

PROTECCION DE SUBESTACIONES DEBIDO A SOBRETENSIONES POR
DESCARGAS ATMOSFERICAS

JOHNNY HERRERA CASTAÑO
JOSÉ RICARDO HURTADO LOMBANA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRÓNICA
CARTAGENA.

PROTECCION DE SUBESTACIONES DEBIDO A SOBRETENSIONES POR
DESCARGAS ATMOSFERICAS

JOHNNY HERRERA CASTAÑO

JOSÉ RICARDO HURTADO LOMBANA

Monografía presentada como requisito para optar al título de Ingeniería
Eléctrica

DIRECTOR

ING. ENRIQUE VANEGAS C

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRÓNICA
CARTAGENA.

Cartagena, 29 de marzo del 2006.

Nosotros, Johnny Herrera Castaño con c.c No 73.557.984 de Arjona y José Ricardo Hurtado Lombana con c.c No 9.295.555 de Turbaco autorizamos a la UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR para hacer uso de nuestro trabajo de grado y publicarlo en el catalogo online de la biblioteca.

Atentamente:

JOHNNY HERRERA CASTAÑO
LOMBANA

c.c. No 73.557.984 de Arjona

JOSÉ RICARDO HURTADO

c.c. No 9.295.555 de Turbaco

Cartagena, 29 de Marzo del 2006.

Señores

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR,
Comité de Evaluación de Proyectos.

Escuela de Ingenierías.

Ciudad.

Estimados señores.

De la manera mas cordial nos permitimos presentar a ustedes para su estudio, consideración y aprobación el trabajo final titulado PROTECCIÓN EN SUBESTACIONES DEBIDO A SOBRETENSIONES POR DESCARGAS ATMOSFERICAS. Presentada para aprobar Minor de Sistemas de Potencia.

Esperamos que este proyecto sea de su total agrado.

Cordialmente.

Johnny Herrera Castaño.

José Ricardo Hurtado Lombana.

Cartagena, 29 de Marzo del 2006.

Señores

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR,
Comité de Evaluación de Proyectos.

Escuela de Ingenierías.

Ciudad.

Estimados señores.

Con el mayor agrado me dirijo a ustedes para poner a consideración el trabajo titulado PROTECCIÓN EN SUBESTACIONES DEBIDO A SOBRETENSIONES POR DESCARGAS ATMOSFERICAS. El cual fue llevado a cabo por los estudiantes Johnny Herrera Castaño y José Ricardo Hurtado Lombana y bajo mi orientación como asesor.

Agradeciendo su amable atención.

Enrique Vanegas C.

NOTA DE ACEPTACION

PRESIDENTE DEL JURADO

JURADO

JURADO

A Dios,

A mis padres por su incansable apoyo

A mi hermana por todo su respaldo

José Ricardo Hurtado Lombana.

A Dios por la vida y la perseverancia,

A mis padres por su incondicional apoyo

A mi Esposa y mis hijas que son el motor de mi vida

Johnny Herrera Castaño.

PROTECCION EN SUBESTACIONES DEBIDO A SOBRETENSIONES
POR DESCARGAS ATMOSFERICAS

MONOGRAFIA

PRESENTADO POR

JOHNNY HERRERA CASTAÑO
JOSE RICARDO HURTADO LOMBANA

DIRECTOR

ING. ENRIQUE VANEGAS

UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE BOLIVAR
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA
CARTAGENA

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCION	
2. DEFINICION	14
3. TEORIA DEL RAYO.....	20
4. DESCARGADORES DE SOBRETENSION.....	25
5. TIPOS DE SOBRETENSIONES.....	30
5.1. Sobretensiones Externas.....	31
5.2. Sobretensiones nternas.....	37
5.3. Tipos de Sobretensiones por Maniobra.....	39

6. CLASIFICACION DE LOS DST.....	42
6.1. DST Tipo Estación de Oxido de Zinc.....	42
6.2. DST Autovalvulares.....	45
7. LIMITACION DE LAS SOBRETENSIONES MEDIANTE UN DST.....	48
8. PARAMETROS CARACTERISTICOS DE LOS DST AUTOVALVULARES.....	48
9. MARGEN DE PROTECCION DE UN DST.....	54
9.1. Margen de Protección de un DST Contra Sobretensiones Atmosféricas.....	54
9.2. Margen de Protección de un DST Contra Sobretensiones Por Maniobras.....	55

10. DST AUTOVALVULARES TIPO LV DE DISTRIBUCION.....	57
10.1. Aplicación.....	58
10.2. Ventajas.....	59
10.3. Operación.....	65
11. OPERACIÓN DEL INDICADOR DE FALLA.....	63
12. DST DE OXIDO DE ZINC	74
12.1. Características de Protección de los DST de Oxido de Zinc.....	79

13. EFECTO DE LA DISTANCIA ENTRE LOS DST Y EL EQUIPO POR PROTEGER.....	80
14. EFECTO DE LA LONGITUD DE CONDUCTOR DE CONEXIÓN DEL DST.....	83
14.1. Selección del DST.....	83
14.2. Tension Nominal del DST.....	84
15. METODOS DE COORDINACION DE AISLAMIENTO.....	92
16. INSTALACION DE LOS DESCARGADORES DE SOBRETENSION.....	100
17. CONCLUSIONES.....	112
18. BIBLIOGRAFIA.....	114

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Descargas de tierra	23
Figura 2. Relación tensión corriente en un DST.....	25
Figura 3. Carga atrapada en una línea de energía eléctrica.....	33
Figura 4. Onda completa normalizada (1.2 x 50uSeg).....	34
Figura 5. Probabilidad de corrientes de rayo.....	35
Figura 6. Distribución de frente para onda de corriente de rayo.....	35
Figura 7. Distribución de la magnitud de corrientes de rayo.....	35
Figura 8. Curva Tensión –Corriente de una resistencia no lineal de un DST.....	45

Figura 9. Curva de funcionamiento de los DST autovalvulares.....	46
Figura 10. Concepto de margen de protección.....	55
Figura 11. Indicador de falla.....	67
Figura 12. Paso normal de una descarga y su corriente resultante de baja frecuencia.....	70
Figura 13. Operación del indicador de falla si un cilindro autovalvular fallara y no limitara el flujo de la corriente resultante de baja frecuencia.....	71
Figura 14. Característica Tensión – Corriente de un bloque de oxido de Zinc.....	74
Figura 15. Longitud del cable de conexión al DST.....	81

Figura 16, 17 Relación R_0/XI para la determinación del factor de conexión a tierra.....	85
Figura 18. Relación R_0/XI para la determinación del factor de conexión a tierra.....	87
Figura 19. Zona de protección de un DST.....	101
Figura 20. Sobretensión en función de la distancia.....	105

1. INTRODUCCIÓN

Desde tiempos inmemorables el hombre se ha preocupado por proteger sus equipos en las instalaciones eléctricas, contra las grandes sobretensiones, que perjudican a dichos equipos y sus aislamientos que pueden ser origen de otras fallas en el sistema, y lo relacionado con la protección contra estas sobretensiones por medio de la coordinación de aislamiento.

Las sobretensiones que se presentan en los sistemas eléctricos pueden ser de tres tipos; por descargas atmosféricas, por maniobras de interruptores y a la frecuencia de sistema. De todas estas la más común y la que produce los efectos más severos es la debida a descargas atmosféricas o por rayos. Es básicamente esta la razón por la cual en el presente trabajo de monografía nos dedicaremos a la protección en subestaciones eléctricas contra sobretensiones por maniobras y por descargas eléctricas por medio del DST.

2. DEFINICIONES

Aislamiento externo. Comprende las superficies aislantes externas de los aparatos, el aire ambiente que lo rodea y las distancias en aire. La rigidez dieléctrica del aislamiento externo depende de las condiciones atmosféricas, tales como la contaminación, la humedad, etc.

Aislamiento interno. Comprende aislamientos internos sólidos, líquidos o gaseosos que forman parte del aislamiento de los equipos que están protegidos de los efectos atmosféricos, tales como contaminación, humedad y otras condiciones externas.

Aislamiento autorrecuperable. Es el aislamiento que recupera totalmente sus propiedades aislantes después de una descarga disruptiva causada por la aplicación de una tensión de prueba.

Aislamiento no autorrecuperable. Es el aislamiento que pierde sus propiedades aislantes o que no las recupera completamente después de una descarga disruptiva causada por la aplicación de una tensión de prueba.

Sistema con neutro aislado. Es un sistema cuyo neutro no tiene ninguna conexión intencional a tierra, excepto a través de aparatos de señalización, de medición o de protección de muy alta impedancia.

Sobretensión. Cualquier valor de tensión (en función del tiempo) entre una fase y tierra o entre fases que tengan un valor cresta o valores que los excedan (obtenidos de la tensión máxima de diseño del equipo).

$$\left(\frac{\sqrt{2}V_m}{\sqrt{3}}, \sqrt{2}V_m\right)$$

Sobretensión por maniobra. Para una sobretensión de fase a tierra o fase a fase en un punto dado del sistema, debida a una operación específica de maniobra de interruptores, falla u otra causa, la forma como puede referirse, para los propósitos de coordinación de aislamiento, es semejante a aquella del impulso normalizado usado para las pruebas de impulso por maniobra.

Tales sobretensiones tienen, por lo general, un alto amortiguamiento y corta duración.

Sobretensión por rayo. Para la sobretensión de fase a fase o de fase a tierra, en un punto dado del sistema, debida a una descarga atmosférica (rayo) o alguna otra causa, la forma como puede referirse para los propósitos de coordinación de aislamiento, es semejante a aquella del impulso normalizado usado para las pruebas de impulso por rayo. Tales sobretensiones son por lo general unidireccionales y de muy corta duración.

3. TEORIA DEL RAYO

Descarga Atmosférica. — Debido a que las descargas atmosféricas son fenómenos naturales que no tienen relación con los sistemas eléctricos su estudio para los propósitos del diseño y protección de las instalaciones en alta tensión (línea de transmisión y subestaciones), se orienta principalmente hacia

la formación de los rayos y el mecanismo de descarga (arcos eléctricos). También es importante el conocimiento estadístico del número de descargas atmosféricas que se presentan en una determinada región geográfica y las características de las mismas, con el objeto de que se puedan cuantificar en cuanto a frecuencia de ocurrencia se refieren.

Sabemos que aun en tiempo normal, en la atmósfera tienen lugar fenómenos eléctricos. En tiempo sereno el potencial va aumentando con la altura a partir del suelo y con valores decrecientes del gradiente; las superficies equipotenciales son sensiblemente planos horizontales, adaptándose, sobre todo en las capas bajas, á las irregularidades del suelo, pero en el momento de la tempestad este campo eléctrico normal puede hallarse notablemente perturbado; las nubes consideradas como cuerpos conductores o semiconductores, pueden hallarse cargadas con grandes cantidades de electricidad y, por tanto adquieren potenciales elevadísimos de uno u otro signo, cuando la diferencia de potenciales entre una nube y la tierra es suficiente para que, a la distancia que se hallan, pueda verificarse la descarga, salta la chispa que se conoce con el nombre de rayo. Si tiene lugar entre la

nube y el suelo, se llama Relámpago, si la descarga tiene lugar entre dos nubes a diferente potencial, el rayo y relámpago van acompañado del trueno.

