos químicos de importancia debido a lo reducido de las cargas eléctricas existentes en la misma.

CONCLUSIÓN: Si los dispositivos que se empleen en los sistemas de transmisión de energía se diseñan adecuadamente, en particular el pararrayos, entonces el rayo no los somete a mayores requerimientos o daños que pudieran hacer peligrar su función.

3.2 GOLPE DIRECTO E INDUCIDO.

La descarga puede producir sobrevoltajes en una línea de transmisión o distribución por el golpe directo en la línea o por inducción electrostática a los elementos de circuito en la vecindad de la línea.

El máximo voltaje probable que puede aparecer en la línea por el golpe directo es de unos 15 millones de volts y por el golpe inducido puede aparecer una onda de unos 500 000 volts. Estos voltajes aparecen entre conductor y tierra.

Esto significa que si el ángulo de protección del hilo de guarda no ha sido diseñado adecuadamente, el rayo puede incidir directamente una de las fases o conductores activos. En la fig. 3.1.9.4 se indicaron algunos valores característicos y frecuentes del

rayo, los que en mayor o menor grado varían con la distancia de atracción de la estructura soportante de los conductores.

En la práctica se ha podido observar que la incidencia del rayo en el sistema (golpe directo) conduce a mayores sobretensiones que cuando incide en la proximidad del mismo. El enfoque analítico de las sobretensiones inducidas por el rayo en el sistema, al incidir en su proximidad, no es sencillo, pues se deben considerar las cargas que el rayo induce al acercarse a la tierra, pero sin haber llegado aún a la tierra, al igual que las cargas inducidas después de haber llegado a ella. La descarga de retorno también desempeña un papel muy importante, pues lleva de nuevo al seno de la nube una gran cantidad de cargas eléctricas.

La solución analítica a este fenómeno fue presentada por S. Rusck basándose en las leyes de Maxwell. El vector de campo inducido por el fenómeno atmosférico está dado por

$$E = - \text{grad } U_i - \delta A / \delta t$$

Donde U_i es el potencial escalar de la carga eléctrica Q a lo largo del canal plasmático de la descarga atmosférica y A es el potencial vectorial de la corriente de descarga del rayo.

La tensión que se registraría en cualquier punto de la línea de transmisión afectada por el rayo, referida a tierra, está dada por la siguiente relación:

$$U = - \int E \cdot Dz = K (Q)$$

donde Q es la carga eléctrica inducida en el conductor de la línea de transmisión. Como es de suponer, el valor máximo de U se obtiene en el punto más cercano al sitio del impacto, según se mencionó anteriormente, las sobretensiones inducidas por el rayo en el sistema no alcanzan valores muy peligrosos, pero si las tensiones de paso y de contacto en la proximidad del sitio de incidencia. Estas tensiones suelen ser tan elevadas

que con frecuencia conllevan a accidentes fatales. Particularmente se ven en los cuadrúpedos (vacas, caballos, y en menor grado perros) y también al hombre.

3.3 FORMA DE ONDA.

Los voltajes producidos por las descargas atmosféricas tienen grandes magnitudes, pero su duración es muy corta. Esta está medida en microsegundos. Típicamente, el voltaje crece muy rápidamente (en 1 a 10 μseg) al valor máximo de cresta y entonces decae más suavemente, alcanzando el 50 % del valor de cresta de 20 a 50 μseg .

Como se ilustra en la fig. 3.3 la forma de la onda de voltaje o corriente producida por el rayo es comúnmente expresada por dos números.

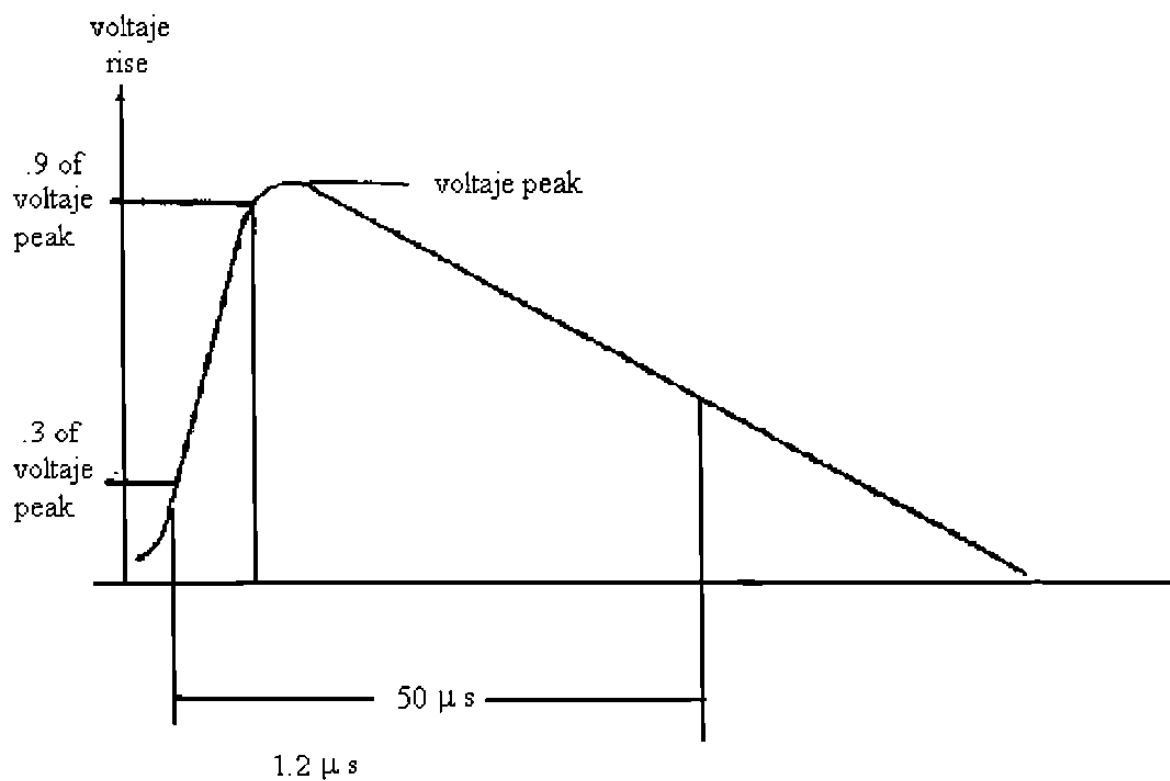


FIG. 3.3 Forma de onda producida por una descarga atmosférica (STD, I.E.E.E.).

El primero es el tiempo del cero virtual del frente de la onda en el que alcanza el valor de cresta, mientras que el segundo número es el tiempo de cero virtual en el cual la onda de voltaje o corriente decrece al 50 % del valor de cresta. El cero virtual del frente de onda es la intersección con el eje cero de una línea recta dibujada a través de los puntos, en el frente de la onda, con un 30% y 90% del valor de cresta de la onda de voltaje y 10% y 90% del valor de cresta de la onda de corriente. Ambos tiempos son usualmente expresados en microsegundos. Por ejemplo, 95 kv 1.5 x 40 μseg, es una onda cuyo valor de cresta es 95 kv, que lo alcanzo en 1.5 μseg del cero virtual, y decayó al 50 % del valor de cresta (47.5 kv) en 40 μseg desde el cero virtual. Continuando con éste concepto, es bueno repasar valiosos conceptos tratados en el cálculo de líneas de transmisión. Aquí se vio que la tensión e intensidad de corriente están dadas, para un lugar cualquiera x en la línea, por las siguientes relaciones:

$$U_x = U_2 \cos h(\gamma x) + I_2 Z \operatorname{sen} h(\gamma x)$$

$$\text{Ec.3.3.1} \quad I_x = I_2 \cos h(\gamma x) + (u_2/z) \operatorname{sen} h(\gamma x)$$

donde γ es la constante de propagación, la cual denota un componente real (α), denominada constante de atenuación, y otra imaginaria (β), llamada constante de fase. La relación que une a estas constantes es la siguiente:

$$\text{Ec. 3.3.2} \quad \gamma = \alpha + j \beta$$

la relación 3.3.1 se obtiene fácilmente de la fig. 3.3.1, suponiendo que el extremo transmisor acuda el subíndice 1 y el receptor el subíndice 2. Aunque en esta relación no figura el tiempo, se puede calcular con ella una apreciable cantidad de tareas prácticas. Más adelante se verá, no obstante, que tanto la tensión U como la intensidad I denotan en cualquier lugar x valores diferentes para tiempos diferentes. Es decir, ambas magnitudes son una función del lugar x y del tiempo t; a saber : U(x,t) e I (x,t). Z es la impedancia de onda o impedancia característica, con

$$\text{Ec 3.3.3} \quad Z = \sqrt{R + j \omega L / g + j \omega c}$$

Las magnitudes L y C , al igual que R y G , no ameritan una descripción, pues son conocidas en el cálculo de líneas de transmisión. Estas magnitudes determinan, la impedancia del sistema, la cual varía considerablemente si se trata de una línea de transmisión ($Z = 500 \Omega$) o de un cable ($Z = 50 \Omega$).

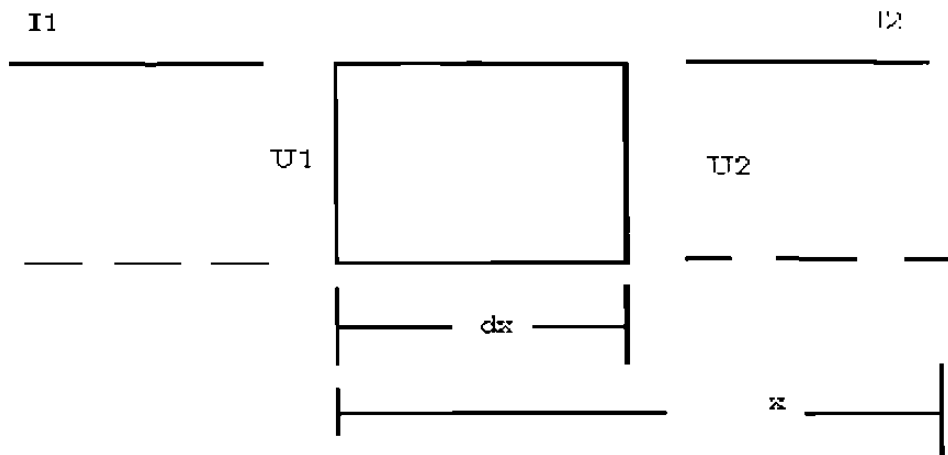


FIG. 3.3.1 Elemento diferencial de una línea de transmisión, el cual permite derivar las ecuaciones que rigen el comportamiento de la tensión U y la corriente I .

En la ecuación 3.3.1 se puede observar que tanto la tensión U como la intensidad de corriente I denotan dos componentes; es decir, ambas expresiones se pueden formular de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Ec. 3.3.4} \quad U_x &= u_p + u_r \\ I_x &= i_p + i_r \end{aligned}$$

En realidad ambas ondas tienen tanto una componente que se desplaza hacia al otro extremo de la línea (extremos receptor), a la cual se le llamará onda progresiva, como otra que se desplaza en sentido contrario (hacia el extremo transmisor), por lo cual se denomina onda regresiva. Por lo tanto de acuerdo con las ecuaciones 3.3.1 y 3.3.4, se obtiene la siguiente importante relación

$$U_p = I_p Z \quad \text{y} \quad U_r = -I_r Z$$

Estas ondas de tensión y de corriente se propagan a través de la línea de transmisión con la velocidad de la luz. Para recorrer una línea de 2 500 km de longitud, el tiempo requerido se obtiene de $C = x/t$; es decir.

$$t = 2\,500 \text{ km} / 300\,000 \text{ km/seg} = 8.33 \text{ mseg.}$$

Este tiempo es casualmente un semiperíodo en un sistema que opera a 60 Hz ($T = 16.67 \text{ mseg}$), con lo cual la tensión en el extremo receptor de la línea denota un desfase de 180° respecto al extremo transmisor.

Obsérvese: Líneas de transmisión muy por debajo de 500 km y cables con longitudes a 250 km son los únicos que permiten asumir igualdad de fase para la corriente y la tensión, según se puede calcular en la forma antes descrita.

Esta igualdad de fases se puede asumir, para las longitudes en cuestión, a lo largo de toda la extensión del cable o línea. El sistema se comporta entonces como si fuese cuasiestacionario.

