

118
2 Gen



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

A P A R T A R R A Y O S

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A**

**RICARDO RODRIGUEZ GONZALEZ
GABRIEL ORNELAS HERNANDEZ
D I R E C T O R**

ING. DANIEL BARRIOS - MORALES FRIAS

MEXICO, D. F.

1985





UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E

A P A R T A R R A Y D S

I N D I C E

Página

INTRODUCCION	1
CAPITULO I	
1. Función asignada a un apartarrayos en un sistema eléctrico de potencia.	2
CAPITULO II	
2. Sobretensiones y sobrecorrientes que se presentan en un sistema.	3
2.1 Teorías empleadas para el estudio de las sobretensiones.	3
2.1.1 Teoría de Simpson.	3
2.1.2 Teoría de la influencia de Elster y Geitel.	5
2.1.3 Teoría de ionización de Wilson.	5
2.2 Instrumentos empleados para conocer las características, de las sobretensiones.	6
2.2.1 Figuras de Lichtenberg.	6
2.2.2 Klydonógrafo.	7
2.2.3 Cámara de Boys.	10
2.3 Métodos para medir la magnitud y polaridad de las corrientes de los rayos.	15
2.3.1 Registradora de la descarga de un rayo.	15
2.3.2 El ampémetro medidor de cresta de corriente y de enlace magnético.	15

2.4 Forma de ondas de impulso.	17
2.4.1 Nivel básico del aislamiento al impulso (N.B.A.I) conocido como B.I.L. (Basic - impulse level).	21

CAPITULO III

3. Funcionamiento, clasificación, pruebas y selección del apartarrayos.	24
3.1 Funcionamiento del apartarrayos.	24
3.2 Clasificación de los apartarrayos.	27
3.2.1 Apartarrayos tipo expulsión.	27
3.2.2 Apartarrayos tipo autovalvular.	27
- La cámara de arqueo.	28
- Los explosores.	28
- Cilindros valvulares.	28
- Resistencia de control.	28
- Indicador de fallas.	29
3.3 Pruebas.	34
3.4 Información requerida para efectuar la selección de un apartarrayos.	35
3.5 Localización de los apartarrayos.	45

CAPITULO IV

4. Ejemplo que muestra la selección de apartarrayos en un sistema eléctrico de potencia dado.	47
---	----

CONCLUSIONES	89
--------------	----

BIBLIOGRAFIA	90
--------------	----

F I G U R A S

Página

2.1	Proceso de la descarga de un rayo.	4
2.2	Arreglo de elementos para producir fotografías de las figuras de Lichtenberg.	7
2.3	Fotografías de figuras de Lichtenberg.	8
2.4	Diagrama esquemático de la cámara de Boys.	10
2.5	Rayo No. 16 registrado el 11 de agosto de 1937 en el edificio Empire State.	13-14
2.6.1	Onda de impulso de tensión normalizada.	18
2.6.2	Onda de impulso de corriente normalizada.	19
2.6.3	Ondas de impulso mostrando la tensión crítica de flameo.	20
2.7	Diagrama simple del generador de Marx.	23
3.1	Funcionamiento del apartarrayos.	25
3.2	Funcionamiento de un apartarrayos tipo autovalvular.	26
3.3	Apartarrayos tipo expulsión.	30
3.4	Partes constitutivas de un apartarrayos autovalvular.	31
3.5	Valores R_0/X_1 , X_0/X_1 .	38
3.6	Tensiones máximas entre fase y tierra en el lugar de la falla.	39

T A B L A S

Página

2.1	Corrientes en torres.	16
2.2	Valores normalizados para el N.B.A.I.	21
3.1	Clasificación normalizada de los apartarrayos.	32 - 33
3.2	Pruebas de diseño, rutina y aceptación.	34
3.3	Tipos de sistemas de acuerdo con su conexión a tierra.	36
3.4	Clases de aislamiento, completo y reducido.	41
3.5	Valores de los factores de corrección para el N.B.A.I.	43 - 44

INTRODUCCION

INTRODUCCION

Un sistema eléctrico de potencia se compone de tres partes principales: Las centrales generadoras, las líneas de transmisión y las redes de distribución. Las líneas de transmisión constituyen los eslabones de conexión entre las centrales generadoras y las redes de distribución y conduce a otras redes de potencia por medio de interconexiones. Una red de distribución conecta las cargas aisladas de una zona determinada con las líneas de transmisión.