La descarga eléctrica entre una nube tempestuosa y el suelo se conoce también con los nombres de Centella, Exhalación y otros, pero ellos no corresponden más que a mayores o menores grados de intensidad de la descarga.

La descarga eléctrica se presenta cuando la diferencia de potencial entre nubes o entre nubes y tierra excede a la rigidez —dieléctrica del aire (30 KV/cm).

Estas descargas o rupturas dieléctricas del aire se pueden presentar con las siguientes variantes:

— Descarga de nube a nube.

— Descargas de tierra.

- a). Descarga positiva descendente.
- b). Descarga negativa descendente.
- c). Descarga positiva ascendente.
- d). Descarga negativa ascendente
- e). Descarga ascendente—descendente (de retorno).

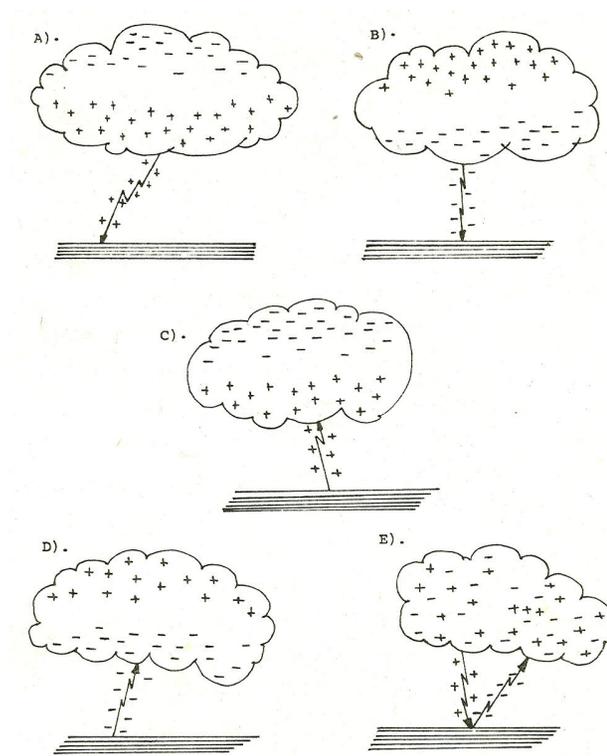


Figura No. 1: Descargas de Tierra

4. DESCARGADOR DE SOBRETENSION (DST)

Definición: Es un dispositivo para proteger aparatos eléctricos de altas tensiones transitorias, se encuentra conectado entre línea y tierra; también sirve para limitar la duración y amplitud de la corriente del rayo a tierra.

Se puede decir que las funciones de un DST son:

1. Limitar Los sobrevoltajes que se presentan entre sus terminales
2. Presentar una baja impedancia para facilitar el paso de la corriente del rayo a tierra.
3. Auto operarse (restablecerse) después de que la onda ha pasado.

Las características de protección del DST se pueden dividir en dos partes:

- a) La Tensión de Arqueo o magnitud de la tensión a la cual se produce el

arqueo en el DST es una función de la forma de Onda y la atención aplicada.

- b) La Tensión de descarga o tensión causada por el flujo de corriente a través del DST (se refiere a la caída de tensión IR en el DST es una función de la onda y la magnitud de la corriente).

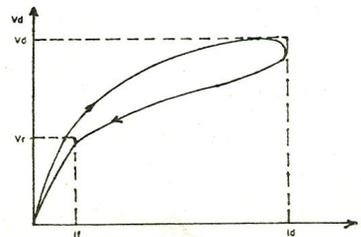
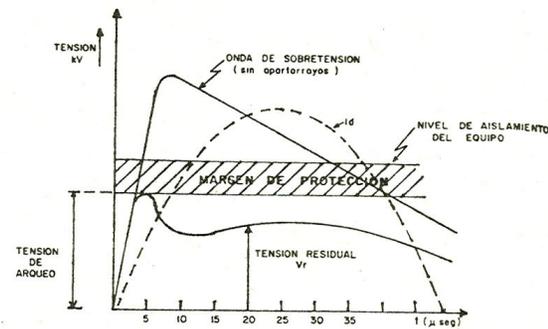


Figura 2. Relación Tensión corriente en un DST

Para una onda de tensión de valor cresta V que ha recorrido una cierta distancia a lo largo de una línea de transmisión, la tensión residual después del arqueo se determina para dos casos:

- a). línea terminada en subestación (punto de localización del DST)
- b). línea continua (instalación intermedia del DST).

- a) Para una línea terminada en subestación, la corriente de descarga (I_d) del DST considerado como localizado en la subestación externa se determina como:

$$I_d = \frac{2 \text{ (BIL)}}{Z_0}$$

- ∅ BIL= Nivel Básico de Aislamiento de la línea en Kv. Es un valor de referencia para la resistencia del aislamiento al impulso. Expresado en términos del valor de cresta de la tensión permisible al impulso de rayo

normalizado.

TENSION NOMINAL	VOLTAJE MAXIMO	BIL
66 kV	72.5kV	350
115kV	123kV	550
230kV	245kV	750
		850
		900
		1000
		1050
400kV	420kV	

∅ Z_0 = Impedancia natural o característica de la línea en Ohms.

b) Para la línea continua en la que el DST está localizado en algún punto intermedio la corriente de descarga se tiene como:

$$I_d = \frac{BIL}{Z_o}$$

Para tener una idea de la magnitud de las corrientes de descarga, para la línea de 230 Kv con un BIL de 900 Kv y una impedancia característica de 300 Ohms, si se desprecia la resistencia de DST que da el valor de V_r , en el peor de los casos se tendría:

$$I_d = \frac{2 \text{ BIL}}{Z_o} = \frac{2 \times 900}{300} = 6 \text{ KA}$$

Y para sistemas de menos tensión las corrientes son menores. De registros tomados en algunos países se ha medido que solo 1 al 4% de las corrientes de descargas exceden a 10 KA y sobre un 70% son menores de 2 KA.

5. TIPOS DE SOBRETENSIONES

La protección contra sobretensiones en los sistemas de distribución surge como una necesidad ante la presencia de tensiones peligrosas; las cuales pueden producirse dentro o fuera de la red. Es conveniente proporcionar esta protección ya que las sobretensiones pueden dañar el aislamiento de los equipos (transformadores, capacitores, interruptores, restauradores etc.); así como causar arcos o flameos en los circuitos proporcionando la pérdida de continuidad en el servicio a los usuarios.

El control de las sobretensiones se logra con una adecuada selección y aplicación de: DST, explosores, hilo de guarda, diseños del sistema, práctica de construcción y procedimientos de operación. Sin embargo no es posible diseñar ni operar un sistema de distribución libre de afectaciones con respecto a las sobretensiones, por lo que se debe buscar el equilibrio técnico-económico que proporcione un nivel de protección razonable y que cubra la mayoría de los casos.

Las sobretensiones que se presentan en las redes de transmisión y distribución, pueden dividirse de acuerdo con su origen en dos grandes grupos:

- Sobretensiones Externas
- Sobretensiones internas

5.1. Sobre Tensiones Externas: Se deben principalmente a la incidencia de rayos sobre las líneas, subestaciones, equipo y/o sus proximidades, así como a contacto directo con líneas de mayor tensión. En las redes de distribución, se presentan sobretensiones inducidas (descargas indirectas), por la presencia de descargas atmosféricas que inciden en puntos cercanos a la red. La magnitud de descarga atrapada depende del gradiente nube-tierra y de la proximidad de la descarga. El voltaje inducido por la descarga nube – tierra se propagará a lo largo de la línea en forma de dos ondas viajeras hasta que la sobretención sea disipada por atenuación, falla del aislamiento, drenado a tierra y/u operaciones de DST.

Ver grafica 3.

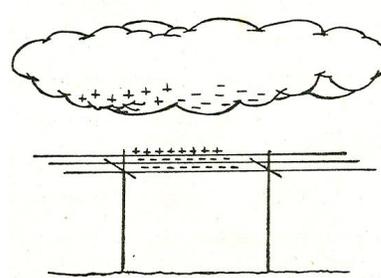


Figura No. 3: Carga atrapada en una línea de energía eléctrica

Las sobretensiones inducidas no sobrepasan habitualmente los 200 Kv y excepcionalmente llegan a los 400 Kv, por lo que generalmente afectan a las líneas de distribución cuyas tensiones de operación son de 35 Kv o menores.

Cuando la descarga atmosférica incide directamente sobre la línea, la tensión se eleva rápidamente en el punto de contacto; esta tensión se propaga en forma de onda viajera en ambas direcciones, rebasando instantáneamente el valor que pueden soportar el sistema de aislamiento. Este tipo de sobretensiones son las menos frecuentes en las instalaciones, sin embargo, pueden causar daños considerables debido a la enorme energía térmica asociada que lleva consigo una descarga atmosférica, pudiendo alcanzar

valores de hasta 100 KA instantáneos y sobretensiones en el punto de impacto del orden de 2000 a 20000 Kv.

La tensión que soporta el sistema de aislamiento varía con la pendiente de elevación de la descarga atmosférica; por lo que, para determinar la tensión que pueden soportar los aislamientos, se han implementado pruebas de impulso en laboratorios de alta tensión. Debido a que no resulta práctico reproducir y probar con toda la gama de formas de onda que puede presentar un rayo, la industria eléctrica ha normalizado una forma de onda (1.2 x 50 u seg.) para probar los aislamientos, esta se muestra a continuación. Ver figura 4.

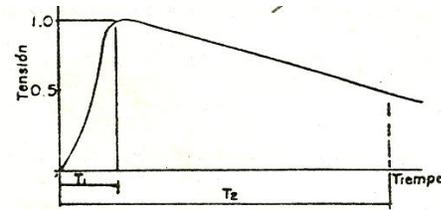


Figura No. 4: Onda completa normalizada ($1.2 \times 50 \mu \text{ seg.}$)

Así mismo la forma de onda y magnitud de la corriente de rayo también presenta una amplia variedad, por lo que la forma de onda normalizada para corriente de rayo es de $8 \times 20 \mu \text{seg.}$ Es decir se incrementa de cero al valor de cresta en $8 \mu \text{seg.}$ y decae al 50% del valor de cresta en $\mu \text{seg.}$

Mediciones en el campo, de las corrientes de descarga por rayo en zonas urbanas, semirurales, etc. Permiten conocer la probabilidad de las corrientes de descarga en DST ver figura 5, así como las distribuciones de la magnitud de corrientes de rayo y frente de la onda de rayo, fig 6 y 7.

Si los conductores de un circuito de mayor tensión hacen contacto con otro de menor tensión, entonces el mismo potencial se presentará en el punto de contacto de ambos circuitos originando la falla de los elementos aislados y la tensión menor, proporcionando la operación de los circuitos de protección hasta la eliminación de la falla.