Si por el contrario, las longitudes involucradas exceden de los 500 km (líneas aéreas) o 250 km (cables) respectivamente, entonces la velocidad de propagación finita de las ondas, puede perturbar seriamente a la transmisión de energía del sistema y a las cargas conectadas en su extremo (motores, transformadores, líneas). Si el desfase llega

o excede a los 90° (U_2 contra U_1), entonces es factible que se presenten peligrosas sobretensiones de resonancia.

3.4 ONDA VIAJERA

En este punto anterior se vio que tanto la tensión como la intensidad de corriente se pueden representar mediante ondas, las cuales se desplazan a través del sistema con una velocidad de propagación determinada. Por esta razón se suele hablar de ondas viajeras. En seguida se da una interpretación física a la velocidad de propagación que caracteriza a estas ondas.

Si se aplica a los bornes de entrada (extremo transmisor, U_1) un impulso de tensión $u(t)$, circulará una intensidad de corriente a través del primer cuadripolo de la figura 3.4, la cual cargará al condensador del mismo. Después de un tiempo determinado, se cargará el segundo condensador que encuentre a su paso en el sentido de la propagación, y así sucesivamente. Esto quiere decir que después de transcurrido un tiempo determinado τ , el otro extremo de la línea (receptor) acusará una tensión igual a la del extremo transmisor, siempre y cuando no haya atenuación en la cadena de cuadripolos ($R= G=0$). Si t_1 es el tiempo de duración del impulso, es conveniente diferenciar dos casos importantes:

$T_1 < \tau$: Si el tiempo de duración del impulso que penetra en la línea es inferior al tiempo que se requiere para recorrerla, entonces se observa que mientras los primeros cuadripolos acusan una tensión determinada, los últimos no denotan potencial alguno, debido a que el impulso aún no ha llegado a éstos. Si $t_1 \ll \tau$, entonces se tiene que mientras el segundo cuadripolo denota una tensión, el primero y el tercero se encuentran libres de potencial. El impulso los carga paulatinamente en su desplazamiento hacia el extremo receptor.

Velocidad de programación

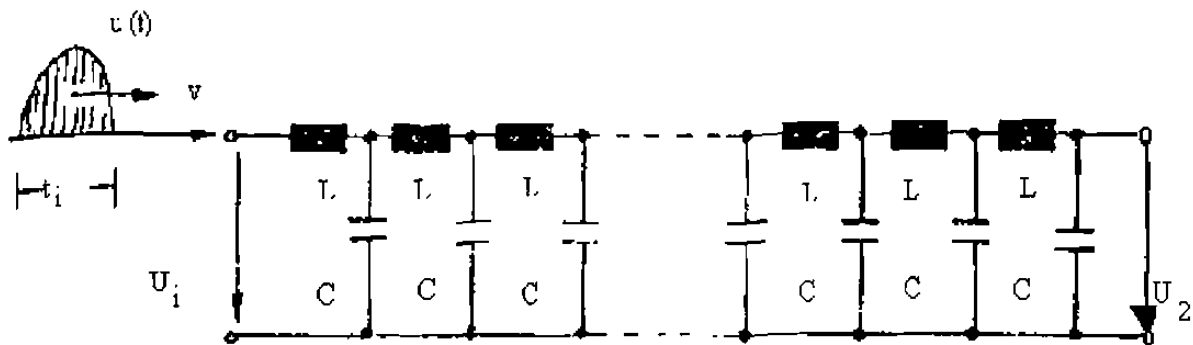


FIG. 3.4 Cadena de cuadripolos circuito equivalente de una línea de transmisión de longitud finita

Los condensadores que se van cargando no se pueden descargar en sentido inverso (extremo transmisor) debido a la ley de Lenz. En realidad la corriente que acompaña al impulso induce en L la inductancia L una tensión en oposición ($-L di/dt$), imposibilitado así dicha descarga. Este comportamiento es representativo de las sobretensiones atmosféricas (1.2/ 50 μ seg).

$t_1 > \tau$: En este caso se puede observar que el impulso está en condiciones de energizar todos los cuadripolos.

Transcurrido cierto instante, el extremo receptor denotará la misma tensión del extremo transmisor. En instante en cuestión depende únicamente de la velocidad de propagación del impulso.

Este comportamiento es característico de las sobretensiones de maniobra (250/2 500 μseg), las cuales pueden energizar simultáneamente un tramo de línea de longitud apreciable.

Resulta interesante el análisis energético de este fenómeno. Así por ejemplo, la cantidad de energía acumulada por cada uno de los cuadripolos es para un elemento diferencial

$$\text{Ec. 3.4.1} \quad dQ = u C dx = i dt$$

Considerando que la velocidad de propagación está dada por $v=dx/dt$, se obtiene de la expresión anterior

$$\text{Ec. 3.4.2} \quad V = 1/Z_c = 1/\sqrt{LC}$$

La interpretación de esta última expresión es de sumo cuidado, ya que la velocidad de propagación no difiere de una línea aérea a otra, mientras que la capacitancia C e inductancia L sí, pues dependen de la configuración geométrica del sistema. Esta interpretación de la velocidad de propagación se puede obviar si se sustituye a L y C por sus valores correspondientes.

$$\text{Ec. 3.4.4} \quad L = \mu_0 \mu_r \ln(a/r) l/\pi \quad \text{y} \quad C = \epsilon_0 \epsilon_r \pi/\ln(a/r)$$

Con la relación 3.4.3 adquiere nueva forma ;

$$\text{Ec. 3.4.5} \quad V = 1 / \sqrt{\mu_0 \mu_r \epsilon_0 \epsilon_r} I$$

Considerando que

$$I = 10 \text{ cm/km}$$

$$\epsilon_0 = 8.859 \cdot 10^{-12} \text{ A seg} / \text{V cm}$$

$$\mu_0 = 1.256 \cdot 10^{-6} \text{ V seg} / \text{A cm}$$

La relación adquiere finalmente la forma siguiente:

$$\text{Ec 3.4.6} \quad V = 300\,000 / \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \text{ km} / \text{seg}$$

Es decir, la velocidad de propagación depende de la permitividad ϵ_r y de la permeabilidad magnética μ_r . Con cierta aproximación se puede suponer $\mu_r = 1$, ya que los materiales ferromagnéticos con la influencia del campo homónimo no desempeña ningún papel importante ni para la línea de transmisión aérea no para el cable subterráneo. En cuanto a la permitividad ϵ_r se refiere, se puede suponer también $\epsilon_r = 1$ para las líneas aéreas y $\epsilon_r = 4$ para los cables con aislamiento a base de papel impregnado de aceite.

Las simplificaciones anteriores arrojan los siguientes valores para la velocidad de propagación;

$$v = 300 \text{ m} / \mu\text{seg} \text{ para líneas aéreas}$$

$$v = 150 \text{ m} / \mu\text{seg} \text{ para los cables con el aislamiento referido.}$$

En realidad los valores más frecuentes de la capacitancia e inducción que se emplean en la práctica son los siguientes:

$$\text{Línea aérea} \quad L = 1.67 \text{ mH} / \text{km}, C = 0.0067 \mu\text{F} / \text{km} \text{ --- } Z = 500 \Omega$$

$$\text{Cable} \quad L = 0.33 \text{ mH} / \text{km}, C = 0.1330 \mu\text{F} / \text{km} \text{ --- } Z = 50 \Omega$$

éstos arrojan los mismos valores dados anteriormente para la velocidad de propagación. Es interesante observar la considerable diferencia en las impedancias

características de la línea aérea y el cable (1:10), motivo por el cual es imperativo proteger a este último de ondas viajera.

3.5 ONDA REFLEJADA.

Cuando las ondas viajeras se desplazan a través de los conductores y existen irregularidades transversales o longitudinales ocurre un fenómeno de reflexión o refracción. Basta que la impedancia característica del conductor cambie en un nodo, por ejemplo de Z_1 a Z_2 . En la figura 3.5 se ha planteado esta situación. En la primera se encuentra entonces al último cuadripolo del conductor Z_1 y al primer cuadripolo del conductor Z_2 . Si se supone que no hay pérdidas en el sistema ($R=G=0$), como en el caso anterior, la corriente i_1 cargará a C_1 , luego a C_2 y así sucesivamente.

Debido a que no hay atenuación, la carga eléctrica Q permanece invariable, y en vista de que de que las impedancias involucradas son desiguales ($Z_1 \neq Z_2$), se deduce que C_1 es diferente de C_2 . Para la carga vale entonces

$$\text{Ec. 3.5.1} \quad dQ = C_1 dx U_1 = C_2 dx U_2$$

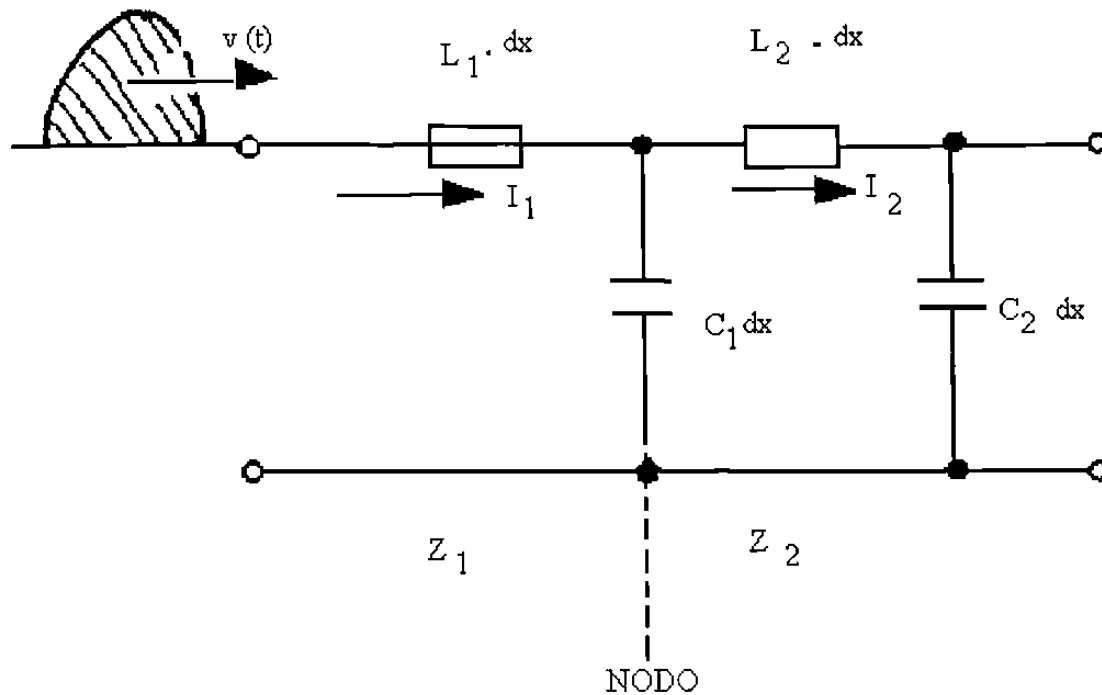


FIG. 3.5 Nodo de transición, en el cual las impedancias características cambian de valor ($Z_1 \neq Z_2$)

es decir

$$\text{Ec.3.5.2} \quad U1 / U2 = C2/C1$$

Esta última relación implica que en el nodo tiene que ocurrir un fenómeno de compensación que se denominará reflexión y refracción. En general se observa, en los puntos de unión de líneas de impedancias características diferentes (nodos), una perturbación, por determinar éstas el comportamiento de la tensión e intensidad de corriente a través del medio que se propagan.