Debido a la importancia que tiene la protección de los sistemas eléctricos de potencia contra efectos transitorios, en este contexto se hace un estudio del apartarrayos considerando su funcionamiento, clasificación, selección y localización.

CAPITULO I

CAPITULO I

1. FUNCION ASIGNADA A UN APARTARRAYOS EN UN SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA

La función básica del apartarrayos, es proteger el aislamiento de los equipos, dispositivos y materiales que componen toda instalación eléctrica de alta y/o baja tensión contra sobretensiones originadas por descargas atmosféricas, operación de interruptores o de cualquier otro origen.

Existen apartarrayos de clase Distribución, Intermedia y Estación.

Los apartarrayos de Distribución e Intermedia equivalen a los clasificados con capacidad nominal de 5,000 amperes y los de Estación con capacidad nominal de 10,000 amperes. Estas diferencias atienden a la capacidad interruptiva requerida según el valor de corto circuito, que el circuito pueda derivar a tierra. Los apartarrayos de Estación e Intermedia son para altas capacidades de corriente de descarga y garantizan protección a equipos de subestaciones y líneas primarias e intermedias, ofreciendo tensiones de descargas más bajas, con el fin de dar un mayor factor de seguridad en operación, por lo que estos apartarrayos son muy robustos, de grandes dimensiones y de un costo mas elevado comparados con los de Distribución.

El presente estudio pretende analizar brevemente los fenómenos que producen las descargas atmosféricas y las sobretensiones que presentan estas, así como las debidas a la operación de interruptores; las formas de onda de los impulsos de tensión y corriente; la forma como actúan los apartarrayos; criterios para su clasificación y finalmente un ejemplo de aplicación real, utilizando los métodos recomendados por la experiencia.

CAPITULO II

CAPITULO II

2. SOBRETENSIONES Y SOBRECORRIENTES QUE SE PRESENTAN EN UN SISTEMA

Origen :

- Descargas atmosféricas.
- Operación de interruptores.

Existen varias teorías para explicar la acumulación de cargas eléctricas en las nubes, siendo las más importantes las siguientes: Teoría de Simpson, - Teoría de la influencia de Elster y Geitel y Teoría de ionización de Wilson.

2.1 Teorías empleadas para el estudio de las sobretensiones.

2.1.1 Teoría de Simpson.

El estudio realizado por Simpson se basa en que las gotas de - agua existentes en una nube bajo la acción de una corriente ascendente de aire frío empiezan a congelarse y aparece una diferencia de potencial entre las gotas de agua y los cristales de hielo; las gotas de agua quedan cargadas positivamente y son - arrastradas por la corriente ascendente de aire a la parte superior de la nube. Las gotas que se han congelado formando cristales de hielo más pesados que tienen una carga negativa se acumulan en la parte inferior de la nube. Esta carga negativa induce una carga positiva en la tierra; según la Ley de Coulomb.

Los gradientes de potencial en la nube; debidos a la carga eléctrica negativa acumulada en la parte inferior, son tan elevados que alcanzan un valor capaz de iniciar una descarga a través - del aire, que al ionizarse se produce una corriente de gran intensidad hacia la tierra. Este proceso se ilustra en la figura 2.1.