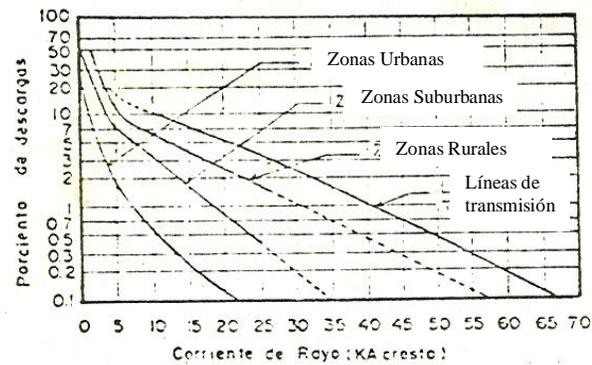


Figura No. 5: Probabilidad de Corrientes de rayo

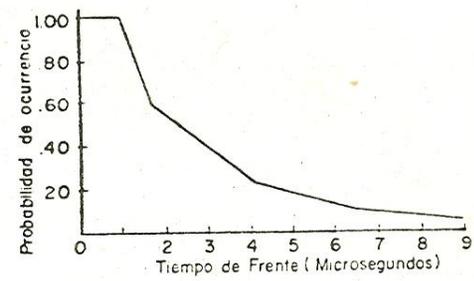


Figura No. 6: Distribución de frente para onda de corriente de rayo

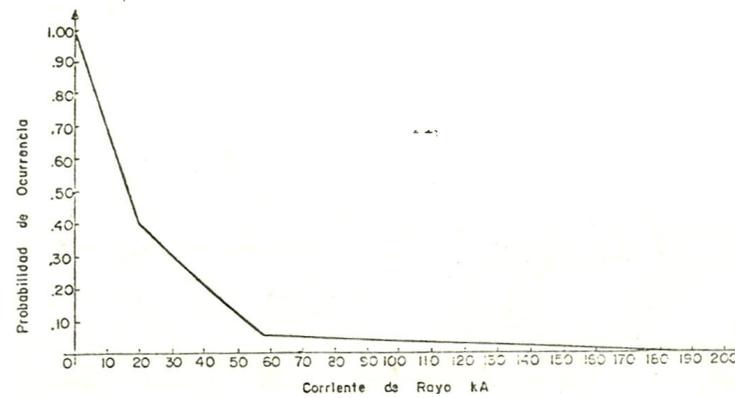


Figura No.7: Distribución de la magnitud de corrientes del rayo

5.2. Sobretensiones Internas:

Estas a su vez pueden clasificarse en dos tipos: Las que se presentan a la frecuencia nominal del sistema (sobretensiones dinámicas) y las que presentan a frecuencias medias (sobretensiones transitorias de frecuencia media).

Las Sobretensiones Dinámicas se presentan cuando existen alteraciones súbitas de las características de la red debida a fallas monofásicas o bifásicas a tierra; de tal forma que si el neutro del sistema se encuentra firmemente conectado a tierra, la sobretensión puede alcanzar valores del orden de 1.4 veces la tensión de fase a tierra o 0.8 veces la tensión entre fases.

En el caso de que el sistema este aislado de tierra, la sobretension puede alcanzar valores desde 1.73 a 2.1 veces la tensión de fase a tierra o de 1.0 a 1.2 veces la tensión entre fases; pudiendo persistir durante horas o hasta eliminar la falla.

Estas sobretensiones también pueden aparecer con la pérdida súbita de carga, el caso mas critico ocurre cuando se alimentan grandes descargas, a través de una red relativamente débil. La amplitud de la sobretensión en este caso puede alcanzar valores de 1.2 a 1.4 veces la tensión de fases a tierra, durante periodos del orden de 0.5 segundos (30 ciclos).

Las sobretensiones transitorias de frecuencia media pueden producirse por todos los procesos de maniobras de interruptores en una red tales como: interrupción de cortocircuitos, desconexión de transformadores y reactores en vacío, etc. En general estas sobretensiones pueden tener una amplitud muy grande con varias formas de onda y con duraciones que oscilan entre varios cientos y varios miles microsegundos.

En el caso de un sistema con el neutro conectado firmemente a tierra, la amplitud de la sobretensión puede alcanzar valores de 2.5 a 3.0 veces el valor de la tensión de fase a tierra y si el neutro esta aislado de tierra, la sobretensión puede alcanzar hasta 5.0 veces el valor nominal de fase a tierra.

Se ha comprobado con estudios experimentales, que las sobretensiones por maniobra determinan las dimensiones y requerimientos del aislamiento en sistemas de 300 Kv o mayores. En los sistemas de distribución, las tensiones empleadas así como, la combinación de capacitancias, inductancias y resistencias son tales que las sobretensiones internas que se presentan no son peligrosas para el sistema de aislamiento; sin embargo sobretensiones peligrosas pueden ocurrir como resultado de recierres en algunos equipos. El fenómeno de Ferroresonancia también puede producir sobretensiones peligrosas; las cuales no son precisamente transitorias ya que pueden ser cíclicas y persistir por largos periodos de tiempo. Este fenómeno se presenta principalmente, en sistemas trifásicos de tres hilos con transformadores conectados con neutro aislado, donde se realicen aperturas o cierres en una o dos fases en condiciones de baja carga.

5.3. Tipos de Sobretensiones por Maniobra.

En niveles de extra alta y ultra alta tensión las sobretensiones por maniobra de interruptores, pueden tener frente de onda del orden de varios microsegundos y

durar varios ciclos de la frecuencia industrial del sistema, y son las que establecen los factores para el diseño y coordinación del aislamiento en los sistemas de transición.

A continuación, se hará una descripción de las operaciones más comunes de maniobra de interruptores, que pueden ocasionar sobretensiones a los componentes eléctricos del sistema, haciendo una subdivisión lógica al considerar dos opciones. Si abre o cierra el interruptor un determinado circuito bajo condiciones normales de operación o de falla, tal como se muestra en la tabla 1.1.

SOBRETENSIONES POR MANIOBRAS DE INTERRUPTORES

TIPO DE OPERACIÓN

A	§	Líneas de Transición en Vacío.
P	§	Cables de energía en vacío.
E	§	Líneas de transición con transformador en vacío.
R	§	Cables de energía con transformador en vacío.
T	§	Banco de capacitores.
U		
R		
A		

	§ Barras Colectoras
	§ Banco de transformadores.
	§ Reactores de compensación.
	§ Tripolar de líneas falladas.
	§ Monopolar de líneas falladas.
	§ Transformadores con carga.
	§ Subestaciones intermedias.
	§ Banco de Transformadores cargado con reactor al neutro.
	§ Perdida súbita de carga con línea de transmisión larga y corta.
	§ Línea de transmisión en vacío con diferentes fuentes de alimentación.
C I E R R E	§ Líneas de transmisión con carga atrapada.
	§ Líneas de transmisión con transformador en vacío.
	§ Reactores de compensación.
	§ Subestaciones intermedias.
	§ Banco de transformadores cargado con reactor al neutro.

Tabla 1.1. Diferentes operaciones de maniobra de interruptores que pueden ocasionar una sobretension al sistema.

6. CLASIFICACIÓN DE LOS DST

6.1. DST tipo estación de óxido de zinc (para sistemas de 115 a 400kV)

Estos deben cumplir con las siguientes características:

1. Ser diseñados para servicio intemperie
2. Deberán operar a una frecuencia de 60 Hz
3. Deberán ser tipo estación.
 - ∅ El nivel de protección al frente de onda corresponde a la tensión de descarga (kV cresta), para una onda de impulso de corriente de 10 kA, cuyo valor de cresta se alcanza en un tiempo de 10µs.
 - ∅ La característica de protección queda definida por el nivel de protección correspondiente al valor de la tensión de descarga al aplicar una onda de corriente de impulso (de 8x20µs) de 5, 10 y 40kA.

- ∅ La capacidad de tensión máxima es la tensión máxima que soporta el DST en forma continua.
- ∅ Deben ser capaces de soportar sin daño una corriente de impulso de $(4 \text{ a } 8) \times (10 \text{ a } 20)$ microseg, con un valor de 100kA y dos descargas.
- ∅ Para baja corriente de alta duración, los DST deben de soportar una onda rectangular de 1000 A de cresta, por 2000 μ s y 20 descargas, de igual forma, corrientes de descargas de línea de transmisión.
- ∅ Deberán tener una capacidad de disipación de la energía de las sobretensiones transitorias de maniobra de interruptores (switcheos), igual 7.2 Kw-segundo/kV.
- ∅ Deberá tener una capacidad de alivio de presión interna producida por una corriente de 40 kA por 0.2 seg.
- ∅ La distancia de fuga de fase a tierra debe estar referida a la tensión nominal de DST dividida entre raíz de tres y expresada en cm/kV al neutro. Esta distancia no debe ser en ningún caso inferior a 3.5cm/kv al neutro.

Condiciones normales de servicio.

Los DST tipo estación de óxido de zinc para sistemas de 115 a 400 kV, deben tener lo siguiente:

- a. Tensión nominal del sistema. Deben diseñarse para operar en las tensiones nominales de los siguientes sistemas de potencia: 115, 138, 161, 230 y 400 kV.
- b. Conexión a tierra del sistema. Se deben diseñar para ser conectados en sistemas con neutro conectado solidamente a tierra.
- c. Temperatura ambiente. Se deben diseñar para una temperatura ambiente que no exceda los 40 grados centígrados.
- d. Altura de operación. Deben diseñarse para operar a una altitud de 1800 m.s.n.m.

Criterios de selección.

Los DST son, por una parte, equipos de protección para limitar los efectos de los rayos y sobrevoltaje por switcheo en redes, y por otro, medios para coordinar los aisladores. Cuando se seleccionan los DST para un trabajo determinado, el siguiente criterio de selección puede adecuarse relativamente a uno u otro:

- ∅ La capacidad de absorción de energía.
- ∅ El nivel de protección.
- ∅ Aspectos económicos.

6.2 DST Autovalvulares:

Este tipo de Descargador de Sobretension corresponde al denominado modelo clásico de DST y están constituidos por explosores en series con resistencias no lineales. Los explosores se mantienen sin descargar mientras que el valor de la sobretensión no sobrepase un cierto límite determinado por la llamada

“Tensión de Operación” de “Designación” o de “Cebado” del DST. Dada su característica no lineal las resistencias actúan como elementos reductores de la sobretensión y la combinación de ambos elementos da la característica de protección requerida.

Para una resistencia no lineal la característica voltaje – corriente, es como se muestra en la figura.