En la figura 3.5.1, se ilustra un nodo de transición, el cual conecta, por ejemplo, a un cable ($Z1$) con una línea de transmisión ($Z2$). Suponiendo que a través del cable se desplaza una onda viajera de amplitud $u1$, en el nodo tiene entonces validez la siguiente expresión:

$$\text{Ec. 3.5.3} \quad u1 + ur = u2$$

donde ur es la amplitud de la onda reflejada, mientras que $u2$ es la amplitud de la onda refractada; es decir, la que penetra en el conductor $Z2$.

$$\text{Ec. 3.5.4} \quad i1 - ir = i2$$

aplicándole la ley de Ohm a esta última se obtiene

$$\text{Ec. 3.5.5} \quad u1/Z1 - ur/Z1 = u2/Z2$$

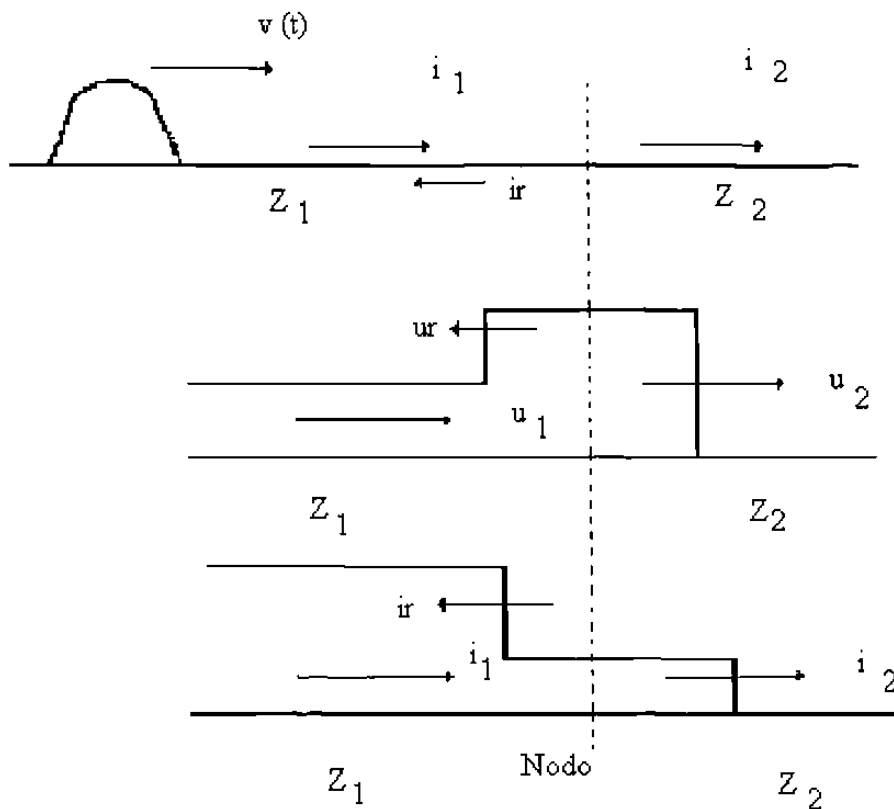


FIG. 3.5.1 Reflexión y refracción en un nodo de transición.

Si se multiplica ahora la relación 3.5.5 por Z_1 y se suma a la relación 3.5.3 se logra obtener la amplitud o altura máxima de la onda refractada; es decir, aquella que penetra en el conductor de impedancia característica Z_2 :

$$u_2 = \frac{2 Z_2}{Z_2 + Z_1} u_1 \quad \text{con} \quad b_u = \frac{2 Z_2}{Z_2 + Z_1} = \text{Factor de paso (tensión)}$$

El factor de paso para la tensión (b_u) se denomina también coeficiente de refracción, ya que indica el porcentaje de tensión que logra penetrar en el conductor opuesto. Si se aplica la ley Ohm ($u=i Z$) se obtiene de la relación anterior:

$$i_2 = \frac{2 Z_1}{Z_2 + Z_1} i_1 \quad \text{con} \quad b_i = \frac{2 Z_1}{Z_1 + Z_2} = \text{Factor de paso (corriente)}$$

Las ondas reflejadas, es decir, las que se regresan a su punto de origen a través del conductor de impedancia Z_1 , serán:

$$u_r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} u_1 \quad \text{con} \quad r_u = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \text{Factor de reflexión de la tensión}$$

En forma analógica se obtiene el coeficiente de reflexión para la intensidad de corriente

$$i_r = - \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} i_l \quad \text{con} \quad r_i = - \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \text{Factor de reflexión de la corriente}$$

Estas relaciones determinan las leyes que rigen la reflexión y la refracción de las ondas viajeras (tensión y corriente) en un nodo de transición. Es fácil demostrar que existe una sencilla relación entre ambos coeficientes de reflexión y refracción;

$$b = r + 1$$

Esta expresión resulta un recurso valioso en el cálculo de sobretensiones.

CONCLUSIÓN.

Cuando una onda viajera o sobretensión penetra en una línea de impedancia característica mayor ($Z_2 > Z_1$), la tensión de la onda acusa un incremento y la intensidad de corriente una atenuación. Si la relación existente entre las impedancias características se invierte ($Z_1 > Z_2$), sucede exactamente lo contrario.

La relación Z_2/Z_1 determina, por consiguiente, las alteraciones que sufrirán la tensión e intensidad de corriente en el nodo de transición, fig. 3.5, siendo el corto circuito ($Z_2 = 0$) y la marcha en vacío ($Z_2 = \infty$) casos extremos para la línea a través de la cual se desplaza o en la que incide la onda viajera. Es también fácil demostrar que la energía de la onda incidente siempre sufrirá una atenuación debido al porcentaje que se refleja.

Obsérvese: El análisis minucioso de las relaciones anteriores pone de manifiesto lo siguiente: La onda que penetra en la línea de impedancia característica Z_2 tendrá

siempre el mismo signo de la onda incidente, mientras que una de las ondas reflejadas (tensión o corriente) denotará siempre signo opuesto.

3.6 CARACTERÍSTICAS DEL AISLAMIENTO.

Es característico de la mayoría de los aislantes que el máximo voltaje que pueden soportar varía inversamente a la duración del voltaje. Puesto que los sistemas de potencia eléctrica están sometidos a diferentes tipos de sobrevoltajes, unos de larga duración y otros de corta duración, se requiere que el equipo de distribución de potencia de soporte por lo menos dos tipos de pruebas dieléctricas. Una de baja frecuencia (69 Hz) con duración de una minuto y establece la habilidad del aislamiento a soportar sobrevoltajes moderados de relativamente larga duración.

Las otras son pruebas de impulso que prueban que los aislamientos no fallaran ante olas de voltaje de gran magnitud y corta duración, como lo son los sobrevoltajes producidos por las descargas atmosféricas. De aquí la importancia de las pruebas de impulso.

3.7 NIVEL BÁSICO DE IMPULSO.

La prueba de impulso más comúnmente usada consiste en la aplicación de una onda completa de voltaje de $1.5 \times 40 \mu\text{seg}$, de un específico valor de cresta, especificado en función del nivel del aislamiento del equipo involucrado. El valor de cresta es llamado Nivel Básico de Impulso (NBI) del equipo. Para simplificar el diseño y la aplicación de equipo eléctrico, varias sociedades como NEMA (National Institute of Electrical Engineers), y otras han establecido una serie de estándares del Nivel Básico de Impulso para transformadores en aceite, reactores inmersos en aceite, bushings de equipos, interruptores en aire, soporte de buses. Sin embargo bajo condiciones especiales, pueden ser fabricados equipos con bajo rango de impulso. Por ejemplo en sistemas de alto

voltaje (115 kv y más) que son bien aterrizados, los transformadores pueden tener un paso abajo del valor estándar y logran un buen funcionamiento.

A estos se les llama transformadores de aislamiento reducido, mientras que teniendo un NBI en concordancia con la tabla, son llamados de aislamiento completo. Estos valores se pueden abreviar en la tabla 3.7.1.

Clase de Voltaje kv	Nivel Básico de Impulso kv	Clase de Voltaje Kv	Nivel Básico de Impulso kv	Clase de Voltaje Kv	Nivel Básico de Impulso Kv
1.2	30	23	150	138	650
2.5	45	34.5	200	161	750
5.0	60	46	250	196	900
8.7	75	69	350	230	1050
	95 *	92	450	287	1300
15.0	110	115	550	345	1550

* El NBI 95 kv se usa para cierto tipo de equipo en clase 15 kv.

TABLA 3.7.1 Valores Estándar de Nivel Básico de Impulso (NBI).

El nivel básico de impulso (NBI) estándar para transformadores de distribución y potencia, rectores y reguladores (todos inmersos en aceite), y transformadores de instrumentos con aislamiento clase 15 kv y menores están dados en la tabla 3.7.2.

Clase de Aislamiento KV	Transformadores de distribución, reguladores de voltaje, transformadores de instrumentos inmersos en aceite			Transformadores de potencia y reactores limitados de corriente inmersos en aceite.		
	Onda completa 1.5 x 40 (NBI) KV	Prueba con onda recortada		Onda completa 1.5 x 40 (NBI) KV	Prueba con onda recortada	
		Valor de cresta KV	Tiempo mínimo de arqueo μ seg		Valor de cresta KV	Tiempo mínimo de arqueo μ seg
1.2	30	36	1.0	45	54	1.5
2.5	45	54	1.25	60	69	1.5
5.0	60	69	1.5	75	88	1.6
8.66	75	88	1.6	95	110	1.8
15	95	110	1.8	110	130	2.0

TABLA 3.7.2 Valores Estándar Nivel Básico de Impulso (equipo inmerso en aceite)

Para transformadores de tipo seco no está bien establecido un estándar de valores de nivel básico de impulso (NBI) pero puede usarse la siguiente guía práctica:

Clase de aislamiento	N B I
1.2	10
2.5	20
5.0	25
8.66	35
15.0	50

Junto con la prueba de onda completa, los equipos son sometidos a una prueba de onda recortada. En ésta se aplican un voltaje predeterminado y se reduce sustancialmente a cero por el arqueo en un entrehierro en aire.

El valor de cresta alcanzado en el tiempo mínimo de arqueo también se presenta en la tabla 3.7.2 para equipos de 15 kv o menores. Para clases de aislamiento mayores, el valor de cresta de la onda recortada es aproximadamente 15 % que el N B I y el mínimo tiempo de arqueo en 3 μ seg.

CAPITULO 4.

EQUIPO DE PROTECCIÓN

4.1 APARTARRAYOS, CONCEPTOS BÁSICOS.

Los apartarrayos son los dispositivos más utilizados para combatir las sobretensiones en los sistemas eléctricos de distribución. Comenzaron a utilizarse en los sistemas comerciales de transmisión de energía para enviar a tierra las sobretensiones atmosféricas. Posteriormente, y al ir creciendo los valores de los voltajes de operación, se les utilizó para derivar las sobretensiones internas, de ahí se les comienza a llamar descargadores de sobretensiones como un término más genérico. La función que este dispositivo desempeña en el sistema es la de derivar o descargar en forma rápida e inofensiva a tierra aquellas sobretensiones que ponen en peligro al aislamiento del sistema, por lo que el nombre de descargador de sobretensiones es bien acertado, pero en nuestro medio estos dispositivos son llamados en forma general apartarrayos, por lo que en este escrito se empleará este término

Históricamente las primeras líneas de transmisión que entraron en operación a principios de siglo, alcanzaron rápidamente longitudes superiores a los 100 km, y el rayo se convierte en uno de sus principales problemas.

Así el primer dispositivo utilizado para enviar a tierra las descargas atmosféricas en las líneas de transmisión fue un simple explosor de puntas (rod gap) en cual se ilustra en su forma elemental en la fig. 4.1.1 y de la cual se observan algunas desventajas:

- a) La tensión de disparo depende en alto grado de la polaridad.
- b) Retraso de funcionamiento, dado por el tiempo de formación de la onda incidente. Para funcionar en 1 μ seg. la tensión de disparo debe ser 1.5 a 3 veces superior a la tensión 50 % de choque disruptiva.
- c) El arco no se extingue por sí mismo, debido a la naturaleza capacitiva del dispositivo.

Otro dispositivo similar es el descargador de explosor sencillo, también denota un comportamiento capacitivo. Cuando dispara la intensidad de corriente de derivación se encuentra desfasada 90° respecto a la tensión dándose las condiciones para el reencendido del arco. La corriente, además, no se ve limitada en su derivación a tierra, y la corriente de régimen sigue el mismo camino.