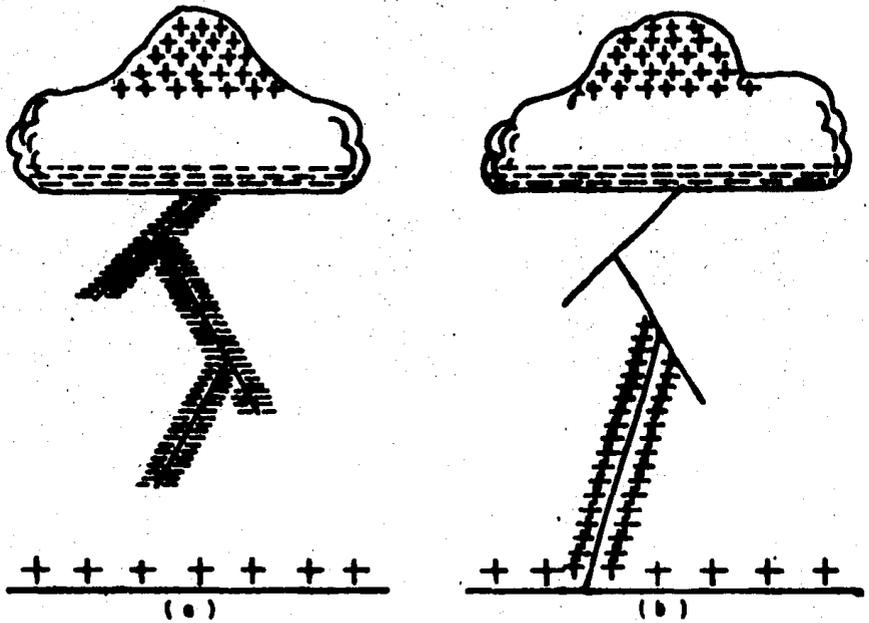


Fig. 2.1

Proceso de la descarga de un rayo.

a) Momento en que se inicia la descarga.

b) Cuando la descarga alcanza a la tierra.

2.1.2 Teoría de la influencia de Elster y Geitel.

Para justificar como queda cargada eléctricamente la nube postu-
laron que al caer las gotas desde la nube cortan las líneas de
fuerza del campo magnético de la tierra polarizandose negativa-
mente en la parte superior y positivamente en la inferior. La -
unión sucesiva de gotas desde la nube hasta la tierra dan como
resultado final una carga negativa en la parte inferior de la -
nube y una carga positiva en la superficie de la tierra origi-
nandose la descarga en la misma forma indicada anteriormente.

2.1.3 Teoría de ionización de Wilson.

Normalmente en la atmósfera existen iones, tanto positivos como
negativos teniendo una movilidad aproximada de 1 cm/seg bajo la
acción de un campo eléctrico de 1 volt/cm.

V. F. Hess en su obra *The Electrical Conductivity on the Atmos-
phere and Its Causes* (D. Van Nostrand Company, 1928) estimó un
promedio de 1000 iones positivos y 800 negativos por cm^3 .

Mientras que O. H. Gish en su obra *Physics of the Earth, Vol. 8,
Terrestrial Magnetism and Electricity*, Mc. Graw Hill Book Co.,
1939, Chapter IV, "Atmospheric Electricity", pp. 149 - 230, men-
ciona un valor promedio de 750 iones positivos y 650 negativos
con valores individuales variando desde 50 hasta 1000 por cm^3 .

Wilson, basandose en la existencia de iones menciona que cuando
ocurre una tormenta las gotas al caer chocan con iones negati-
vos que son atraídos por la parte inferior de la gota que es po-
sitiva y con iones positivos que son atraídos por la parte supe-
rior de la gota que es negativa. La sucesión continua de estas
gotas dan finalmente la presencia de una polaridad negativa en
la parte inferior de la nube y positiva en la superficie de la
tierra. La descarga se produce en la forma ya indicada en la -
teoría de Simpson.

2.2 Instrumentos empleados para conocer las características de las - sobretensiones.

Entre los instrumentos más importantes tenemos los siguientes:

- Figuras de Lichtenberg.
- Klydonógrafo.
- Cámara de Boys.

2.2.1 Figuras de Lichtenberg.

En 1777 el Dr. G. C. Lichtenberg reportó un experimento en el -
cual descargó un capacitor con una botella de Leyden a través de
un explosor formado por dos placas habiendo rociado pólvora so--
bre la placa inferior conectada a tierra. Al producirse la des-
carga encontró que la pólvora se expandió dando figuras de apa-
riencia singular muy diferentes dependiendo de la polaridad de -
la tensión aplicada. Esto dió lugar a denominarlas como figuras
de Lichtenberg.

En 1888 Trounvelot y Brown, encontraron que la pólvora podía ser
sustituida por una placa fotográfica sensitiva, el estado de --
emulsión en contacto con la terminal revelaba sobre la placa fo-
tográfica, figuras muy similares a las producidas por Lichten--
berg.

2.2.2 Klydonógrafo.

En 1924 J. F. Peters, descubrió una forma conveniente para medir la tensión causada por rayos sobre las líneas de transmisión a través del Klydonógrafo, el cual acoplado a la línea; registraba las tensiones por medio de las figuras de Lichtenberg como se muestra en la figura 2.2. Tres ensambles fueron colocados en la misma caja, para registrar simultáneamente las tensiones sobre las tres fases de una línea de transmisión.

Con este arreglo una onda positiva produce una figura Lichtenberg positiva y una onda negativa produce una figura Lichtenberg negativa, como se muestra en la figura 2.3.