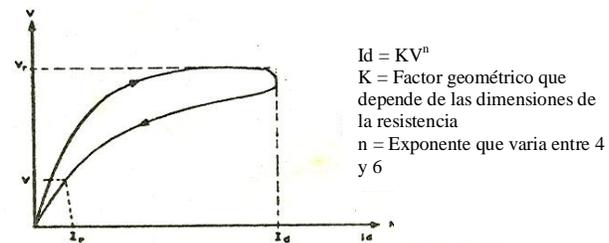


Figura No.8: Curva Tensión- corriente de una resistencia no lineal de DST

La resistencia no lineales están constituidas por pequeños cilindros agrupados por bloques y que son por lo general de carburo de silicio

sintetizado. Los explosores tienen la forma de disco y en algunos casos mediante ionización son preactivado para obtener precisión en la tensión de operación.

El principio de funcionamiento del DST autovalvulares se muestra en la figura siguiente:

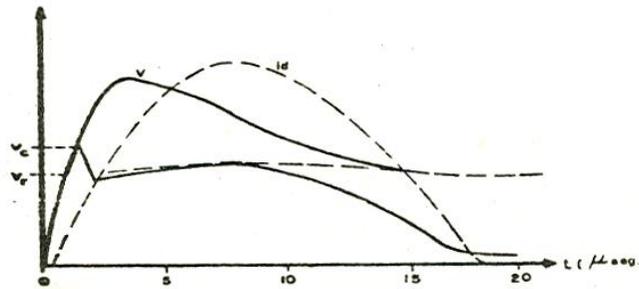


Figura No. 9: Curva de Funcionamiento de los DST autovalvulares

7. LIMITACIÓN DE LAS SOBRETENSIONES MEDIANTE UN DST

Cuando aparece una tensión en las terminales del DST, si se alcanza la tensión de operación V_c se ceban los explosores del DST permitiendo circular a través de las resistencias la llamada corriente de descarga I_d , la corriente produce una caída de tensión V_r denominada tensión residual. Cuando la sobretensión desaparece la corriente a través de las resistencias y en el arco en los explosores correspondientes a la tensión de la red.

8. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LOS DST AUTOVALVULARES

Las características principales a considerar en un DST desde el punto de vista de coordinación de aislamiento son:

- ∅ Tensión Nominal: Representa el valor máximo de la tensión eficaz a frecuencia industrial, que es admisible entre los bornes de un DST y para la cual puede funcionar correctamente, es decir que asegura el descebado de los explosores después de que se han cebado con una sobretensión.
- ∅ Corriente de Descarga Nominal: Se digna así el valor de cresta de un impulso normalizado de corriente con una onda de 8/20 microsegundos empleada por la clasificación de los DST.

Desde el punto de vista de normalización un DST o sus elementos se acepta, cuando pasa la prueba que consiste en aplicar 20 impulsos de onda de corriente con un valor igual a la corriente de descarga con una tensión nominal, el DST no debe sufrir modificación a sus características en forma sensible.

La tensión nominal o de designación de un DST autovalvular se puede calcular en forma preliminar como: $V_n = K_e V_{max}$ donde:

V_n = Tensión Nominal del DST en Kv

K_e = Factor de conexión a tierra y cuyo valor depende de las relaciones R_0/X_1 y X_0/X_1 , siendo R_0 la resistencia de secuencia cero del sistema, X_0 la reactancia de secuencia cero y X_1 la reactancia de secuencia positiva.

En cálculos preliminares se pueden adoptar los siguientes valores:

$K_e = 0.8$ para sistemas con neutro sólidamente conectado a tierra para los cuales se cumple $R_0/X_1 \leq 1.0$ y $X_0/X_1 \leq 3.0$

Para sistemas con neutro flotante o conectados al neutro a través de alta impedancia. Para otros casos se pueden ver los valores en las graficas de la especificación de coordinación de aislamiento.

Este procedimiento de determinación de la tensión nominal solo es aplicable para la protección contra sobretensiones por rayos, tratándose de sobretensiones por maniobra de interruptores el criterio que se aplica es diferente.

La corriente de descarga nominal (I_d) también conocida como corriente de descarga del DST se calcula a partir de las características de protección y nivel básico de aislamiento del sistema o instalación a proteger, se expresa en Kiloamperes y se calcula a partir de la expresión:

$$I_d = \frac{2 E - V_r}{Z_o + R} \quad (\text{kA})$$

Donde:

E = Magnitud de la onda de sobretensión entrante a la subestación, se expresa en Kv y se puede calcular como:

$$E = \frac{2 e}{n}$$

Siendo:

e : Magnitud de la onda incidente en Kv

n : Números de ondas entrantes a la subestación

V_r : Tensión residual en el DST en Kv

Z_0 : Impedancia característica de la línea en Ohms

R: Resistencia de la línea en Ohms

Cuando el número de líneas entrantes a la subestación es cero, la corriente de descarga de DST se puede calcular como:

$$I_d = K \frac{2 BIL}{Z_0} \text{ (KA)}$$

K es un factor que toma en consideración los efectos de las reflexiones sucesivas de la onda del rayo desde el punto de la descarga y que depende de la distancia del DST al punto de la descarga (D) y de la longitud de la cola de la onda, se pueden tomar los siguientes valores para este factor "k".

Valores de K para el Cálculo
De Corrientes de Descargas

Distancia (D) en Metros	Valor del Factor K
700	3
1600	2
3200	1

Desde luego que la incidencia de rayos en puntos cercanos a la subestación es mayor mientras mas alto es el nivel ceraunico de la región de que se trate, por lo que se recomienda que en regiones donde el nivel ceraunico sea superior a 40 el valor de K se tome como mínimo 2.

9. MARGEN DE PROTECCION DE UN DST.

9.1. MARGEN DE PROTECCIÓN DE UN DST CONTRA SOBRETENSIONES ATMOSFÉRICAS

El margen de Protección contra sobretensiones atmosférica que puede proporcionar un DST se obtiene como la diferencia con respecto a la sobretensión máxima permisible de:

- La tensión máxima de descarga con impulsos del tipo rayo.
- La tensión residual para la corriente de descarga nominal.
- La tensión de descarga con impulsos de frente lineal dividido entre 1.15.

La mayor de estas diferencias establece el margen de protección.

$$\text{Margen de Protección} = 100 \times \frac{\text{NBAI} - \text{Máxima Tensión en el DST}}{\text{Máxima tensión en el DST}}$$

9.2. MARGEN DE PROTECCIÓN DE UN DST CONTRA SOBRETENSIONES POR MANIOBRAS

Es la tensión máxima de descarga con impulsos por maniobra. Este dato algunas veces no se da como característica del DST, entonces se puede tomar igual al nivel de protección contra sobretensiones por rayo.

En general el margen de protección varía entre el 10% y el 35%. Normalmente se recomienda los valores mayores para coordinación con impulso por rayo, y menores para coordinación para impulso por maniobra.

$$\text{Margen de Protección} = 100 \times \frac{\text{NBAM} - \text{Máxima Tensión en el DST}}{\text{Máxima tensión en el DST}}$$

Una interpretación gráfica del margen de protección se da a continuación:

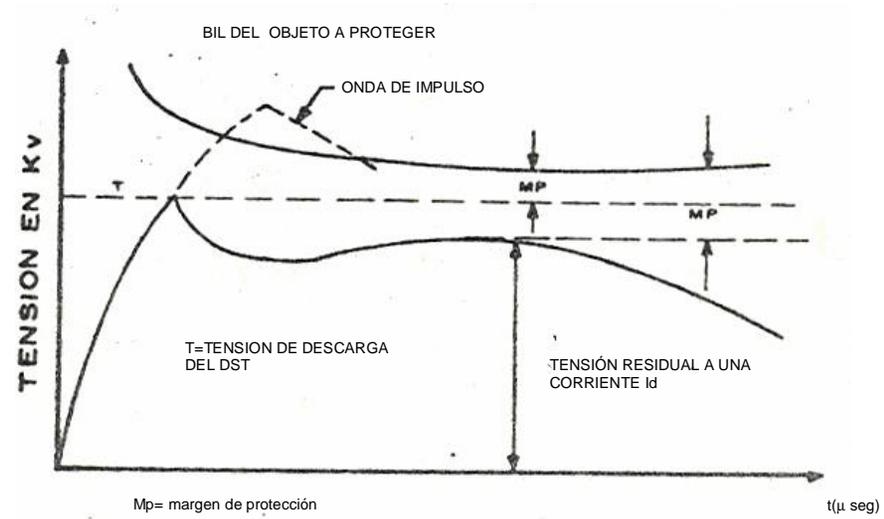
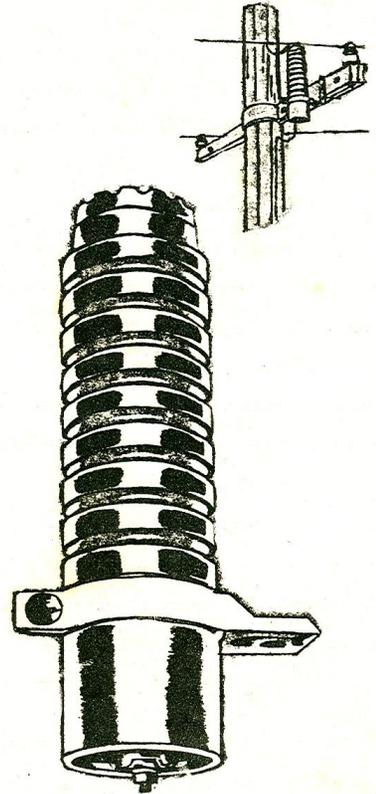


Figura No. 10: Concepto de Margen de Protección

10. DST autovalvulares.



Tipo LV de Distribución

10.1. APLICACIÓN:

El DST autovalvular tipo LV de distribución, da una segura protección contra sobretensiones causadas por rayos o cualquier otro efecto.

Los DST autovalvulares IUSA emplean un número de distancias eléctricas de fuga en serie con cilindros autovalvulares moldeados de carburo de silicio. Cuando una descarga eléctrica cae en la línea, origina un rápido aumento en la tensión, acercándose al límite de aislamiento del equipo de distribución, tales como transformadores o interruptores; el conjunto de distancias de fuga permitirá descargar el impulso eléctrico a una tensión predeterminada y los cilindros autovalvulares pasarán la sobretensión a tierra, sin daño alguno. Puesto que esta descarga crea un camino en corto circuito a tierra para la frecuencia de la corriente de línea, son los cilindros autovalvulares quienes limitan esta corriente a una baja intensidad para que las distancias de fuga puedan interrumpir. La sobretensión del rayo ha sido así eliminada con toda seguridad para proteger el equipo eléctrico de alto costo y el circuito de distribución ha quedado en servicio sin interrupción alguna.

Los DST Autovalvulares tipo LV pueden aplicarse a sistemas con neutro aislado y no aislado, en donde la tensión máxima nominal a través de DST no exceda de la tensión nominal de la unidad.

Los DST tipo LV se fabrican y prueban de acuerdo con las normas AIEE, ASA y NEMA para DST tipo distribución.

10.2. VENTAJAS.

Tuerca Terminal Tipo Volante: El DST IUSA emplea una terminal de apriete manual hecha de baquelita con un inserto de material no ferroso para sujetar la conexión de corriente y aislar la terminal.