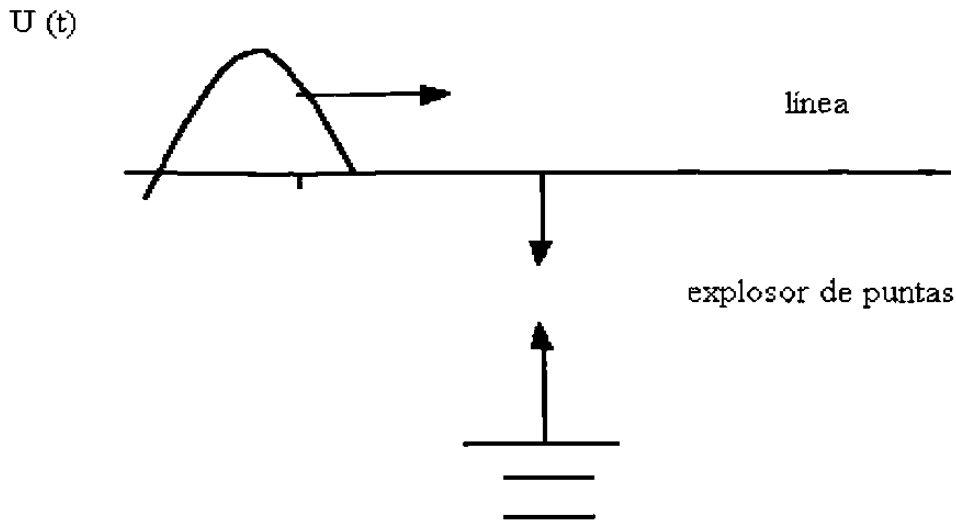


FIG. 4.1.1 Representación de un explosor de puntas.

Esto motivó que el explosor se viera rápidamente provisto de una resistencia óhmica en su extremo conectado a tierra. El objeto de esta resistencia era:

1. Darle al dispositivo de protección un comportamiento óhmico-capacitivo de manera que el desfase existente entre la corriente a tierra y la tensión no llegara a 90° . De esta manera se trataba de combatir el reencendido del arco.
2. La resistencia limitada también a la corriente en su trayectoria a tierra.

El dispositivo mostró una evidente mejoría, pero pronto se advirtió que la resistencia no debería ser lineal, sino más bien denotar un comportamiento autoválvula; es decir, que su valor óhmico cambiase con el valor de la tensión imperante entre el conductor y el dispositivo de protección. Este tipo de resistencia se logró utilizando discos de carburo de silicio.

Aparece un nuevo dispositivo llamado descargador catódico, de origen alemán, y posee los elementos que se observan en los apartarrayos modernos. En primer lugar se observa el explosor de disparo, el cual determina el nivel de protección dado por el descargador. En seguida del explosor de disparo se ubica una resistencia a base de

carburo de silicio. El número de discos depende de la tensión, y el diámetro de los mismos de la intensidad de corriente máxima que tiene que ser enviada a tierra. Otro dispositivo empleado es el llamado descargador de expulsión, en el que el explosor de disparo está conformado por el cabezal del descargador y el propio conductor activo. Este explosor se encuentra en serie con otro, pero dentro de un tubo de fibra de vidrio, en cuyo interior tiene lugar la descarga eléctrica. La alta temperatura del arco produce una corriente de gas turbulenta, la cual procede de la descomposición de la fibra.

En el interior del tubo, por consiguiente, ocurre una variación brusca de la presión; ésta trata de expulsar violentamente al gas fuera del tubo por el único orificio disponible para tales fines. Así, el arco es desgarrado, al mismo tiempo que se interrumpe la descarga.

Una de las principales desventajas de los descargadores hasta ahora, exceptuando al descargador catódico, es que en el disparo conlleva a un corto circuito en el sistema.

La intensidad de la corriente de régimen permanente alimentaba entonces al cargador, debido a su baja impedancia y condición de corto circuito, y no se tenía ningún dispositivo que permitiera desgarrar el arco eléctrico y despejar la corriente de derivación y la misma corriente de fuga.

El tiempo de disparo resultaba ser, además, considerable, ya que el arco se originaba en un campo relativamente no homogéneo.

El resultado de las mejoras hechas al descargador catódico, y las innovaciones surgidas en los años sesenta dieron como resultado un apartarrayos más eficiente y más confiable, al cual se le denomina autoválvula, debido al comportamiento característico de su resistencia no lineal. En la fig. 4.1.2 se ilustra un descargador de tipo autoválvula, simplemente se han representado los elementos más relevantes contenidos en el mismo. El recipiente de porcelana que aloja todos los elementos no ha sido representado. El descargador está constituido de arriba hacia abajo por:

Explosor de disparo – Este tiene dos finalidades; determinar la tensión de disparo del apartarrayos y el nivel de protección dado por el mismo, así como aislar la unidad en condiciones de régimen permanente.

Explosor de placas múltiples – Su tarea es la de hacer homogéneo el campo eléctrico y al mismo tiempo refrigerar el arco. Está constituido por láminas de cobre, las cuales son excelentes conductoras térmicas.

Resistencia no lineal – Esta resistencia está construida a base de carburo de silicio u óxido de zinc, aglutinados en una masa no conductora. Su finalidad es evitar el corto circuito. En efecto, a valores nominales de operación, el valor óhmico de estas resistencias es muy alto. Sin embargo, ante la sobretensión su valor disminuye apreciablemente, de ahí el nombre de autoválvula.

Resistencia de puesta a tierra – Este elemento al igual que el siguiente, no está incluido en el recipiente de porcelana, pero su importancia es relevante, pues un alto valor de esta resistencia conlleva a incrementos de los potenciales en la subestación, y más aún cuando el apartarrayos se conecta a tierra directamente en la malla de la subestación.

Anillos de regulación – Como ya se dijo este elemento no se encuentra contenido en el recipiente del descargador.

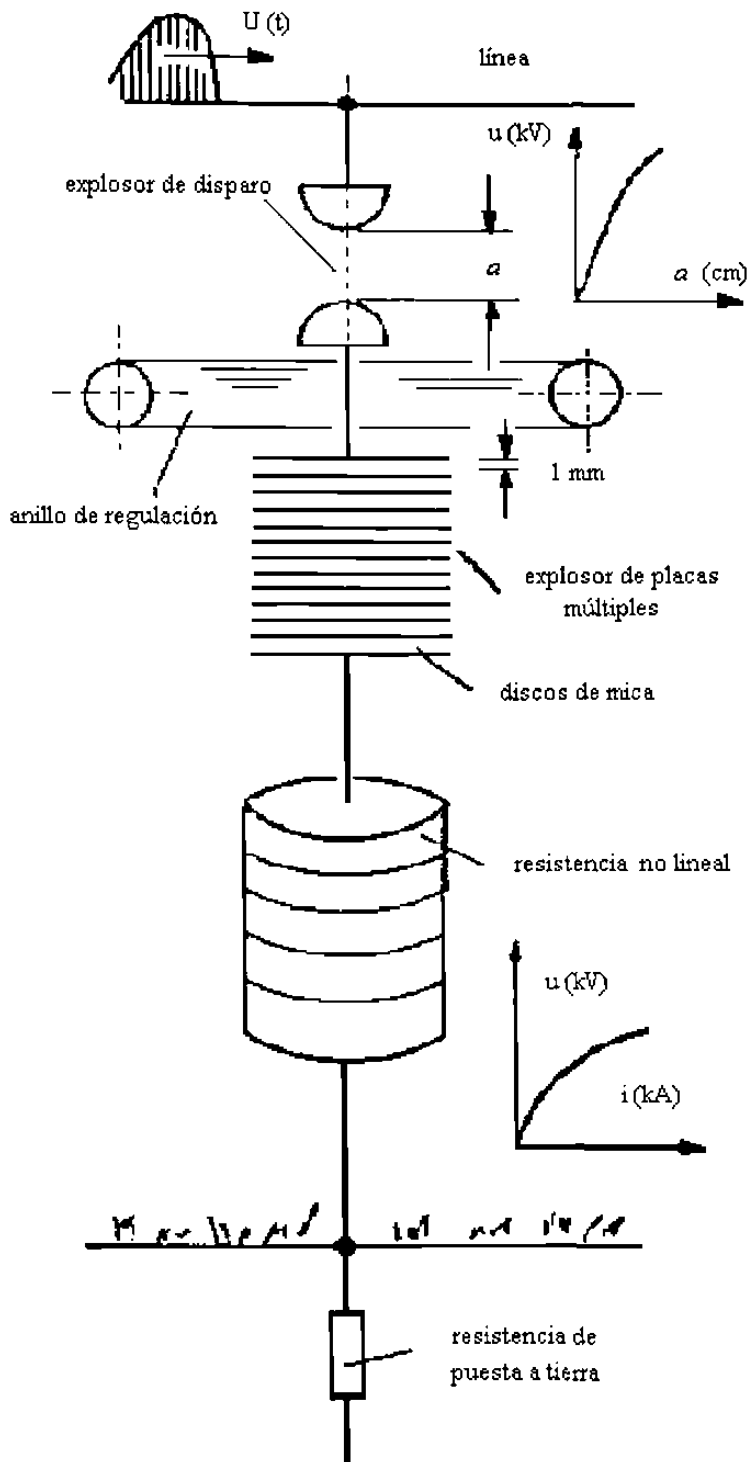


FIG. 4.1.2 Representación simplificada de un descargador o apartarrayos autoválvula

Su trabajo consiste en linealizar en lo posible la distribución de la tensión a lo largo de la columna de porcelana del recipiente, en particular cuando la misma se encuentra expuesta a un grado de contaminación elevado.

Contadores de descargas – Este es un pequeño dispositivo contenido en el interior del recipiente, y que puede constar de un pequeño explosor montado sobre un disco de sección circular, que perfora un papel colocado sobre este, o llevar un dispositivo de conteo digital.

Válvula de alivio – Cuando el apartarrayos deriva una intensidad de corriente elevada a tierra, la descomposición brusca en el interior del recipiente puede alcanzar valores tan elevados que la unidad explotaría. Para tratar de aliviar esta situación, los apartarrayos disponen de membranas o válvulas que permiten el escape de los gases que se originan en el interior.

CAPITULO 5.

PROTECCIÓN DE EQUIPO ELECTRÓNICO SENSITIVO.

5.1 CONCEPTOS BÁSICOS.

Los sobrevoltajes transitorios en los sistemas de potencia, ocurren cuando energía originada fuera del sistema es inyectada en las líneas que alimentan equipos sensitivos. También, el acoplamiento de transitorios en las líneas es una fuente de sobrevoltajes dañinos. Pero la causa más común de sobrevoltajes, como ya se ha comentado en capítulos anteriores, son las descargas atmosféricas y el cierre o apertura de fuentes de energía (switcheos).

Los efectos de las descargas ya han sido comentados y tienen el potencial de inducir voltajes de línea a línea, a través de la tierra y por inyección directa en el sistema.

Los transitorios originados por switcheos en los sistemas de potencia emanan de la energía atrapada en cargas que serán desconectadas o de eventos que toman lugar en el interruptor al momento de abrir o cerrar. En general los transitorios aparecen cuando un cambio tiene lugar en el sistema. El cierre o apertura de un interruptor es un cambio abrupto. Durante el cierre de los elementos mecánicos del interruptor los contactos del mismo pueden rebotar, o un pre-encendido pueden ocurrir antes del cierre de los contactos. El más simple de los transitorios debido al switcheo es típicamente limitado a

dos veces el valor de pico del voltaje normal, pero en algunas condiciones pueden llegar a ser hasta tres veces el valor pico del voltaje.

Los más frecuentes tipos de ondas de voltaje es una onda con oscilación decayente de 5 a 500 hz. Mientras las formas de onda de un transitorio pueden tener infinidad de variedades, el IEEE en el estándar 587 (figura 5.1.1), ha designado una forma de onda como guía para circuitos de corriente alterna y bajo voltaje, ésta es representada como un transitorio de 0.5 μ seg-100 kHz. Esta no describe un transitorio de onda circular, se esta suponiendo lo más cercano a las condiciones reales de tal forma, que el ingeniero pueda probar y ver como sus equipos reaccionan ate esta. El cumplimiento de este estándar será parte de un logro de los fabricantes para proteger sus equipos adecuadamente.