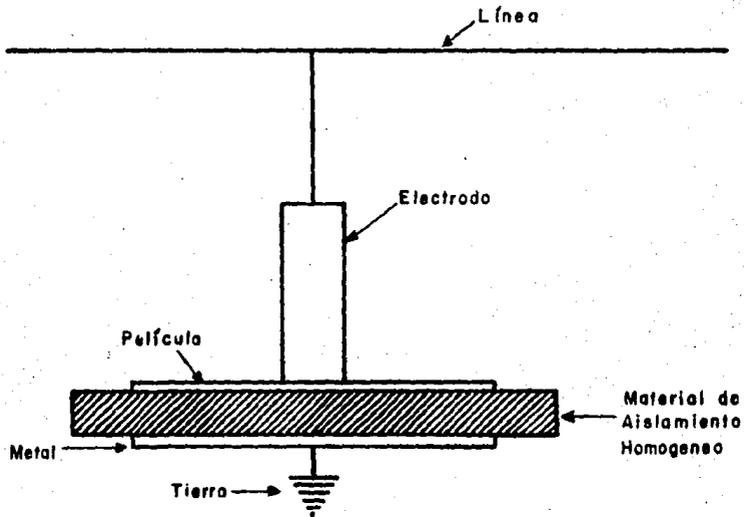


Fig. 2.2

Arreglo de elementos para producir fotografías de las figuras de Lichtenberg.

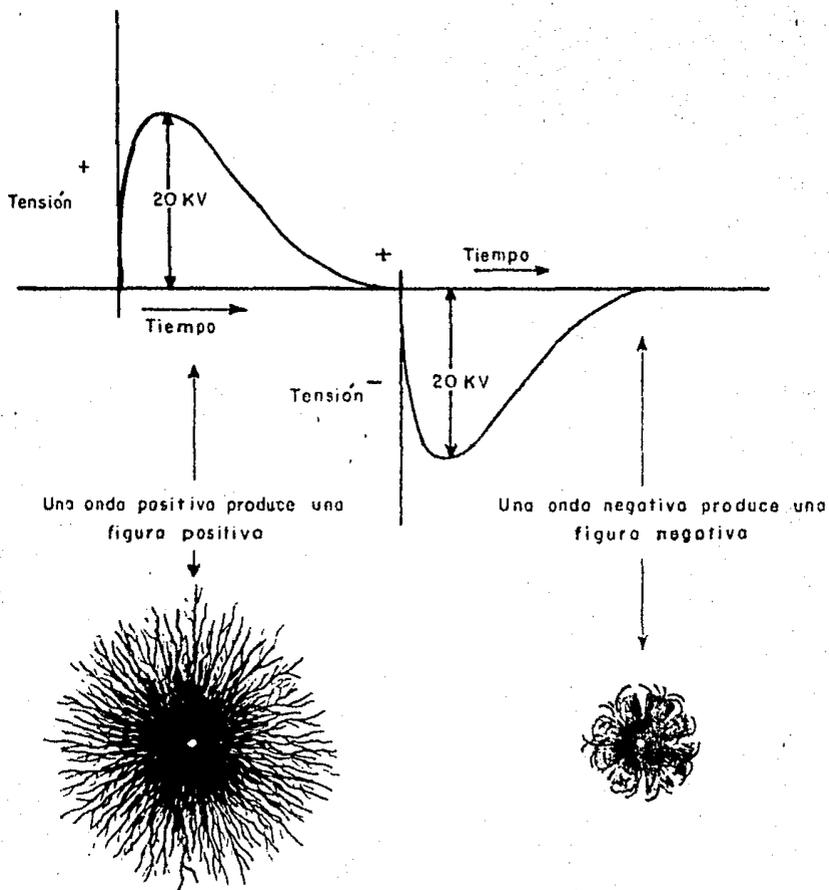


Fig. 2.3

Fotografía de figuras de Lichtenberg positiva y negativa, producidas por fuentes de tensión positiva y negativa de la misma magnitud y forma de onda.

Se encontró que las figuras podrían ser producidas, aún cuando el tiempo de duración de la tensión aplicada fuera de solo una fracción de microsegundo y también que el radio de la figura, estaba en función del máximo valor de tensión aplicada.

Las figuras negativas son inferiores a las figuras positivas - para efecto de medición de tensión.

Mc. Eachron, realizó un estudio de la calibración de las figuras fotográficas del Lichtenberg con diferentes valores de cambio de tensión, usando el osciloscopio de Dufour para medir la forma de onda de la tensión impresa.