Indicador de falla tipo no explosivo: El DST IUSA emplea características que desconectaran con seguridad y en forma no explosiva la terminal de tierra del DST en el remotísimo caso de falla del mismo. Esto previene que se quede la línea conectada permanentemente a tierra y dará una indicación visual de la falla del DST que de otra manera sería difícil de localizar.

Cilindros Autovalvulares: Los cilindros autovalvulares de gránulos seleccionados y probados de carburo de silicio, se moldean bajo presión hidráulica para solidificarlos.

Sello contra la Humedad: Empaques comprimidos y cubiertos con Epoxy o adhesivo se usan para sellar las fugas del cilindro de porcelana o aislador.

a. Tuerca terminal tipo volante.

El volante apropiado de baquelita aislante, con su inserto ranurado de metal no ferroso, permite una segura y positiva conexión de la alimentación de alta tensión del DST, aislando además la terminal.

Esta característica exclusiva elimina el uso de herramientas con la cual el instalador pudiera hacer un apriete excesivo al conectar la línea. Estos esfuerzos podrían dañar fácilmente el sello de cualquier tipo de construcción de DST. Por medio de un apriete manual se puede ejercer solamente un par de

apriete de 1.25 kg-mt. Aproximadamente, sobre el volante, lo cual es mucho menor de lo necesario para dañar el DST. Para lograr una sólida conexión se utiliza rosca fina en la tuerca de apriete.

La parte superior del volante tiene 12 entradas que permiten apretarla fuertemente sin que resbale la mano.

b. Pernos terminales no ferrosos.

Las terminales de línea y tierra están hechas de bronce estañado, resistente a la corrosión, para conductores desde N° 2. Cuatro salientes a la orilla de la parte plana de la terminal, fijan al conductor mientras se gira el volante. La parte inferior de cada terminal está diseñada para evitar que la misma o el sello giren cuando la línea se instala.

La línea a tierra se fija firmemente entre la terminal con sus cuatro saliente y la grapa espacial. Dicha grapa de aleación de cobre está estañada para que pueda usarse indistintamente para conductores de cobre o de aluminio.

La conexión firme del conductor a tierra se hace con la roldana de presión de bronce al silicio y la tuerca que tiene un acabado a base de zinc.

Ambas terminales, la alta tensión y a tierra, son compatibles conductores de cobre o aluminio.

c. Sello Contra la Humedad.

Estudios exhaustivos de compuestos sellantes, materiales de empaque y métodos de ensamble, junto con intensas pruebas de diseño y de producción, han dado como resultado los sellos más positivos contra la humedad y más seguros. Empaques de corcho neopreno, totalmente impermeables a la humedad, van completamente cubiertos completamente con resina epoxy y comprimidos a dos terceras partes de su espesor original, durante el ensamble. Estos empaques se colocan entre la terminal de alta tensión y la porcelana y entre el indicador de falla y la terminal del lado de tierra. La unidad indicadora de fallas se sella al cuerpo del DST por medio de un empaque de neopreno suave con un adhesivo a base de hule sintético. Un compuesto asfáltico se

vacía en la cavidad que existe entre el indicador de fallas y la pared de porcelana, lo cual evita la corrosión de las partes metálicas.

DST Autovalvulares

Tipo LV de Distribución

0 a 2500 metros de altitud. Uso interior o intemperie.

Monofásicas, 3 a 18 Kv

d. Diseño Ventajoso del Aislador.

Las campanas de porcelana aumentan la distancia de fuga dando lugar a un cuerpo de porcelana más corto y ligero.

e. Resorte para Mantener Buen Contacto y su Derivador.

Un resorte de Acero bajo compresión, mantiene todas las partes internas en buen contacto eléctrico. El derivador de cobre elimina efectos inductivos a través de las espiras del resorte, lo que en otra forma alteraría las características de protección del DST.

f. Distancia de Fuga para Aislamiento.

Electrodos separados por espaciadores de porcelana forman una distancia de fuga que aísla la tensión de la línea de tierra bajo condiciones normales. Cuando la descarga se aproxima, aristas metálicas en contacto con el espaciador de porcelana ionizarán anticipadamente el área de la distancia de fuga y así se logrará una descarga positiva en cada operación del DST.

g. Distancia de Fuga de Extinción.

Una serie de placas metálicas separadas por espaciadores de mica, forman la distancia de fuga total que interrumpirá la corriente de descarga en el primer cruce por cero de la senoide correspondiente, originado por el impulso de un rayo que ha sido descargado.

h. Cilindros Autovalvulares.

Estos cilindros están formados por carburo de silicio moldeado. El cilindro descargará un impulso creciente y rápido de un rayo a tierra a través de una baja impedancia, pero presentará una alta impedancia a la corriente de descarga que le sigue, lo cual permite que ésta llegue a un valor donde puedan operar las distancias de fuga de extinción.

i. Indicador de Fallas.

En el raro caso de falla del DST en que la corriente de falla no se interrumpa en un lapso de aproximadamente medio ciclo, la unidad térmica indicadora de fallas no explosiva, entrará en acción para desprender la terminal inferior y la línea de tierra del DST. Esto tiene por objeto dos importantes funciones: 1) Aísla de tierra al DST que ha fallado previniendo el bloqueo de la línea y 2) Es una indicación visual del DST que hay que sustituir.

j. Abrazadera Galvanizada.

La abrazadera de acero galvanizado en caliente permite una fácil colocación en la ménsula de la cruceta, de acuerdo con normas Nema.

10.3. Operación:

a. Cilindro Autovalvular.

La Acción valvular de los DST autovalvulares se lleva a cabo por un cilindro sólido, moldeado, de carburo silicio. Después de que el impulso peligroso de alta frecuencia ha pasado a través de las distancias de fuga y de los cilindros a tierra, el material de carburo de silicio entonces actúa como válvula rápida para reducir a un bajo nivel la corriente de descarga resultante, la cual es una corriente a baja frecuencia del orden de 50/60 c.p.s. Las distancias de fuga interrumpirán el arco y la línea regresará a condiciones normales. Los cilindros son sólidos de cristales de carburo de silicio, comprimidos a dar su forma por

toneladas de presión hidráulica, lo que asegura características constantes de tensión de descarga, aún después de múltiples operaciones.

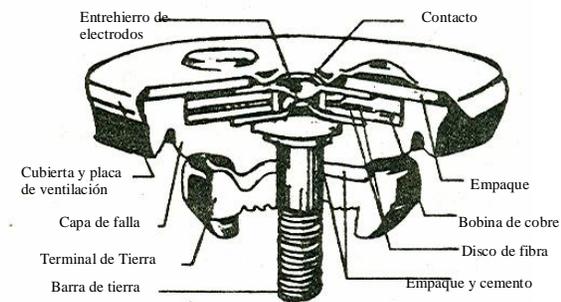
b. unidad indicadora de falla

En los últimos años se ha dado gran importancia al hecho de tener un procedimiento de desconexión que separe la línea de tierra del DST en el caso de que los cilindros autovalvulares o distancias de fuga del DST estén dañados. Si la línea a tierra queda desconectada, una fuga constante a tierra se ha eliminado, evitando el “bloqueo de la línea”. Por lo tanto es importante recordar que:

La unidad indicadora de falla opera solamente en el remotísimo caso de un DST dañado que no puede efectuar sus funciones normales de protección. De ahí que el indicador de falla nunca opera en la gran mayoría de los DST de distribución en servicio, a pesar de que estas unidades hayan descargado muchas sobretensiones debidas a rayos.

El indicador de falla del DST se compone de cinco partes principales.

Indicador de falla. Figura No. 11



1. Una bobina de alambre delgado de cobre en serie con las distancias de fuga, cilindros autovalvulares y con la terminal de tierra.
2. Dos discos de fibra, uno a cada lado de la bobina.
3. Dos electrodos de latón que forman la distancia de fuga, en paralelo con la bobina.
4. Una copa de baquelita con una sección de ruptura que cederá a la presión interna del indicador de falla.

5. Una cubierta metálica y placa de ventilación forma la parte superior del indicador de falla y permite la salida de los gases del interior del DST después de operar dicho indicador de falla.

11. OPERACIÓN DEL INDICADOR DE FALLA.

Considérese Primero la acción de este conjunto de bobina y entrehierro durante una operación normal del DST (véase la figura N° 12). La descarga del rayo, después de pasar a través de las distancias de fuga y por los cilindros autovalvulares, saltara en el entrehierro ofrece menor impedancia al transitorio de alta frecuencia que a la bobina de cobre. Después de que dicha descarga ha pasado a tierra, la corriente a baja frecuencia resultante toma el camino de la bobina, la cual ofrece ahora menor impedancia a la corriente de baja frecuencia que el entrehierro en paralelo. Si esta corriente de baja frecuencia se interrumpe en un lapso de aproximadamente medio ciclo, la bobina no será dañada.

Después de que las distancias de fuga principales han interrumpido la corriente de baja frecuencia, no fluirá más corriente en ninguna parte del DST y el indicador de falla seguirá su condición inicial.

Ahora considérese lo que sucedería si la corriente de baja frecuencia que está pasando a través de la bobina, no se interrumpiera. Esto sucederá cuando los cilindros autovalvulares hayan sido perforados o las distancias de fuga se encuentren en corto circuito, fluirá a través del DST (Figura N° 13).

La bobina de cobre y los discos de fibra se evaporarán parcialmente y los gases resultantes tratarán de expandirse. Esta presión interna romperá la copa de baquelita del indicador de falla, desconectando con fuerza la terminal de tierra y la conexión de la misma, dando una indicación visual de un DST dañado.

Mientras la terminal de tierra se aleja de la parte inferior del DST, la corriente de falla establecerá un fuerte arco entre las partes internas del DST y la terminal que está siendo expelida. Es importante hacer notar que este arco solo

puede ser interrumpido por un elemento auxiliar como un fusible desconectador o un interruptor. En otras palabras, el indicador de falla no es suficiente por si solo. No existe en la industria un dispositivo que sea suficiente por si mismo, para abrir la línea en condición de falla.

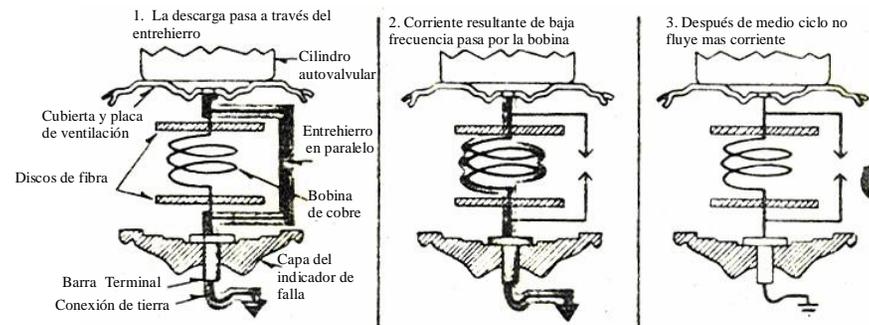


Figura No. 12: Paso Normal de una descarga y su corriente resultante de baja frecuencia.