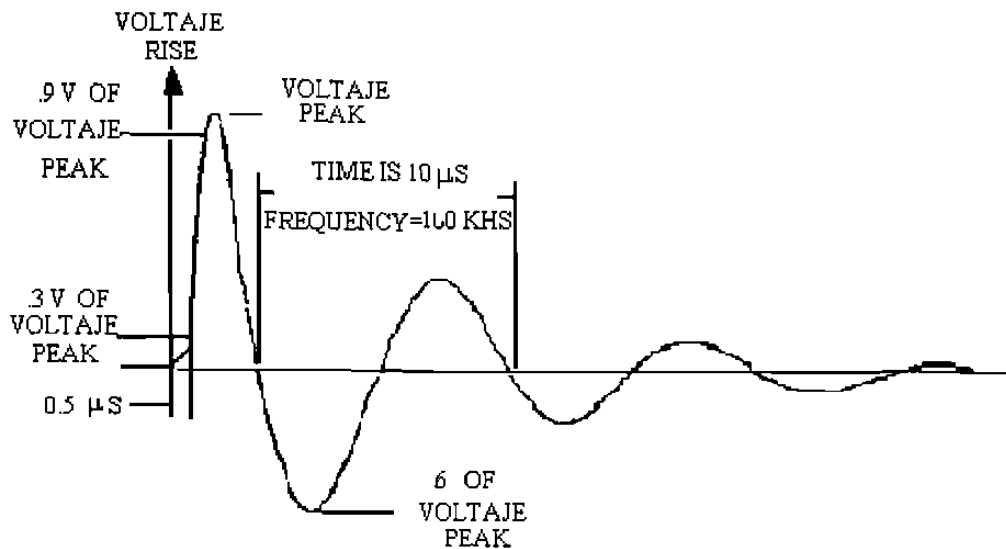


FIG. 5.1.1 IEEE 587 onda circular 0.5 μ SEG. 100 KHZ.

No obstante las magnitudes de la onda de voltaje y su frecuencia de ocurrencia en circuitos no protegidos, son bien conocidos, sus formas de onda y energía contenidas no lo son tanto, esto confirma nuestra pretensión que las ondas de voltaje pueden dañar el equipo o causar mal funcionamiento en sistemas industriales como en sistemas residenciales.

Con esto estamos diciendo que los transitorios ocurren dentro de nuestras instalaciones y por lo tanto en nuestras computadoras, pero la supresión de los mismos debe comenzar desde el exterior del edificio, esto es que mientras la descarga trata de arribar al cuarto de computadoras, antes, las desviamos, atrapamos o las cortocircuitamos. IEEE trata el transitorio desde la entrada del servicio eléctrico. (fig. 5.1.2)

Como ya se comentó necesitamos un supresor de transitorios que pueda manejar esta forma de ondas y voltajes hasta los 6 KV y hasta 500 amperes. Aunque también sabemos que estos transitorios en una residencia, causados por cierre o apertura de interruptores pueden ser de 1200 volts o mayores y ocurrir una o más veces por semana, éstas golpean el disco puro y son capaces de incendiarlo. Estas son las razones por las cuales se deben proteger adecuadamente los equipos sensitivos.

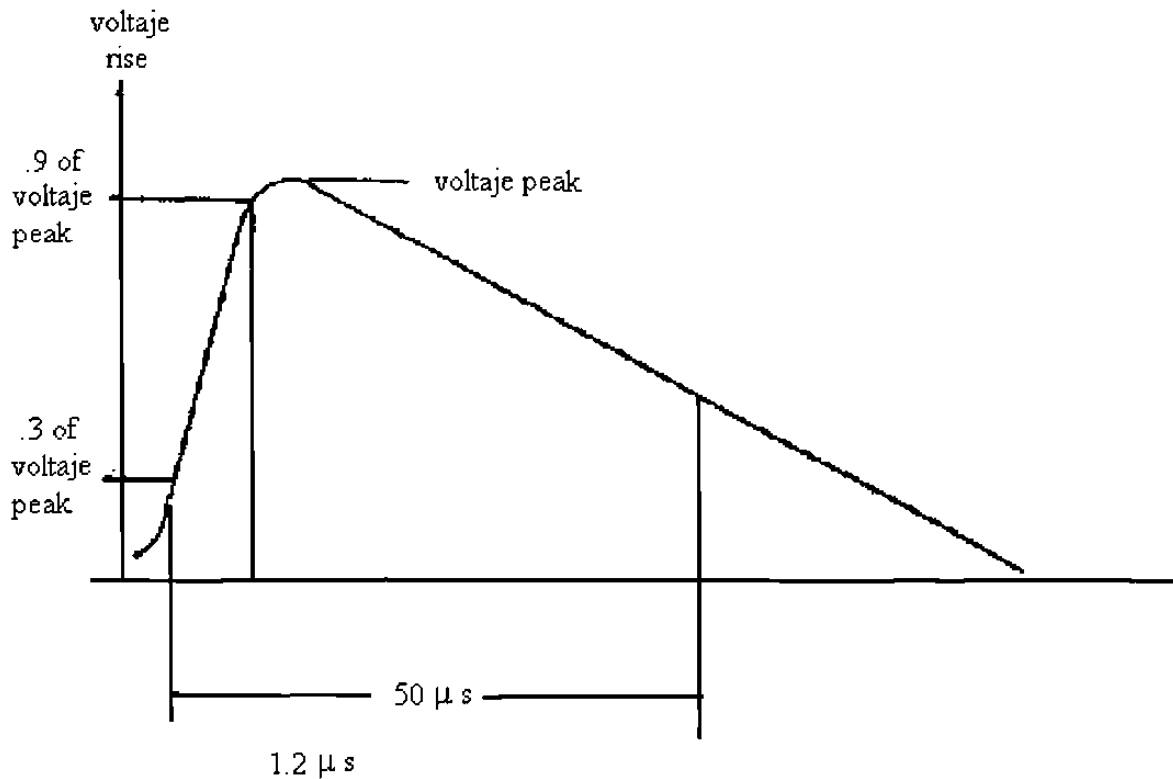


FIG. 5.1.2 IEEE forma de onda externa.

5.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS COMPONENTES DE PROTECCIÓN.

Varios dispositivos han sido desarrollados para proteger equipo electrónico de los transitorios. El término supresor de transitorios es un poco engañoso realmente estos atrapan, limitan o desvían. No pueden suprimir del todo pero pueden desviarlos a tierra o limitarlos a valores aceptables.

Hay dos clases básicas de dispositivos: el tipo de desviadores y el tipo restrictores, éstos últimos no son muy complicados, simplemente ofrecen una alta impedancia a la frecuencia transitoria o alta resistencia a la propagación del transitorio. Esto se lleva a cabo con el uso de resistencias o inductancias en serie con el circuito. Los desviadores tienen propiedades que los hacen conducir bajo ciertas condiciones, permitiendo al transitorio encontrara un camino a tierra. Estos están conectados en paralelo de línea a

tierra y toman dos formas básicas: pata de cabra (crow bar) y trampa de sobrevoltajes (clamps).

PATA DE CABRA (CROW BAR)

Estos dispositivos son simples de entender, cuando un sobrevoltaje ocurre, el dispositivo cambia de una alta impedancia a un dispositivo de baja impedancia, en estas condiciones ofrece una trayectoria a tierra, apartando la onda del equipo sensible, el cambio de estado en este dispositivo es inherente al mismo dispositivo. La mayor ventaja de estos dispositivos es su habilidad para manejar ondas grandes de corriente sin descomposición o sobrecalentamiento. Esto significa que la energía del transitorio deberá ser disipada en cualquier lugar del circuito, por supuesto que el propósito de este aparato es ver que la energía no sea consumida en la computadora. Cuando un dispositivo del tipo gap se incendia, crea su propio transitorio por switcheo dependiendo de la corriente y el tipo de carga, es posible que un evento de corta duración se convierta en uno de larga duración, sin embargo este dispositivo es simple u de bajo costo, que cuando se usa en combinación con otros métodos de supresión es una buena línea frontal de defensa.

Al ir aumentando el voltaje a través del gap, una pequeña conducción puede ocurrir mientras el voltaje de arco se alcanza. Este voltaje puede ser algunas veces entre 1500 y 3000 volts, esto puede tomar unos 10 nanosegundos para que el gap llegue a conducir (fig. 5.1.3)

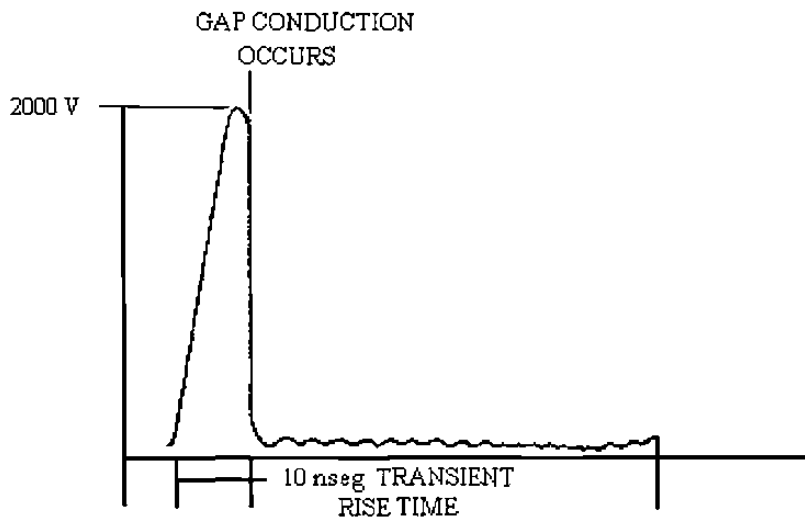


FIG. 5.1.3 Disparo del gap en 10 nanosegundos.

Cuando el punto de conducción es alcanzado el gas entre los puntos de conducción llega a su condición para conducir, y esta cesará después de que la corriente llegue a cero y permanezca ahí lo suficiente para la desionización de su trayectoria y recuperar su estado de aislamiento lo cual toma varios ciclos.

El problema con este proceso es que mientras el voltaje esta creciendo, la carga esta dejándose de proteger. El voltaje típico de conducción puede también ser afectado por el tiempo de descanso entre conducción, la naturaleza física del proceso hace difícil la producción de voltajes de arqueo al disminuir los niveles de voltaje. Esto es también función de las tolerancias de fabricación para distancias muy pequeñas en los gaps. Parte de estas limitaciones pueden ser aliviadas por la colocación de gap en un tubo lleno de gas teniendo menor voltaje de ruptura que el aire (fig. 5.1.4).

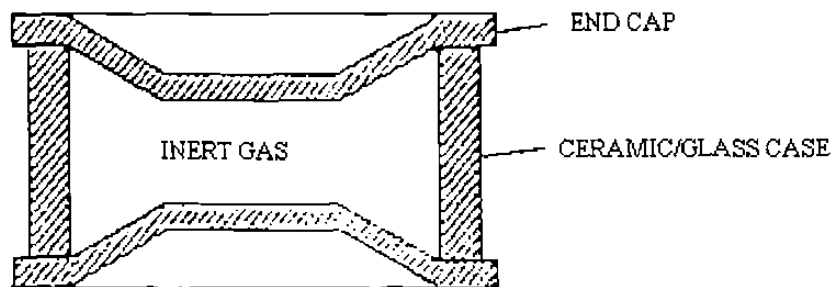


FIG. 5.1.4 Dispositivo de tipo gap.

Las compañías suministradoras de energía tienen sus procedimientos de instalación de apartarrayos en la entrada de los edificios, apartarrayos es un término ya pobre para designar estos dispositivos ya que su mejor función es desviar la energía que atrapan. Como la onda de voltaje se mueve hacia la carga es ampliamente atenuada por el transformador de servicio del edificio, el aislamiento entre el primario y el secundario del transformador sirve para amortiguar el transitorio a la entrada, este es el lugar ideal para colocar un dispositivo del tipo gap.

Sí el apartarrayos se coloca muy alejado en la línea, entonces sólo en algunos circuitos, por ejemplo los alimentadores de las computadoras, la onda podría encontrar otros caminos a través de varias clases de metales de la construcción del equipo de computo.

Si se coloca el apartarrayos en el secundario del transformador del servicio del edificio, esto condiciona a toda la potencia a entrar al edificio. Algunos fabricantes recomiendan apartarrayos dentro de los cuartos de computadoras, aunque esta práctica no sea muy aceptada por que al desviar ondas de sobrevoltaje cerca de la computadora esta podría viajar a través de la tierra del equipo y causar daños irreparables en los microcircuitos.