Por medio del Klydonógrafo y registrador de onda de tensión colocados en sistemas de transmisión, ha sido posible medir las ondas de sobretensión causadas por rayos. Se han registrado valores tan altos, como 15 veces la tensión de cresta de fase a neutro normal, en líneas aisladas y arriba de 21 veces la tensión de cresta de fase a neutro y en líneas sobreaisladas. En la operación de interruptores han sido registradas ondas con valores arriba de 5.5 veces la tensión de cresta normal de tensión de fase a neutro.

La atenuación es más rápida con ondas cortas o rápidas, comparadas con el frente lento de una onda larga y mas rápidas para ondas positivas, que para negativas. Por ejemplo, para una onda de 2000 Kv; su valor será atenuado a la mitad en aproximadamente 5 Km.; mientras que para un voltaje de 1000 Kv, a una distancia aproximada de 10 Km.

2.2.3 Cámara de Boys.

Fue desarrollada en 1900 por Charles V. Boys.

La cámara de Boys, consta de 2 lentes idénticos con un espacio focal de 15.24 cm. (6 pulgs.); espaciados 10.16 cm (4 pulgs.)-

de centro a centro y montados sobre un disco, el cual puede ser girado con la mano y adquirir una velocidad aproximada de 12.19 mts/seg. (40ft/seg). Con los lentes girando, las 2 imágenes del relámpago del rayo, pueden ser llevadas en dirección opuesta. La composición de dos fotografías obtenidas y con el conocimiento de la longitud focal de los lentes, su velocidad, y la distancia a la que se produjo la descarga, fue posible hacer una determinación de la velocidad de los componentes de la descarga, como se muestra en la figura 2.4.

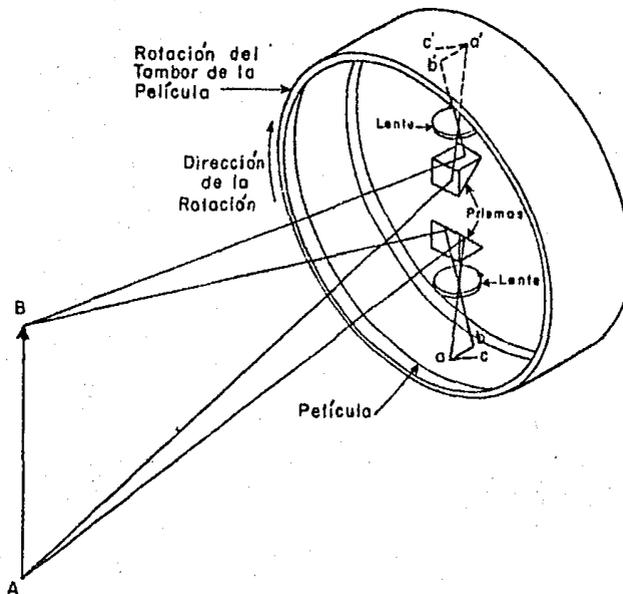


Fig. 2.4

Diagrama esquemático de una cámara de Boys con movimiento de película y un sistema óptico estacionario.

En la figura 2.4, se consideró cuando el tambor está parado, entonces la luz de los rayos moviéndose sobre la parte A a B pasará a través del prisma y lente de abajo y serán enfocados sobre la película, trazando (calcando) una trayectoria de a a b. Similarmente, el prisma y lente superior enfocará una imagen sobre la película, calcando una trayectoria de a' a b'.

Si el tambor está girando, las trayectorias trazadas sobre la película se presentará en forma distorsionada; el registro de abajo se obtendrá de a a c y el registro superior se obtendrá en dirección opuesta a lo largo de la trayectoria de a' a c'.

En la comparación de las descargas atmosféricas a tierra, se encontró que cada descarga consiste de una serie de descargas separadas. La 1ra. descarga de cada serie es diferente con respecto a la 2da, y así sucesivamente. Es mucho más intensa la 1ra. descarga que las siguientes y mucho más grande la rama del rayo. También en la descarga de la nube a tierra, existe un flujo que retorna en dirección inversa.

La longitud entre cada paso de descarga, es aproximadamente de 50 metros con tiempo de $100 \mu s$.

El mejor de los tiempos registrados, vino de las nubes de polaridad negativa. La 1ra. guía de la descarga, se presenta con cierta pendiente, procediendo de la nube a la tierra a una velocidad efectiva, con una variación de 10 a $2000 \text{ cm}/\mu \text{seg}$.