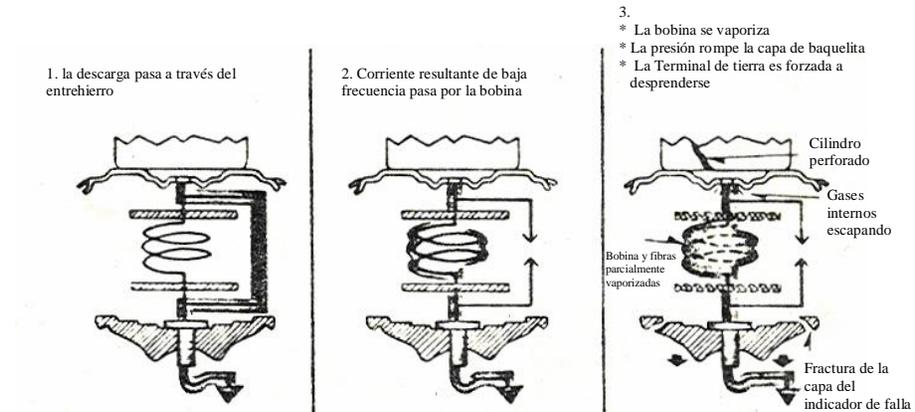


Figura No. 13: Operación del indicador de falla si un cilindro autovalvular fallara y no limitara el flujo de la corriente resultante de baja frecuencia.

Características de seguridad.

Después de que un indicador de falla ha operado, es posible que los gases atrapados dentro del cuerpo del DST transformen a este en un peligroso recipiente a presión, o una verdadera bomba, el que podría estallar cuando el electricista trate de desmontar del poste el DST dañado. Este peligro ha sido

eliminado previendo una perforación para relevo de sobre presión que entra en acción después de que el indicador de falla ha sido expelido. Esta perforación permitirá el escape de los gases que puedan haberse quedado dentro del cuerpo del DST.

CALIBRE DE LA LINEA DE TIERRA.

Aunque se recomienda un cable flexible con una onda adicional para la línea de tierra, pruebas recientes han demostrado que alambre sólido hasta del calibre N° 4, puede usarse si el alambre tierra es cuando menos de 15 cm. de longitud, con una onda de radio no menor de 5 cm. En estas circunstancias el alambre de tierra queda separado de la parte inferior del DST unos 7,5 cm.; separación que es mas que adecuada para evitar al cerrar nuevamente el fusible desconectador o el interruptor sobre el sistema, haya contacto a tierra.

12. DST DE OXIDO DE ZINC

Los DST de óxido de zinc difieren de los llamados autovalvulares por estar contruidos por bloques de óxido de zinc sintetizados en ves de gaps internos, que dan una característica tensión/corriente que es casi la ideal, es decir una resistencia muy elevada para la tensión de operación y muy pequeñas para tensiones que se encuentre un poco arriba de la tensión de operación. La característica tensión/corriente de estos bloques corresponde a una relación matemática semejante a la de los bloques de Sic usados en los DST autovalvulares convencionales ($I_d = K_v^n$) con un valor del exponente n del orden de 40.

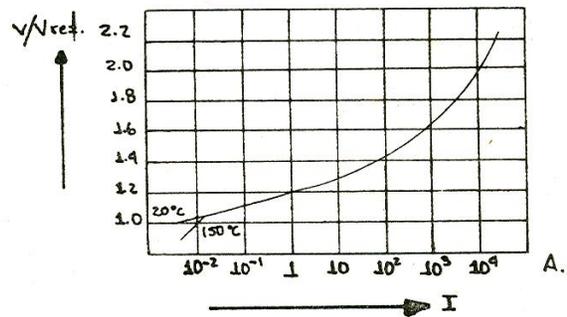


Figura No.14: Característica Tensión-corriente de un bloque de oxido de zinc

En la figura anterior se puede observar que si se toma la tensión de referencia (V_{ref}) del mismo valor que la tensión máxima de servicio en el punto de instalación del DST, la corriente a través del mismo es del orden 1mA en operación normal, con lo que no requiere de una serie de explosores como en los autovalvulares. En cambio para una corriente de descarga de 10 kA la tensión residual es del doble de la tensión de referencia.

De esta característica se observa que el nivel de protección asegura en estos DST es mayor que en los autovalvulares con una construcción mas sencilla y

robusta. Los DST de óxido de zinc tienen el inconveniente de tener una característica negativa de temperatura para corrientes pequeñas, es decir, que para una tensión aplicada, la corriente de descarga aumenta con la temperatura. Esta característica conduce a una temperatura crítica que se puede alcanzar por efecto de las descargas de larga duración, como las debidas a maniobras de interruptores, que puede conducir a un aumento de la corriente y por lo tanto de energía disipada, con la consecuencial posibilidad de destrucción del DST.

Este inconveniente lo han tratado de eliminar los fabricantes incorporando, por ejemplo una resistencia lineal en serie con los bloques y en paralelo con un explosor.

Esta resistencia se suma a la de los bloques y da lugar a una pequeña corriente de descarga con la tensión de servicio. En caso de sobretensión, el explosor se descarga y la resistencia lineal queda corto circuitada y en consecuencia no se produce ningún aumento en la tensión residual.

Ejemplo:

Determinar el nivel básico de aislamiento al impulso recomendado por el lado de 115 Kv de una subestación instalada a 1800 msnm, se considera que el sistema se encuentra sólidamente conectado a tierra con lo que se desea tomar ($K_e = 0.80$).

Solución:

La tensión nominal del DST es:

$$V_n = K_e V_{max}; V_{max} = 123 \text{ Kv}$$

$$V_n = 0.8 \times 123 = 98.4 \text{ Kv}$$

Si se usa un DST convencional un valor de designación próximo es 108 Kv.

De catalogo de fabricante se puede obtener los siguientes datos:

∅ Tensión de Descarga	315Kv
∅ Tensión de Frente de Onda	339 Kv
∅ Tensión Residual Con Corriente	
De Descarga de 10 K_A	240 Kv

Si se aplica un margen del 25% el nivel básico de aislamiento al impulso para los aislamientos no recuperables es:

12.1 CARACTERÍSTICAS DE PROTECCIÓN DE LOS DST DE OXIDO DE ZINC GENERAL – ELECTRIC

Ten. Nominal del DST K _V – RMS	Ten Max por Maniobra K _V - C _R	Mx. Tensión de Restablecimiento con Onda de corriente de 8 x 20 M Seg.						
		1.5 KA	3.0 KA	5.0 KA	10.0 KA	15.0 K.A	20.0 KA	40.0 KA
60	118	117	123	127	136	143	150	174
70	142	141	147	153	163	171	180	209
78	154	153	160	166	177	186	195	227
84	165	164	172	178	191	200	210	244
90	177	176	184	191	204	214	225	261
96	189	187	196	203	218	228	240	278
108	213	211	220	229	245	256	268	313
120	236	234	245	254	272	285	300	348
132	260	258	270	280	299	314	330	383
144	283	280	292	304	326	341	358	416
168	331	328	343	356	381	399	420	488
172	338	335	350	363	390	408	429	499
180	354	351	367	381	408	427	449	522
192	378	375	392	407	435	456	479	557
228	449	445	465	483	517	541	568	661
240	472	468	490	509	544	570	598	696
258	508	503	527	547	585	613	643	748
264	519	515	539	559	598	627	658	766
276	543	539	563	585	625	655	688	800
288	567	562	588	610	653	684	718	835
294	578	573	600	622	666	697	733	852
300	590	585	612	636	680	712	748	870
312	614	609	637	661	707	741	778	905
396	778	-	-	885	930	960	992	1098

NBAI no recuperable = $1.25 \times 315 = 393$ 75 Kv

El NBAI mas cercano a los valores de norma es 450 Kv.

El nivel básico de aislamiento al impulso para los aisladores auto recuperables (externos) es:

NBAI Recuperable = $\frac{\text{Tensión de Descarga} \times \text{Margen} \times 1.05}{\delta}$

δ

δ = Factor de corrección por condiciones atmosféricas en este ejemplo se

tomará $\delta = \frac{315 \times 1.25 \times 1.05}{0.804} = 514.22$ Kv

0.804

Prácticamente y de acuerdo con normas el NBAI más cercano es 550 Kv.

13. EFECTO DE LA DISTANCIA ENTRE EL DST Y EL EQUIPO A

PROTEGER.

Cuando El DST se instala una distancia mas o menos considerable (50 – 100 m) del elemento por proteger (por ejemplo un transformador debido a

requerimiento del propio DST para la protección de otros elementos cercanos, es necesario considerar que la tensión en las boquillas del transformador puede ser mayor que la que aparece en el DST en el momento de la descarga, esto debido al efecto de las reflexiones de las ondas viajeras.

La tensión máxima que debe de aparecer en las terminales de un aparato que esta protegido por un DST localizado a una distancia " l " se puede calcular con la formula siguiente :

$$V = V_p + ul / v$$

Estando limitado este valor a $2v$, siendo:

V_p = Tensión máxima de descarga del DST.

u = Pendiente del frente de onda de tensión incidente que se puede tomar
Como 500 Kv / useg.

v = Velocidad de recorrido de a onda en el tramo-DST objeto
Protegido y se puede tomar 300 m / useg. Para líneas aéreas y 150 m /
useg. para cables.

$l =$ Distancia entre el DST y el objeto protegido (ver figura)

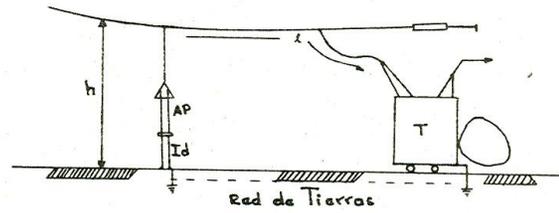


Figura No. 15: Longitud del cable de conexión al DST

14. EL EFECTO DE LA LONGITUD DEL CONDUCTOR DE CONEXIÓN DEL DST.

El conductor del DST tiene una impedancia que produce una elevación de la tensión que limita el DST. Esta elevación se puede tomar en consideración tomando un valor de inductancia 1,2 uH/ m, de manera que la caída de tensión en la conexión se calcula como sigue:

$$V = 1,2 \times 10^{-6} h \, di/dt$$

h = Longitud del cable que conecta al DST de fase a tierra.

di/dt = Pendiente del frente de onda de la corriente de descarga.

14.1. SELECCIÓN DEL DST.

La selección de un DST para protección contra sobre tensiones de origen atmosférico y por maniobra de interruptores debe de estar de acuerdo con el criterio de protección de coordinación de aislamiento adoptado, es decir, se

debe verificar que un tipo de DST cumpla con los requisitos de la línea, transformadores, aisladores, etc., en la subestación.

Las características importantes para la selección de un DST son:

- a) Tensión Nominal.
- b) Corriente Nominal de Descarga.