TRAMPAS DE SOBREVOLTAJE (CLAMPS)

Los dispositivos que atrapan ondas de sobrevoltaje tienen un cambio de impedancia que depende del flujo de corriente a través de ellos o del voltaje que aparece en sus terminales, las trampas tienen características no lineales al cambiar sus condiciones más allá del nivel de trapeo. A diferencia de los dispositivos del tipo chispazo, la instalación de una trampa no afecta la operación del circuito a niveles de voltaje de estado estable por debajo del nivel de trapeo. Cuando el transitorio de voltaje comienza a crecer, un flujo de corriente nace a través del dispositivo resultando una trampa para el voltaje ya que la corriente va a crecer más rápido de cómo crece el voltaje. Este efecto puede ser logrado con cualquier dispositivo que tenga una impedancia no lineal.

DIODO AVALANCHA

Los diodos avalancha son parte de la familia del diodo zener que inicialmente se usaron como reguladores de voltaje. Especial atención en la construcción mejora su capacidad de trapeo de voltaje. Uniones de gran diámetro con una gran capacidad de disipación de calor, hacen del diodo avalancha un buen supresor, típicamente son usados en instalaciones de bajo voltaje en circuitos lógicos, sin embargo pueden construirse para manejar aún voltajes más elevados.

Los supresores a base de silicio pueden fabricarse por una amplia gama de características supresoras. (fig. 5.1.5). Si se grafica el pulso de corrientes contra el voltaje de trapeo, encontramos que la curva es sorprendentemente plana sobre el rango de voltaje útil del dispositivo. Aunque la unión PN del diodo es muy delgada, la capacitancia puede ser una consideración dependiendo de la aplicación, pero se minimiza colocando varios diodos en serie. La ventaja del diodo es su rápida respuesta a incrementos de corriente de elevación rápida.

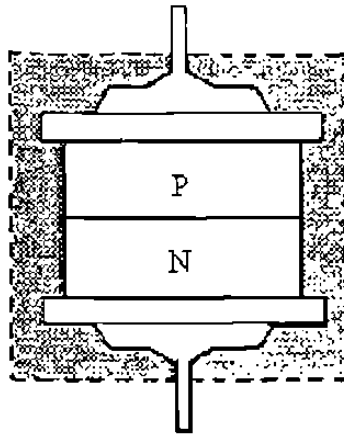


FIG. 5.1.5 Supresor de silicio.

VARISTORES.

La función de los varistores es muy similar a un resistor variable, estos incluyen dos dispositivos con diferente construcción y tecnología. El primero hecho a base de carburo de silicio, ha estado en la industria por algún tiempo y ha sido exitosamente usado como un dispositivo supresor de transitorios, pero recientemente otra tecnología ha desarrollado varistores de óxido de metal.

Las propiedades de los varistores de carburo de silicio fueron encontradas por casualidad y su proceso de conducción no lineal aún es sujeto de especulaciones.

MOV's (VARISTORES DE ÓXIDO DE METAL).

Los varistores de óxido de metal han venido ha ser muy populares por su amplio rango de aplicaciones. El proceso de conducción en el MOV toma lugar en los limites de grandes granos de óxido de zinc formados en un delicado proceso y suspendidos en óxido de bismuto. Las uniones PN existen efectivamente en la interfase entre estos materiales (fig. 5.1.6).

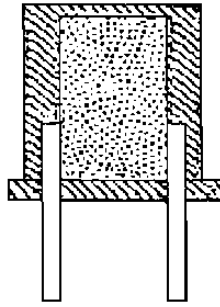


FIG. 5.1.6 Varistor de óxido de metal.

Las características básicas de funcionamiento de un MOV son similares a la de los de carburo de silicio y la selección entre ellos depende de los voltajes de trapeo y de la capacidad para manejar energía. Los MOV's generalmente manejan grandes cantidades de energía, mientras que los de carburo de silicio son recomendables para atrapar ondas de menor voltaje.

DEFECTOS.

Como ya se ha comentado, los dispositivos del tipo gap, actúan como un corto circuito y absorben pequeñas cantidades de energía, mientras los dispositivos de estado sólido como los MOV's absorben grandes cantidades de energía y debido al esfuerzo al manejar esta energía los dispositivos MOV's eventualmente fallan. Un fuerte golpe de esta energía o varios golpes ligeros de la misma, pueden causar el rompimiento de las uniones internas viniendo a ser un camino sólido para el flujo de corriente. Hay dos formas de tratar esta corriente y ambas involucran la colocación de un fusible en el circuito.

La figura 5.1.7 muestra los dos métodos de protección usando un fusible. En la fig. 5.1.7 A, tenemos la necesidad de proteger el equipo a cualquier costo, pues permitiríamos que el equipo saliera de servicio por una falla en el supresor. En la fig. 5.1.7 B, tendríamos una operación continua. El dispositivo puede fallar cortocircuitándose y hacer que se dispare una protección interrumpiendo la potencia o señal de transmisión, si esta instalado en la línea de datos.

La colocación de un fusible en serie con el dispositivo, asegura una operación continua y con una luz indicadora puesta en paralelo con el fusible de tal modo que el operador pueda ver que el dispositivo tenga que ser reemplazado.

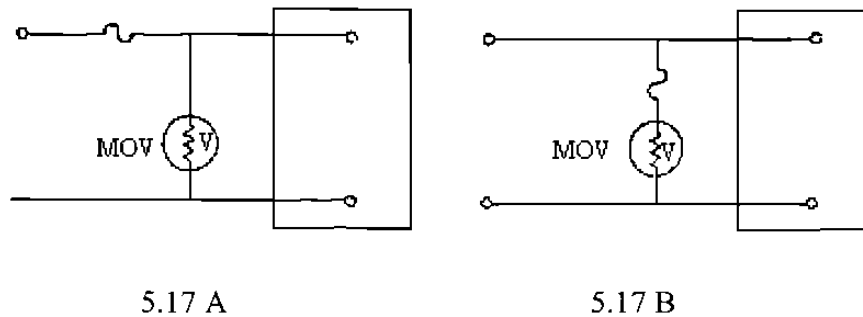


FIG. 5.1.7 Dos métodos de protección usando fusibles.

Esto hace resaltar un punto interesante. Hoy en día hay muchos productos para computadoras personales, como supresores transitorios, construidos dentro de la barra de potencia o dispositivos que se conectan a la caja de energía de la cual se alimenta la computadora, la mayoría de estos dispositivos no tienen forma de indicar si un golpe fuerte de energía lo ha puesto fuera de servicio. Normalmente los dispositivos de protección son MOV's o diodos de avalancha, y sabiendo que sobrevoltajes de 1200 volts se dan una vez cada dos semanas y no hay que indique que el supresor haya operado, podemos pensar que aún están ahí y realmente ya la protección no existe. Por lo que para estar seguros de que se tiene protegido su equipo sensible, sería mejor que adquiriera dispositivos de calidad.

5.3 MÉTODOS DE ACOUPLE DE LOS SOBREVOLTAJES EN EQUIPO ELECTRÓNICO SENSITIVO.

Los mecanismos de acoplamiento para ondas de voltaje o corriente de gran crecimiento en un tiempo corto, pueden categorizarse como: de espacio libre o de alcance de campo.

5.3.1 ACOPLAMIENTO DE ESPACIO LIBRE

La onda de energía en el acoplamiento de espacio libre, puede dividirse en dos rangos: de campo cercano y de campo alejado. El rango de campo cercano involucra a los conductores que están lo suficientemente cerca que pueden generar acoplamiento inductivo (magnético) o capacitivo. El rango de campo alejado involucra la radiación e intercepción de ondas electromagnéticas como el principal mecanismo de acoplamiento.

5.3.2 ACOPLAMIENTO INDUCTIVO (MAGNÉTICO) (CAMPO CERCANO).

Los circuitos electrónicos sensitivos que están físicamente cerca, pero no en contacto directo con una fuente de ondas de sobrevoltaje, pueden sufrir daños sin que aparezca un arco o descarga. Debido a la gran característica di / dt de la onda, los voltajes pueden ser electromagnéticamente inducidos en los conductores cercanos. Este efecto está descrito en la fig. 5.3.1 para el caso de ondas en el conductor de bajada a tierra de las puntas pararrayos. El voltaje inducido en ese instante es función de la geometría de la malla, la distancia del conductor de bajada y la razón del cambio de corriente.

Este acoplamiento no deseado de la fuente de ondas de energía en los circuitos sensitivos, es posible darse por la colocación de cualquier conductor que lleve una corriente y se encuentre en la proximidad de los circuitos.

El área encerrada por la malla de los circuitos sensitivos es un parámetro importante, a mayor área menores problemas de acoplamiento. La magnitud del voltaje inducido en los circuitos sensitivos no es función de la impedancia de los mismos, la magnitud del voltaje es igual para circuitos de lata o baja impedancia, y esto puede ser problemático para los de baja impedancia o circuitos sin protección contra sobrevoltajes.

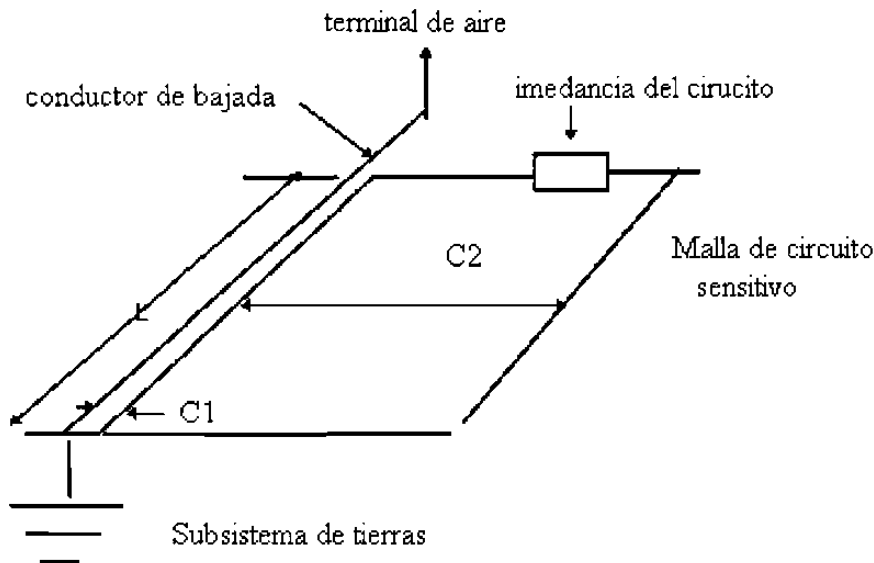


FIG. 5.3.1 Acoplamiento inductivo de onda de corriente al equipo sensitivo adyacente.

5.3.3 ACOPLAMIENTO CAPACITIVO (ELECTROSTÁTICO) (CAMPO CERCANO).

Este tipo de acoplamiento de la fuente de onda de energía, es un fenómeno electrostático, y puede darse entre circuitos muy próximos entre sí.

Los parámetros importantes son: el espaciamiento, el área mutua expuesta y la constante dieléctrica entre la fuente y el circuito sensitivo. Los niveles de acoplamiento dependen también de la amplitud y de la razón del cambio de voltaje, capacitancia de acoplamiento, capacitancia de dispersión del circuito sensitivo así como la impedancia del mismo.

En bajas frecuencias acopladas capacitivamente, el voltaje se incrementa con el incremento de la capacitancia de acoplamiento y con el crecimiento de la impedancia del circuito sensitivo. En altas frecuencias los voltajes de acoplamiento crecen con el incremento de la capacitancia de acoplamiento y con la disminución de la capacitancia de dispersión del circuito.

5.3.4 ACOPLAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO (CAMPO LEJANO).

Para los circuitos sensitivos este acoplamiento ocurre cuando el circuito actúa como una antena receptora para la energía electromagnética. La corriente inducida de este modo aumenta con la intensidad del campo magnético en la vecindad del circuito y así mismo con la efectividad del circuito actuando como antena. La magnitud del campo es función inversa de la distancia de la fuente de radiación. La efectividad del circuito actuando como antena, depende de su longitud y geometría relativa a la longitud de onda de la señal de ruido. El circuito sensitivo exhibe la necesaria condición de resonancia al interferir las frecuencias del campo.