Subsecuentemente, los flujos tienen una continuación de la 1ra. descarga, procediendo de arriba hacia abajo; a una velocidad -- aproximada de 100 a $2000 \text{ cm}/\mu s$. Cada descarga alcanza a la tierra y a continuación ocurre un retorno de flujo principal de la tierra a la nube, a una velocidad aproximada de 2000 a $14000 \text{ cm}/\mu s$.; esto es, aproximadamente de $1/5$ a $1/2$ de la velocidad de la luz.

La variación de la longitud de cada paso (entre descargas) de la descarga principal; es de 10 a 200 metros y a una frecuencia

de 30 a 90 μ s entre cada paso.

En un registro de las 27 descargas separadas (pares de guía y - flujos de retorno). El tiempo entre las descargas sucesivas, tu vo un valor de frecuencia de 0.03 seg. (30,000 μ s.).

En una investigación realizada en el Empire State en la ciudad de New York, a 381 mts. (1250 pies) de altura; se encontró que la mayoría de las descargas la pendiente de la 1ra. descarga -- procediendo de arriba hacia abajo; tenían un retorno de flujo - de abajo hacia arriba en forma similar.

En los registros obtenidos de las descargas en dicho edificio - se encontró; que la mayoría de los casos de descargas repititi- vas tenían una pequeña continuación de corriente, fluyendo en- tre los picos de la corriente sucesiva. En los mismos casos la corriente fué baja, como de 20 amperes. Esta es la corriente - directa natural y puede persistir para la duración entera de la carga, como se ve en la figura 2.5.

La duración máxima de la descarga registrada, fué de 1.5 segun- dos, con una media de duración de 0.3 segundos.

La máxima carga total de la descarga registrada, fué de 164 -- coulombs; con un valor máximo en un pico de corriente de 5 --- coulombs.

La altura de la descarga desde la tierra hasta la base de la nu be, varió de 4877 mts. (16000 pies) con un número mayor entre - 609.6 m. (2000 pies) y 2133.6 m. (7000 pies).

La densidad de la descarga a tierra varió a través del ancho de los límites, dependiendo de la área escogida. Para una área con un radio de 804.5 mts. (1/2 milla), la densidad varió de 10 a 19 descargas por 2.58 Km² (milla cuadrada), mientras que para - una área con un radio de 4.82 Km (3 millas); la densidad varió de 2.9 a 44 descargas por 2.58 Km² (milla cuadrada).



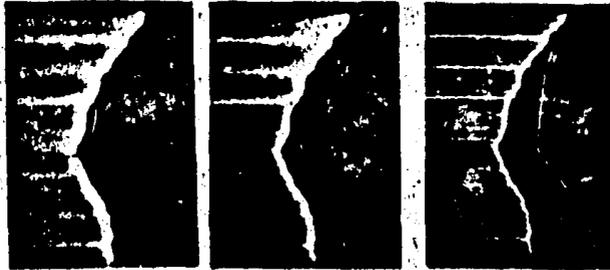
Pendiente inicial de descarga

← Tiempo

Velocidad de propagación 0.29 m/ μ seg (0.98 pies/ μ seg).

Promedio entre intervalos 30.4 seg de long. 7.83 m.

(25.7 pies).



→ Tiempo

2^a descarga.

3^a descarga.

4^a descarga.

Vel. 4.87 m/ μ seg.

Vel. 10.05 m/ μ seg.

Vel. 15.24 m/ μ seg.

(16 pies/ μ seg).

(33 pies/ μ seg).

(50 pies/ μ seg).

Fig. 2.5

Continúa fig. 2.5



→
Tiempo

5^a descarga.

Vel. 22.25 m/ μ seg.

(73 pies/ μ seg).

6^a descarga.

Vel. 13.71 m/ μ seg.

(45 pies/ μ seg).

7^a descarga.

Vel. 13.41 m/ μ seg.

(44 pies/ μ seg).

Rayo No. 16. registrado el 11 de agosto de 1937, en el edificio - Empire State. El rayo consiste de una pendiente inicial de descarga, seguidas por seis descargas subsecuentes; cada descarga contiene un flujo de retorno. Cada descarga subsecuente es seguida - por una descarga continua de baja corriente. La velocidad de propagación de cada descarga es de 30.48 cm/ μ s. (1 pie/ μ seg.) y variando de 4.87 a 22.25 m/ μ s. (16 a 73 pies/ μ s.) para descargas - subsecuentes continuas.