14.2. TENSIÓN NOMINAL DEL DST.

Es el valor efectivo de la tensión alterna de frecuencia fundamental (60 Hz) a la prueba de trabajo, y que puede aparecer en forma permanente en el DST sin dañarlo. A esta tensión el DST extingue la corriente de frecuencia fundamental, por lo que se conoce también como "Tensión de extinción del DST".

La tensión nominal del DST se calcula de acuerdo con la expresión siguiente:

$$V_n = K_e V_{\text{máx.}}$$

Donde:

$V_{\text{máx.}}$ = Tensión máxima del sistema entre fase (se refiere al equipo) en Kv.

V_n = Tensión nominal del DST en Kv.

K_e = Factor de conexión a tierra.

El factor K_e (Factor de conexión a tierra) depende de la forma en como esta conectado el sistema a tierra, considerando la falla de línea a tierra que produce la sobretensión en las fases no falladas.

De acuerdo con esto la relación de reactancia de secuencia cero a secuencia positiva (X_0/X_1) y la relación R_0/X_1 .

Relaciones R_0/X_1 para la determinación del factor de conexión a tierra K_e .

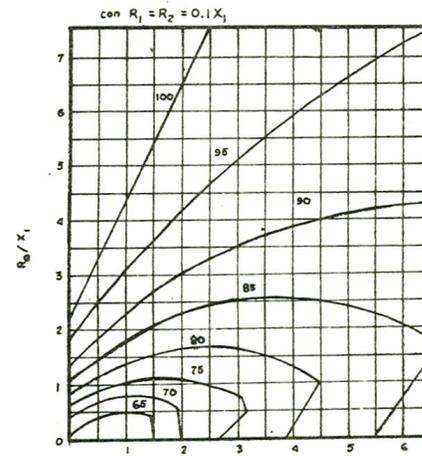


Figura No. 16

Relaciones R_0/X_1 para la determinación del factor de conexión a tierra K_e .

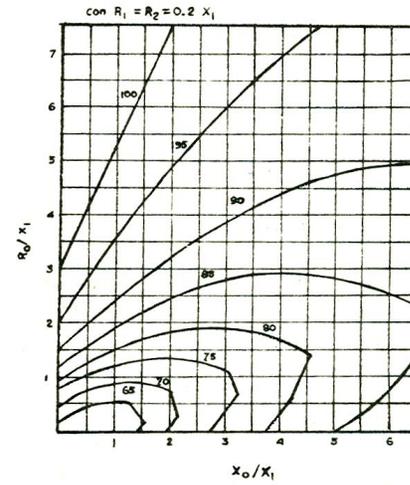


Figura No. 17

Relaciones R_0/X_1 para la determinación del factor de conexión a tierra K_e .

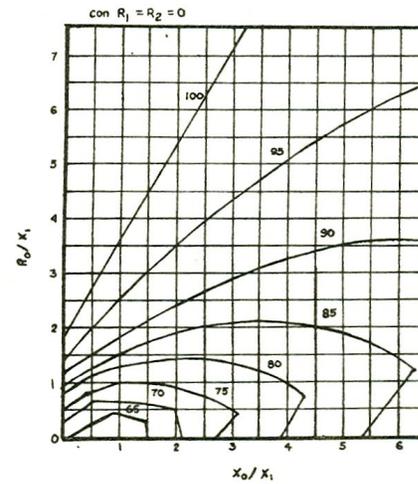


Figura No. 18

Se entra en las graficas con la relación X_0/X_1 para el sistema así como para el valor R_0/X_1 , el punto de corte cae en alguna curva, en donde el mínimo indicador representa la tensión máxima (en por ciento) que puede aparecer de línea a tierra en las fases no falladas. Desde luego que los valores de X_0/X_1 dependen como ya se menciona antes de la forma en como se encuentran los neutros conectados a tierra, de manera que en la practica.

1. Para sistemas con neutro solidamente conectado a tierra $X_0/X_I \leq 3$ y $R_0/X_I \leq 1$ y estos valores se interconectan en la curva marcada con el 80 % es decir $K_e = 0,80$.
2. Para sistemas con neutro flotante o conectado a tierra con una impedancia de alto valor $X_0/X_I = 0$, entonces los valores se interconectan en la curva de 100 % y $K_e = 1,0$.

Es practico común de los fabricantes designar los DST como de : 100%, 80% y 75%, estos valores se refieren normalmente a la tensión nominal del sistema así que por ejemplo : un DST de 100 % tiene una tensión nominal que es mayor en un 5 % a la tensión nominal del sistema se emplean en el caso que $K_e = 1.0$ (neutro aislado o puesta a tierra a través de alta impedancia).

Los DST con porcentajes menores de 100 % se aplican a sistemas con el neutro conectado a tierra, y su valor depende de la forma en que estén conectados, así por ejemplo para sistemas con neutro solidamente conectado a tierra en los que $K_e = 0.8$ por tener relación $X_0/X_I \leq 3$ y $R_0/X_I \leq 1$ se usaran

DST de 80 % de acuerdo con los valores de niveles de protección que se obtengan.

El valor de tensión nominal de un DST es importante en la economía de la instalación, tómese el caso de un sistema con neutro sólidamente conectado a tierra en donde se podría emplear DST de 75% o bien 80%, se tendría un mayor número de operaciones y por lo tanto mayor probabilidad de falla, por el si seleccionaran DST de 110% de la tensión nominal de la instalación, se tendría un menor numero de operaciones, pero es probable que la protección no sea adecuada, debido a que a mayor tensión de operación del DST si está mas próxima la tensión fijada como nivel básico de aislamiento del equipo y el margen de protección sería pequeño.

Por lo anterior se debe coordinar la tensión de operación del DST con los niveles básicos de aislamiento del equipo. Un criterio practico y rápido consiste en que un sistema efectivamente aterrizado ($K_e = 0.8$) el valor de la tensión nominal sea un 5 o 10% mayor que el encontrado y en sistemas de neutro

aislado o conectado a tierra a través de alta impedancia se instalan DST de 100% o 105% debido a que los DST también deben operar por sobretensión.

15. METODOS DE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO

Para la coordinación de aislamiento en subestaciones eléctricas existen básicamente dos métodos:

- a) Semiprobabilísticos o Convencionales
- b) Probabilísticos.

En esta sección se discutirá el primer método debido a que el uso de métodos probabilísticos requiere de información estadística obtenida en forma experimental, que por el momento no se dispone, pero que es necesario obtener en una investigación para hacer uso de mejor información de diseño.

- a. Selección de las Características del DST: Esta selección debería estar basada sobre la base de las condiciones de sobretensiones máximas esperadas, de manera que el DST empleado debe ser capaz de soportar estas condiciones con un riesgo de falla en el mismo mínimo.

- b. Suponiendo que se emplea DST en la instalación, seleccionar los niveles básicos de aislamiento por BIL y por maniobra de interruptores NBS.

En sistemas de extra alta tensión los DST se localizan tan cerca como sea posible del transformador. Las características de protección del DST se usan con un margen de protección para determinar de esta forma los niveles básicos de aislamiento por impulso y por maniobra de interruptores para el transformador. Para otros equipos como el interruptor y cuchillas desconectoras estos niveles se calculan en la misma forma.

- c. Para niveles de extra alta tensión y ultra alta tensión (más de 400 Kv) en el aislamiento autorecuperables se determinan los niveles básicos de aislamiento por maniobra de interruptores NBS suponiendo que no hay acción del DST. En estos niveles de tensión en el sistema existe la posibilidad de que se permitan valores inferiores de NBS dado que las características de protección del DST para ondas de Swtcheo pueden ser mayores que las ondas producidas por las maniobras de interruptores en el sistema.

- d. Se debe hacer un análisis de la distribución del equipo en la subestación y las distancias con objeto de determinar el número y localización de los DST así como posibles variaciones en el BIL y NBS.

Para una determinación inicial de los BIL y NBS en la selección del equipo se pueden emplear las siguientes expresiones:

Aislamientos no Auto recuperables (Aislamientos Internos) No Afectados por Condiciones Ambientales.

∅ Ondas por maniobras de interruptores (Swicheo)

$NBS = 1.15 \times (\text{tensión de arqueo del DST por impulso de maniobra})$ o también $NBS = 1.15 \times (\text{Valor de la onda máxima por impulso de maniobra})$

Ø Por rayo BIL = 1.2 x (Tensión residual del DST para una onda impulso 1.2/50) , BIL = 1.2 x (Tensión de arqueo para una onda de 1.2 /50) o también BIL = 1.043 x (Tensión de arqueo por frente de onda del DST)

El valor de 1.15 en el cálculo del NBS y de 1.2 en el cálculo del NBS y de 1.2 en el cálculo del BIL se denomina "Relación de Protección" y representan márgenes de protección.

El Valor de 1.043 se obtiene como el cociente de 1.2/1.115 y donde 1.15 es el valor de la onda cortada a 3 µseg. de una onda de 1.2/50 en por unidad del BIL tomando como 1.15.

En sistemas de extra alta tensión el comité de transformadores de IEEE recomienda que la relación de protección anterior para el frente de onda se recomienda a 1.10 por unidad en lugar de 1.15.

Aislamiento Auto-Recuperables Sujetos a Condiciones Ambientales
(externas)

En este caso las relaciones anteriores cambian como sigue:

a) Por Maniobra de Interruptores:

$$\text{NBS} = \frac{1.15}{(0.96\delta_r)^n} \times \begin{array}{l} \text{(Tensión de arqueado del DST} \\ \text{por impulso maniobra)} \end{array}$$

O también

$$\text{NBS} = \frac{1.15}{(0.96\delta_r)^n} \times \begin{array}{l} \text{(Valor de la onda máxima} \\ \text{por impulso maniobra)} \end{array}$$

Recuérdese que:

$$N = 1.08 - 0.053 d$$

d = distancia mínima de no arqueado entre conductor y estructura en pies.

Las expresiones anteriores ya consideran el NBS corregido por humedad.

b. Por Impulso de Rayo.

Como se sabe por impulso de rayo el coeficiente de densidad relativa del aire y δ_r el exponente $n = 1.0$ y además el BIL aún cuando está determinado para condiciones en seco no se ve alterado en forma significativa por humedad.

$$\text{BIL} = \frac{1.2}{(0.96 \delta_r)^n} \times \begin{array}{l} \text{(Tensión residual del DST o} \\ \text{Tensión de arqueo para una onda} \\ \text{de 1.2 /50)} \end{array}$$

o también

$$\text{BIL} = \frac{1.043}{(0.96 \delta_r)^n} \times \begin{array}{l} \text{(Tensión de arqueo por frente de} \\ \text{onda DST)} \end{array}$$

Como se ha mencionado anteriormente la tensión de descarga de un DST es una función de la corriente de descarga, la cual a su vez es una función de la impedancia característica de la línea Z_0 , la tensión crítica de flameo de polaridad negativa para la línea y de la característica tensión – corriente para el DST y la máxima corriente de descarga se puede calcular como sigue:

$$I_d = \frac{2(BIL) - V_r}{Z_0}$$

Aunque desde el punto de vista de los fabricantes también se puede calcular en condiciones ligeramente mas severas como:

$$I_d = \frac{2(VCF) - V_r}{Z_0 + R_A}$$

Donde:

VCF = Tensión Crítica de flameo para la línea en Kv. (Polaridad Negativa)

V_r = Tensión Residual del DST en Kv

R_A = Resistencia del DST

Z_0 = Impedancia característica de la línea en Ohms.