5.3.5 INTERACCIÓN CON CABLES ENTERRADOS.

La medida y análisis de los voltajes transitorios inducidos por cables enterrados indican que son una función de los parámetros del cable o cables, profundidad, resistividad del suelo, forma de las terminales del cable, agregado a lo que puedan proporcionar elementos propios de la misma construcción del edificio, como tuberías de agua, líneas de potencia y otros conductores cercanos. Otros parámetros importantes son la longitud del cable y la capacidad dieléctrica del forro del cable. La resistividad del suelo es importante en la determinación de las ondas de voltaje inducidas por rayos, el voltaje pico y la corriente de transitorio son aproximadamente proporcionales al cuadrado de la resistividad del suelo.

Los cables enterrados muy profundamente, sufren menos el efecto de los golpes del rayo, debido a una gran atenuación de las ondas de alta frecuencia cerca de la superficie

de la tierra, del mismo modo el hilo de guarda de las líneas aéreas sobre los cables enterrados, pueden reducir el impacto de las corrientes a tierra.

5.3.6 INTERACCIÓN CON CABLES AÉREOS.

El uso de conductores aéreos para interceptar descargas de origen atmosférico, para la protección de los cables que están por debajo de estos conductores, es una práctica común. Existen varias teorías que explican la zona de protección de estos cables de protección o hilos de guarda.

Los diferentes daños ocasionados por las descargas ya han sido estudiados, y las estrategias de protección básicamente consisten en desviadores de onda de corriente e hilos de guarda aterrizados. Los sistemas de distribución están formados de cables aéreos que forman mallas de formas geométricas diversas, en general.

El voltaje inducido de circuito abierto en estas mallas es una función del tamaño de la malla y de la razón del cambio del flujo magnético a través de la sección transversal de la malla. Dependiendo de la severidad de la onda y de la susceptibilidad del equipo sensitivo pueden darse tres tipos de daños:

Daños a la información o líneas de datos, esfuerzos en la circuitería y destrucción de la misma. Las líneas de datos son susceptibles a interferencias de ondas de sobrevoltaje por conducción, acoplamiento inductivo o capacitivo y radiación electromagnética.

Esfuerzos en la circuitería son debidos a simples descargas u ondas por switcheo que a menudo causan daños que contribuyen a la falla de los aparatos. La tercer posible causa de daño es la destrucción total del a circuitería.

5.4 PRÁCTICAS RECOMENDADAS DE DISEÑO PARA EVITAR DAÑOS POR SOBREVOLTAJES.

Existe una gran cantidad de recomendaciones para que el diseño, selección e instalación de los modernos equipos electrónicos, como las que ofrece el IEEE para este particular. Las instalaciones de equipo sensitivo, grandes o pequeñas serán afectadas por

una serie de códigos, estándares y regulaciones que le darán al proyecto las garantías de seguridad en el funcionamiento de las mismas.

Todas las recomendaciones irán dirigidas, sin duda, hacia la seguridad del personal que opera estos equipos así como a la conservación de los mismos. Desde la selección de un sistema trifásico contra un sistema monofásico, la correcta selección de los voltajes de operación, el cálculo correcto de los calibres de los cables alimentadores, el cálculo de la caída de tensión en los alimentadores, la selección de un sistema de energía ininterrumpida, la selección del sistema de tierras más adecuado para el aterrizaje seguro del equipo, así como el sistema de aterrizaje del edificio.

La correcta selección de los conduits y ductos abiertos o cerrados que llevarán conductores eléctricos, deberán respetar los lineamientos dados por el Código Nacional Eléctrico en vigor.

5.5 PRÁCTICAS RECOMENDADAS PARA LA INSTALACIÓN.

Diferentes recomendaciones son establecidas para la correcta instalación de los dispositivos protectores contra las sobretensiones, pero en particular comentaremos la denominada protección multietapa. Las trampas de sobrevoltaje son apropiadas para colocarse en diversos sitios desde la entrada de servicio hasta la propia computadora, incluyendo la línea de datos. Hay que asegurarnos que, puesto que las ondas serán llevadas a tierra, las trayectorias de diversificación no provoquen otro problema, también cuando estos dispositivos fallan pueden incendiarse, por lo tanto deberán encapsularse adecuadamente. La selección de uno u otro dispositivo debe ser apropiada al transitorio que va a proteger. La fig. 5.5.1 muestra una forma de protección multietapa. Esto se puede ver como tres etapas de protección, la primera etapa desvía impulsos que contienen una gran cantidad de energía a tierra. Unos cuantos nanosegundos de energía se fugarán pasando esta etapa, tubos de gas nos protegerán de esta gran cantidad de energía destructiva, pero esto requiere una elevada entrada de energía para disparar el tubo de gas y el disparo crea condiciones transitorias de voltaje y corriente suficientes para dañar el equipo de computo. La segunda etapa es un inductor o resistor, un inductor bien diseñado ofrece una impedancia despreciable a la onda senoidal de A.C. pero ofrece

una alta impedancia a los transitorios de rápido crecimiento con el tiempo. Quince pies de alambre o más pueden tener el mismo efecto inductivo. Esta impedancia actúa como una barrera al transitorio atrapándolo mientras los otros supresores tienen tiempo para reaccionar, RFI y el ruido ven la misma impedancia que un transitorio de rápido crecimiento.

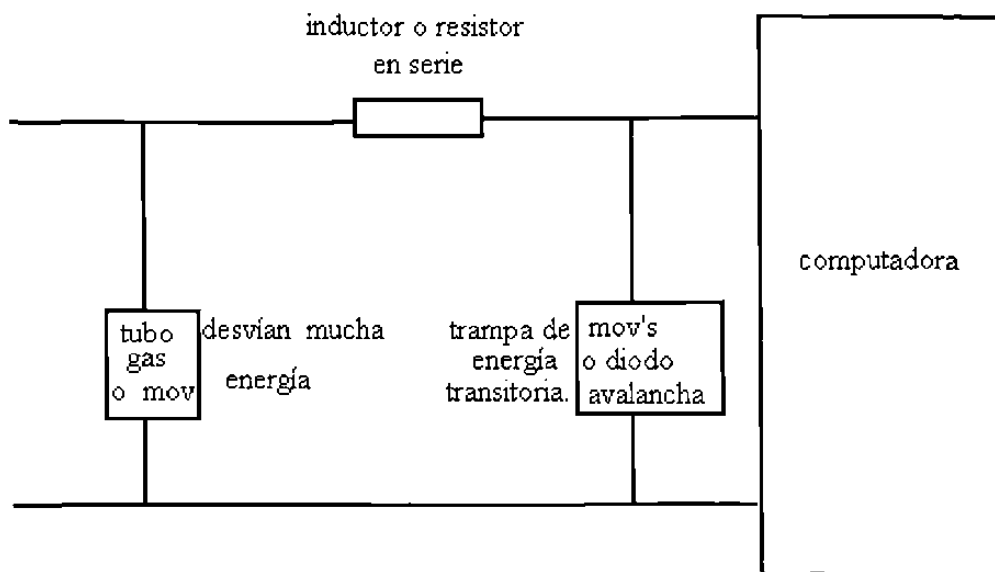


Fig. 5.5.1 Combinación típica de varios elementos para protección de transitorios.

5.5.1 INSTALACIÓN DE SUPRESORES.

Como se ha venido comentando, hay diferentes localizaciones apropiadas para la colocación de trampas de sobrevoltaje, esto incluye la entrada y salida de transformadores, moto-generadores, sistemas de energía ininterrumpida y sus switches de paso automáticos, y las entradas al equipo de cómputo. Se debe enfatizar siempre en un buen sistema de aterrizamiento y en la adecuada colocación del supresor especialmente dispositivos del tipo pata de cabra (crow bar). La operación de este

dispositivo consiste en pasar grandes cantidades de energía a tierra. En la fig. 5.5.2, podemos observar una línea de datos entrando al edificio, se han colocado apartarrayos multietapa cerca de la entrada del edificio y aterrizados a una varilla de tierra. El equipo de comunicaciones computarizado está conectado a una toma distinta de tierra.

Podemos ver que hay un camino a través de la línea de datos, a través de la comunicación I.C. la cual es alimentada de una fuente que está aterrizada a través del alambre verde de tierra. Aquí podemos observar también un camino a través de la tierra regresando al apartarrayos. La inductancia de la terminal verde de tierra podría ser lo suficientemente grande de tal manera que durante la conducción de la terminal pueda ser mayor que lo que pueda soportar el I.C.

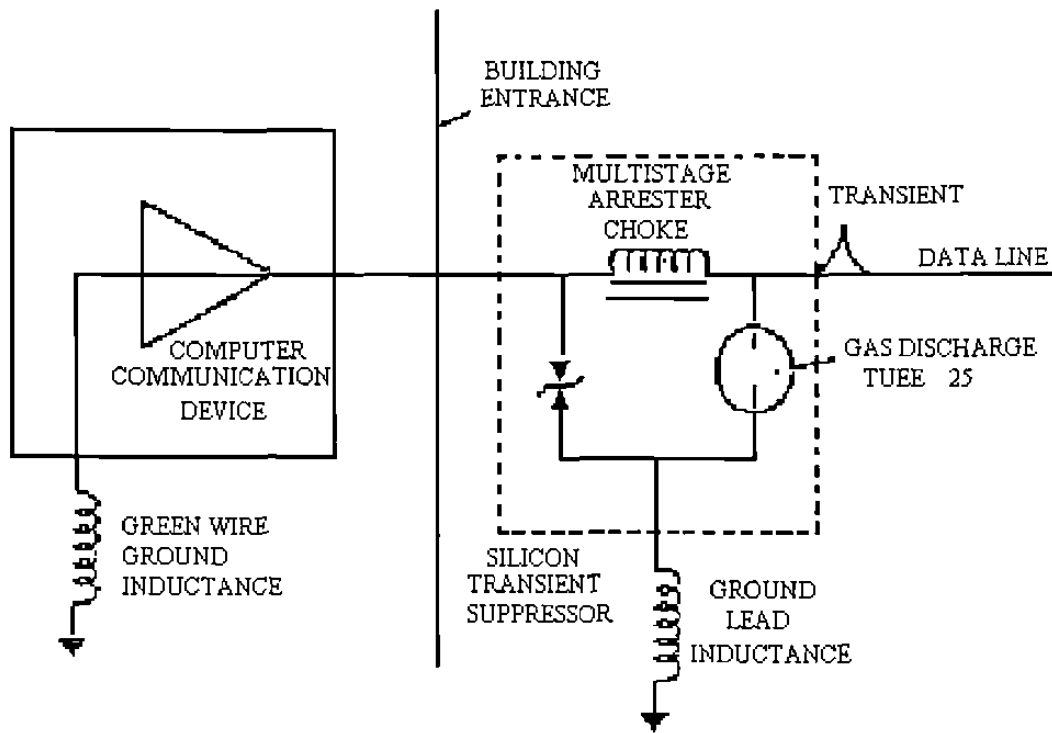


FIG 5.5.2 Apartarrayos son a menudo puestos en la línea de datos de entrada al edificio o cuarto de computo.

El voltaje que el I.C. ve es la suma del voltaje de trampeo del apartarrayos y la caída de voltaje a través de la terminal de tierra de la inductancia. Si el transitorio es atrapado por el supresor digamos a unos 30 volts, la impedancia a tierra del dispositivo puede ver unos 200 volts desarrollados a través de ella debido al flujo de corriente. El I.C. verá 200 volts entre la línea de datos y tierra y con esto borra el I.C. La solución a este problema es conectar la terminal de tierra de los supresores de transitorios a un punto de tierra del sistema de tierras del edificio, esto mantendrá alejada la onda de corriente de la computadora. Si esto no es posible, la práctica indica que la línea de datos entra al edificio en las cercanías de la computadora. Si este fuera el caso, lo más lógico sería enlazar la tierra de los supresores de transitorios a un punto del plano de tierra de la computadora. Con esto realizado, la caída de 200 volts será igual por la computadora y el supresor, esto significa que ambos el I.C. y la línea de datos están referidos a 200 volts, ahora el I.C. sólo verá los 30 volts atrapados en la línea de datos. A nuestro equipo no le interesa si están referenciados a un plano de tierra de 20 000 volts, cuando este voltaje está equilibrado entre los gabinetes, el equipo opera adecuadamente, y la tierra mantendrá un adecuado camino en el circuito. Extrañamente este plano de tierra de 20 000 volts ha ocurrido durante tormentas eléctricas, y en esas condiciones las luces podrán parpadear pero la computadora seguirá trabajando como si nada pasara.