2.3 Métodos para medir la magnitud y polaridad de las corrientes de los rayos.

Entre los métodos más importantes tenemos los siguientes:

- Registrador de la descarga de un rayo.
- El ampérmetro medidor de cresta de corriente y de enlace magnético.

2.3.1 Registrador de la descarga de un rayo.

Fué desarrollado por W. L. Lloyd of Pittsfield Mass. (1929-1932).

Es una pequeña cámara Lichtenberg con película estacionaria la cual es colocada a través de una de las patas de una torre de una línea de transmisión. La teoría del dispositivo, se basa en que una descarga sobre una torre al flamear un aislador puede causar suficiente flujo de corriente sobre la pata de la torre; puede causar una caída de tensión apreciable y consecuentemente imprimir una figura de Lichtenberg sobre la película.

2.3.2 El ampérmetro medidor de cresta de corriente y de enlace magnético.

Este dispositivo fué desarrollado en 1932 por Foust y Kuehni.

Consiste en una pequeña gasa de cobalto - acero insertado en un cilindro de plástico y abierto por su extremo inferior. Dos de estos dispositivos son montados sobre un soporte de madera con un retorno a la pata de la torre con el fin de poder leer y medir la corriente (a manera de un derivador).

El principio de operación de este dispositivo se basa en que al ocurrir una descarga circula a través de la torre una corriente de gran magnitud que induce un campo magnético muy intenso proporcional a la corriente de la descarga que detecta la gasa -

de cobalto - acero. La corriente que circula en la gasea es medida por un miliampérmetro cuyo circuito contiene una batería y un reóstato de ajuste. El miliampérmetro ha sido calibrado previamente por una curva de calibración.

A manera de ilustración se ha considerado conveniente incluir - la tabla 2.1 que presenta el Doctor W.W. Lewis que muestra diversas magnitudes de corriente registradas.

TABLA 2.1

CORRIENTES EN TORRES

(Once líneas de cinco sistemas, 66 a 220 Kv, de 1933 a 1943, inclusive)

(1)	(2)	(3)	(4)
Rango de corrientes, amperes	Número de corrientes en cada rango	Nivel superior	Porcentaje del nivel superior
1,000 - 5,000	617	2,721	100
5,001 - 10,000	816	2,104	77.6
10,001 - 20,000	589	1,288	47.3
20,001 - 30,000	300	699	25.7
30,001 - 40,000	248	399	14.7
40,001 - 50,000	81	151	5.55
50,001 - 60,000	33	70	2.57
60,001 - 70,000	21	37	1.36
70,001 - 80,000	5	16	0.588
80,001 - 90,000	4	11	0.404
90,001 - 100,000	5	7	0.257
100,001 - 110,000	0	2	0.074
110,001 - 120,000	1	2	0.074
120,001 - 130,000	0	1	0.037
132,000	1	1	0.037
T O T A L	2,721		
Número negativo	2,235		
Número positivo	486		
Negativo máximo	132,000		
Positivo máximo	100,000		

2.4 Forma de ondas de impulso

Las ondas de impulso producidas por descargas atmosféricas y - por la operación de interruptores, son de formas muy diversas.

Se ha establecido internacionalmente como la base de referencia formas de ondas con valores normalizados, tanto para tensión como para corriente.

En la figura 2.6.1 se muestra una onda de impulso de tensión - normalizada de $1.2 \times 50 \mu s$. en la figura 2.6.2 se muestra una onda de impulso de corriente, normalizada de $8 \times 20 \mu s$.

En la figura 2.6.3 se muestran las partes características que presenta diversas ondas de impulso de tensión.

$$\left. \begin{array}{l} t_1 - t_2 = 1.2 \mu s. \\ t_1 - t_4 = 80 \mu s. \end{array} \right\} 1.2 \times 80 \mu s.$$