Algunos valores de I_d en función de las tensiones máxima del sistema se dan en la siguiente tabla.

VALORES DE CORRINTES DE LOS DST

Tensión Nominal (Kv)	Tensión Máxima (Kv)	Id (KA)	Valores De Fabrica
69	72.5	5	5
115	121	5	5
230	245	5	5 (10, 20)
345	362	7	10 (20 Kv)
400	420	8	10 (20, 40)
500	550	10	10 (20)

16. INSTALACIÓN DE LOS DESCARGADORES DE SOBRETENSION.

Tan importante como seleccionar las características adecuadas de un DST para proporcionar una protección efectiva al equipo en base a un estudio de coordinación de aislamiento, es la localización de los DST en la subestación, ya

que dependiendo de esto se tendrá una buena protección. En principio se puede establecer que los DST se deben instalar tan cerca del equipo por proteger como sea posible, pero esto puede ocurrir en transformadores de distribución del tipo normal montando los DST en una cruceta que esta cerca del transformador o directamente en el tanque , en el caso de los transformadores auto protegidos debido a que los transformadores usados en los niveles de tensión de distribución tienen una zona de protección muy reducida, este tipo de solución en subestaciones eléctricas donde llegan o salen líneas de subtransmision o distribución seria posible por razones técnicas y económicas y entonces se debe determinar la zona de protección y en función de esto establecer el numero de DST) que se requieren para obtener un nivel de protección adecuado.

La protección de un DST es máxima en el lugar de la instalación y disminuye en forma gradual a medida que se aleja del DST hacia ambos lados de tal forma que hay una distancia que proporciona un valor de protección mínimo requerido y que determina la zona de protección de manera que para valores de distancia mayores el DST no protege al equipo en la medida que se quiere.

En la determinación de la zona de protección o distancia en que el DST ofrece protección al equipo intervienen varios factores que tienen que ver desde luego con las características del DST representada por su tensión de operación o cebado, con la onda incidente en cuanto a la pendiente del frente de onda se refiere en KV / micro-seg. Y desde luego de la distancia de instalación al quipo por proteger, para ilustrar lo anterior se considera el diagrama siguiente:

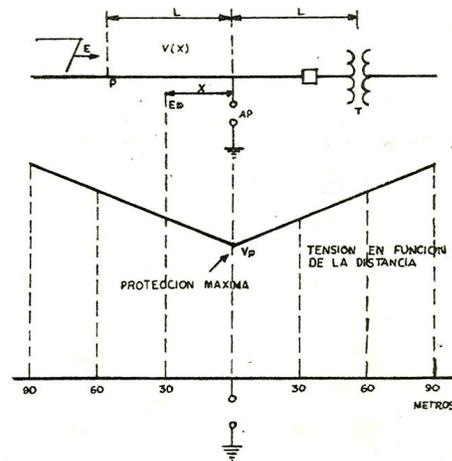


Figura No. 19

En Donde:

L = Distancia del DST a ambos lados del punto de su instalación.

Ap = DST

T = Transformador

$V(x) = E_0$ = Tensión que aparece en cualquier punto x de la instalación
medida a partir del punto de localización del DST.

En la figura anterior se observa que a medida que se aleja del DST la tensión que aparece en la instalación es mayor (E_x) y ésta se puede determinar a partir de las condiciones siguientes:

- a. Para una onda incidente que llega a la subestación se supone que tiene una pendiente constante "S".
- b. El transformador se puede representar en forma aproximada como un circuito abierto despreciando sus capacitancias concentradas.
- c. El DST por tener una característica de operación no lineal y una impedancia sensitiva a la tensión discontinua se puede tratar en forma parecida a los diagramas de celosía (lattice) por el método de reflexión de ondas.

De hecho los gaps del DST tipo convencionales se pueden representar como un desconectador, que permanece abierto para una tensión menor que su valor de Tensión de Arqueo y se cierra cuando se llega o excede de este valor.

La distribución de ondas de tensión para un arreglo línea-DST subestación como el planteado. En el inicio de esta sección se puede obtener por el método de Latticee (diagrama de celosía) y se puede demostrar que la máxima tensión que aparece en un objeto a una distancia "X" del DST.

$$V(x) = V_p + 2ST$$

Donde:

$T = \frac{X}{\mu}$ es el tiempo de recorrido entre el DST y el objeto

μ Siendo μ la velocidad de la luz es decir:

$$\mu = 300 \text{ m / micro-seg.}$$

S= Pendiente del frente de onda en Kv / microseg, sin considerar la cresta de la onda incidente.

La tensión V(x) no puede exceder al valor 2Vp, este valor se obtiene para $2T - T_0$, donde, T_0 es el tiempo al cual arquea el DST, como antes se mencionó el valor de "S" alcanza un valor de 100 Kv / micro-seg. Por cada 12 Kv de la tensión nominal del DST y hasta un máximo de 1200 Kv / micro-seg. El efecto de distancia es despreciable para ondas por maniobras de interruptores debido a que el frente de onda tiene una pendiente muy baja. Por ejemplo: Un frente de 50 micro / seg (para una onda de 250/2500) tiene una longitud de:

$$X = 300 \frac{\text{m}}{\text{Micro-seg}} \times 50 \text{ micro-seg} = 15 \text{ Km}$$

Micro-seg

En la gráfica siguiente se muestra la sobretensión en función de la distancia.

Para el cálculo de la distancia de protección del DST

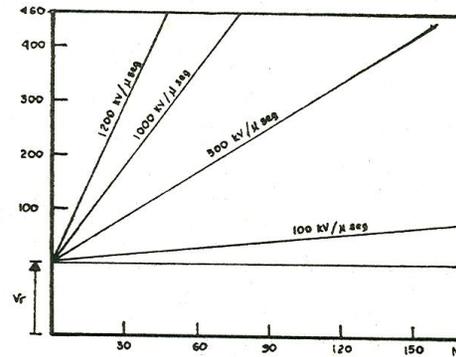


Figura No. 20

Se parte de la ecuación:

$$V(x) = V_p + 2ST$$

A la pendiente "S" se le denomina también $s = \frac{dV}{dx}$

dt

y sabiendo que la velocidad de la luz se puede expresar como :

$$M = \frac{x}{t}; \quad t = \frac{x}{M} = \frac{x}{c} \quad \text{entonces :}$$

$$V(X) = V_p + \frac{2SX}{300}$$

X = Distancia del objeto al DST si se fija la tensión máxima que puede soportar un equipo v (x) a una distancia "x" del DST se obtiene a partir de :

$$X = \frac{300 (V(x) - V_p)}{2S}$$

Si V (X) es la tensión máxima permisible en el equipo por proteger se puede hacer :

$$X = \frac{300 (V_{max.} - V_p)}{2S}$$

Siendo "X" la distancia máxima entre el equipo y el DST.

El valor de la pendiente del frente de onda "s" se puede calcular como se indico anteriormente, o bien según la norma ANSI C 62.1-1973 (publicación 1975) dando una interpretación antes mencionadas con relación a "s" como :

$$S = \frac{100}{12} \times V_n \dots \text{kV/micro-seg}$$

Hasta una tensión de 240 Kv en el sistema donde:

V_n = Tensión Nominal del DST y el valor de la pendiente "S" según esta norma se obtiene en la forma indicada en la tabla siguiente:

PENDIENTE DE FRENTE DE ONDA PARA DST

Tensión Nominal Del Sistema	Pendiente del Frente De Onda
Menor de 3 Kv	10 Kv / microseg.
3 – 240 Kv	(100 / 12) Kv/microseg. Por cada Kv nominal del DST.
Mas de 240 Kv	1200 Kv/microseg.

CORRIENTES DE CARGA EN FUNCIÓN DE LAS TENSIONES NOMINALES
DEL SISTEMA

Tensión del sistema (Kv)	Corriente de Descarga (A.)
15	*
34.5	*
69.0	5000
115.0	5000
138.0	5000
230.0	10000
345.0	10000
500.0	15000
700.0	20000

∅ Por lo general no tienen un blindaje efectivo.

En el caso de instalaciones que no estén blindadas en forma efectiva (por lo general de 138 Kv y menores) la instalación se puede ver sometida a tensiones extremadamente altas con índice de elevación (pendientes) del

orden de 1000 Kv / micro-seg.. por otro lado para descargas cercanas a los DST se pueden tener condiciones severas, un estudio estadístico hecho en Estados Unidos y reportado en la norma USAS C62.2-1969. Muestra que las corrientes de descargas para descargas por rayo en la subestación son:

Porcentaje de las corrientes de rayos que pueden exceder:

5%	a	63 KA
10%	a	50 KA
20%	a	33 KA
70%	a	9 KA

17. CONCLUSIONES

En el anterior trabajo, fue posible manifestar nuestra preocupación por el estudio de las protecciones contra sobretensiones por maniobras y descargas atmosféricas. Dedicando nuestro interés a los DST.

Una de las finalidades que perseguimos al realizar esta monografía es que al leer este texto cualquier persona tenga algún conocimiento sobre protección en subestación eléctrica por medio del DST, le pueda ser útil en cualquier momento.

El DST es un dispositivo de alta seguridad, el cual evita el daño de los aislamientos de los equipos en la subestación eléctrica, y estos daños, a su vez ocasionan fallas en el suministro de la energía eléctrica. Lo que repercute en la economía de los usuarios, por suspensión de la producción.

Determinado de antemano la capacidad (KVA) y la Tensión KV, de operación de la subestación eléctrica, para seleccionar adecuadamente dicho dispositivo, es necesario conocer las curvas de relación de reactancia de secuencia cero a secuencia positiva (X_0/X_1) para la determinación del factor de conexión a tierra (K_e). Así como la altitud y el clima donde está instalada la subestación eléctrica y el nivel cerámico del lugar o sea la frecuencia con que ocurren las descargas atmosféricas.

Se recomienda revisar periódicamente el DST, para que este siempre esté en buen estado (mantenimiento) y pueda cumplir con su función.

18. BIBLIOGRAFÍA

- q Elementos de Diseño de Subestaciones Eléctricas.
Ing. Gilberto Enrique Harper.
Editorial Limusa. México 1980.

- q Análisis Modernos de Sistemas Eléctricos de Potencia.
Ing. Gilberto Enrique Harper.
Editorial Limusa.

- q Fundamentos de Instalaciones Eléctricas de Mediana y Alta
Tensión.
Ing. Gilberto Enrique Harper.