5.6 TIERRA DE EQUIPO.

Se define como tierra de equipo a la continua y permanente unión de todas las partes metálicas expuestas no portadoras de corriente, de equipo fijo (conduits, charolas, cubiertas de paneles, cubiertas metálicas de motores) y la conexión de este sistema al de electrodos de tierra de edificio ya sea en el equipo de servicio o en el secundario de un transformador de un sistema interior separado.

OBJETIVOS.

1) Asegurarse que no exista la posibilidad de electrocutamiento del personal en el área, limitando el voltaje a tierra de cualquier parte metálica no diseñada para conducir corriente en condiciones normales de operación.

2) Evitar daño térmico. Proveer una capacidad adecuada de conducción de corriente (en magnitud y duración), para aceptar la corriente de falla a tierra permitida por el sistema de protección de sobrecorriente, sin crear incendio o explosión en el edificio.

3) Asegurar el desempeño óptimo del sistema de protección. Facilitar la rápida apertura de los dispositivos de protección contra sobrecorrientes en caso de una falla a tierra.

En un sistema eléctrico que contenga circuitos sensitivos, puede haber varios subsistemas conectados a un sistema de tierras. Las partes metálicas no portadoras de corriente deben estar puestas a tierra según se ha comentado anteriormente.

La circuitería electrónica que provee el control de la potencia tiene un punto de referencia cero llamado "común". Cuando un gabinete de control está aterrizado, significa que está conectado a la tierra del sistema de distribución del edificio, además es necesario que el común del equipo electrónico esté conectado a la tierra del sistema de distribución del edificio en una forma especial, generalmente a través de una capacitancia

Mantener un conductor de tierra de equipo muy cerca de los conductores de fase de corriente alterna es absolutamente esencial, para asegurar una mínima impedancia en el camino de retorno de la corriente de falla a tierra (ejem. que el conductor de tierra de equipo esté en el mismo conduit, cable, charola, canalización o que su trayectoria sea muy cerca de los demás conductores de fase), entonces la impedancia del circuito de falla tiene reactancia inductiva mínima debido a la cancelación mutua de los campos magnéticos alrededor de los conductores. Bajo estas condiciones de impedancia mínima,

el voltaje de tierra y la corriente de corto circuito es la máxima posible para abrir los dispositivos de protección.

5.7 REQUISITOS DEL CÓDIGO NACIONAL ELÉCTRICO.

Como ya se ha mencionado, la instalación de aparatos eléctricos de cualquier índole, esto incluye los que contienen circuitos eléctricos sensitivos, deberá cumplirse con una serie de códigos, estándares o limitaciones para que la instalación de los equipos sea segura para la operación del personal así como para el equipo. Deberá observarse el Código Nacional Eléctrico del cual hemos incluido algunas recomendaciones al respecto.

Equipo que tiene que ser aterrizado:

Toda cubierta metálica que rodea conductores debe estar puesta a tierra.

Las partes metálicas expuestas (que normalmente no conducen corriente) de equipo fijo o conectado por métodos fijos de cableado. Esto incluye: paneles o gabinetes eléctricos, motores, elevadores y grúas.

Las partes metálicas expuesta (que normalmente no llevan corriente) de equipo conectado por intermedio de cables de uso rudo, deben estar aterrizados.

Métodos de puesta a tierra: El circuito de retorno a tierra desde circuitos sensitivos, equipos y cubiertas metálicas de paneles y conductores debe

- a) Ser permanente y continuo.
- b) Tener la capacidad suficiente (en magnitud y tiempo) de conducir en forma segura cualquier corriente de corto circuito a tierra que este disponibles.

- c) Tener la impedancia lo suficientemente baja para limitar el voltaje a tierra y facilitar la operación de los dispositivos de protección de sobrecorriente.

Con cada circuito eléctrico extendiéndose desde el equipo de servicio hacia el interior del edificio, se debe llevar un conductor de tierra de equipo junto con o rodeando los conductores de fase.

El conductor de tierra de equipo puede ser uno más de los siguientes:

- a) Conductor de cobre dentro del conduit, charola o canalización junto con los conductores de fase.
- b) Conductor de cobre llevado afuera del conduit que contiene los conductores de fase, pero firmemente atado a él.
- c) Conduit de metal rígido rodeando los conductores de fase.
- d) Conduit de metal intermedio rodeando los conductores de fase.
- e) Conduit de metal flexible cuando el conduit y las conexiones están aprobados para uso como conductor de tierra de equipo y si es de menos de seis metros de longitud.
- f) Charolas y canalizaciones metálicas sosteniendo los conductores de fase.

Si no se usa el conduit como conductor de tierra, entonces debe llevarse un conductor de cobre junto con los conductores de fase en el conduit. Este conductor

adicional debe entonces conectarse a la estructura metálica de los equipos. El calibre del conductor deberá seleccionarse de acuerdo con el Código Nacional Eléctrico.

La filosofía a seguir es que existen dos sistemas de distribución y el común del equipo electrónico. El as estructuras de cada equipo de control deberían estar estas dos tierras presentes con las siguientes características:

1. El común del equipo sensitivo de be ser conectado a un electrodo de tierra artificial de varilla exclusivo y separado del sistema de electrodos del edificio.
2. La cubierta metálica del gabinete de control debe ser conectada al sistema de tierras del edificio.
3. El común del equipo de control debe unirse a la cubierta metálica del gabinete de control por medio de una capacitancia con buenas características de respuesta en alta frecuencia (0.47 microfaradios es un valor típico). Esto minimizará los efectos en los circuitos cuando hay disturbios generados externamente en el sistema de tierras.

CAPÍTULO 6.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1 CONCLUSIONES.

Una vez revisado el contenido de este texto, podemos resumir lo siguiente:

Los sistemas eléctricos de distribución o de potencia todo el tiempo se ven expuestos a los fenómenos del sobrevoltaje en sus diferentes formas de presentación, ya sea estática, por resonancia, por switcheo, por descargas atmosféricas y además, pero esto no excluye a nuestros modernos equipos electrónicos que son bastantes sensibles a este problema, y que de resultar dañados, los costos que representan son muy elevados, por lo que es muy importante tener en cuenta que la protección adecuada de los mismos redundará en un diseño confiable, duradero y al menor costo posible.

En el caso de los sistemas de distribución o de potencia, la protección de los equipos contra las sobretensiones debe tener en cuenta, el valor del voltaje de operación normal y en función de este hacer una adecuada selección de los apartarrayos, que serán los dispositivos de protección, considerando las reglas a seguir dadas en este escrito. Designar o calcular el lugar más adecuado de colocación de estos dispositivos, que como regla práctica, hemos llegado a considerar, que, la mejor colocación de los apartarrayos es estando lo mas cerca posible de equipo que se va a proteger.

Junto con esto debe diseñarse un adecuado sistema de tierras, sobre todo en subestaciones de potencia, donde las corrientes generadas por los sobrevoltajes son

generalmente elevadas, y pueden ocasionar algún daño grave al personal que opera en la subestación. Y un adecuado y correcto diseño, selección e instalación del sistema de tierras, aunado a la correcta selección de los apartarrayos, como dispositivo derivadores de la sobretensión, traerá consigo una operación continua y duradera de la subestación, pero sobre todo que el personal estará adecuadamente protegido.

En cuanto a los sistemas electrónicos, es increíble el número de veces que en una semana, nuestro sistema puede estar expuesto a sobrevoltajes de diferente naturaleza por lo que una adecuada selección de los equipos de protección para estos aparatos sensitivos, nos dará como resultado una continuidad en el servicio, evitará la destrucción de los mismos y/o la pérdida de información que se pudiera tener almacenada.

6.2 RECOMENACIONES.

En cualquiera de los casos, ya sean sistemas eléctricos de distribución o de potencia, o los sistemas electrónicos sensitivos, existe ya una serie de reglas que debemos tratar de cumplir al pié de la letra. Esto quiere decir que en el caso de nuestro país existe un Código Nacional Eléctrico, en forma genérica se la llama Norma Oficial Mexicana (NOM) par el uso de la energía eléctrica, el cual siempre deberá ser consultado al momento de diseñar, calcular e instalar sistemas eléctricos.

Sin despreciar las recomendaciones que los mismos fabricantes de los equipos nos proporcionan en los manuales de instalación y mantenimiento de los mismos.

BIBLIOGRAFÍA

- NOM 001 SEMP 1994 INSTALACIONES
DESTINADAS AL SUMINSTRO Y
USO DE LA ENERGIA ELÉCTRICA.
- I.E.E.E INSTITUTE OF ELECTRICAL
AND ELECTRONICAL ENGINEERS
STD. 1100-1992. POWERING AND
GROUNDING SENSITIVE
ELECTRONICAL EQUIPMENT
- I.E.E.E RECOMENDACIONES
PRÁCTICAS PARA ATERRIZAR
SISTEMAS DE POTENCIA
INDUSTRIALES Y COMERCIALES.
STD. 142-1982.
- N.F.P.A NATIONAL FIRE PROTECTION
ASSOCIATION. N.E.C. 70 1996.
- SIEGERT C. LUIS A. ALTA TENSIÓN Y SISTEMAS
DE TRANSMISIÓN LIMUSA 1988.
- BEEMAN DONALD INDUSTRIAL POWER SYSTEM
HANDBOOK.
MC. GRAW HILL 1955.

LISTADO DE TABLAS

Tabla	Descripción	Página
3.7.1	Valor Estándar de Nivel Básico de Impulso (NBI)	49
3.7.2	Valor Estándar de Nivel Básico de IMPulso (equipo inmerso en aceite)	50

LISTADO DE FIGURAS

Figuras	Descripción	Página
3.1.1	Configuración típica de una nube de tormenta	12
3.1.2	Distribución de cargas en la nube según Simpson	13
3.1.3	Gota de lluvia según Elster y Geitel	14
3.1.5	Orientación del gradiente eléctrico terrestre	16
3.1.7.1	Nube de tormenta con distribución irregular de las cargas eléctricas	19
3.1.7.2	Crecimiento tortuoso de la descarga piloto	19
3.1.9.3	Estructura de dimensiones conocidas, y área de atracción del rayo	24
3.1.9.4	Variación de la distancia radial d en función de i (KA) y H (m)	25
3.1.10	Representación esquemática del proceso de descarga de una nube de tormenta según Schonland y Collens	30
3.3	Forma de onda producida por una descarga atmosférica (STD. I.E.E.E.)	34
3.3.1	Elemento diferencial de una línea de transmisión, en el cual permite derivar las ecuaciones que rigen el comportamiento de la tensión U y la corriente I	36
3.4	Cadena de cuádrupolos circuito equivalente de una línea de transmisión de longitud finita	39
3.5	Nodo de transición, en el cual las impedancias características cambian de valor ($Z_1 \neq Z_2$)	43
3.5.1	Reflexión y refracción en un nodo de transición	45
4.1.1	Representación de un explosor de puntas	54
4.1.2	Representación simplificada de un descargador o apartarrayos autoválvula	57
5.1.1	IEEE 587 onda circular 0.5 μ SEG. 100 KHZ.	61
5.1.2	IEEE forma de onda externa	62
5.1.3	Disparo del gap en 10 nanosegundos	64
5.1.4	Dispositivo de tipo gap	65
5.1.5	Supresor de silicio	67
5.1.6	Varistor de óxido de metal	68
5.1.7	Dos métodos de protección usando fusibles	69
5.3.1	Acoplamiento inductivo de onda de corriente al equipo sensitivo adyacente	71
5.5.1	Combinación típica de varios elementos para protección de transitorios	75
5.5.2	Apartarrayos son a menudo puestos en la línea de datos de entrada al edificio o cuarto de computo	77

AUTOBIOGRAFIA

- Nombre: Adolfo López Escamilla
- Candidato a obtener el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con Especialidad en Potencia.
- Título de Tesis: Protección de Equipo Sensible contra Sobretensiones.
- Título Profesional: Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones
- Lugar y Fecha de nacimiento: China, N.L. 28 de Agosto de 1957.
- Nombre de mis Padres: Sr. Ruben López López † y Sra. María del Socorro Escamilla de López.
- Egresado de la Institución: Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Grado Obtenido: Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones.
- Fecha: Diciembre de 1978
- Actividades Profesionales: Catedrático de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León desde el 1 de Enero de 1980 a la fecha