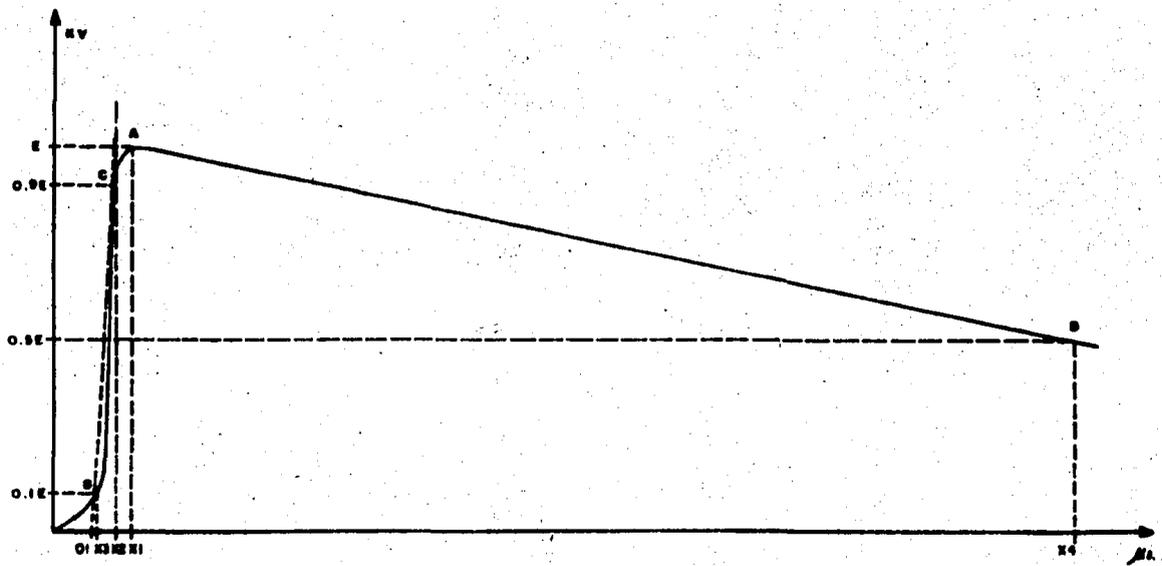


FIGURA 2.6.1 ONDA DE IMPULSO DE TENSION NORMALIZADA

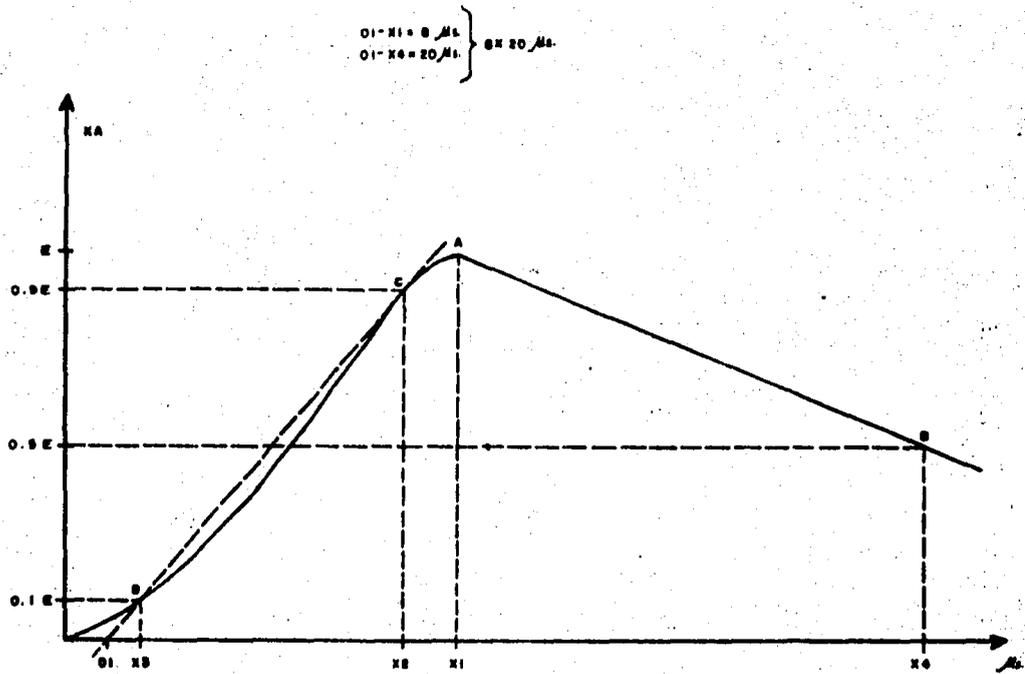


FIGURA 2.6.2 ONDA DE IMPULSO DE CORRIENTE NORMALIZADA

FLAMEO: ES UNA DESCARGA DISRUPTIVA SOBRE UNA SUPERFICIE SOLIDA.

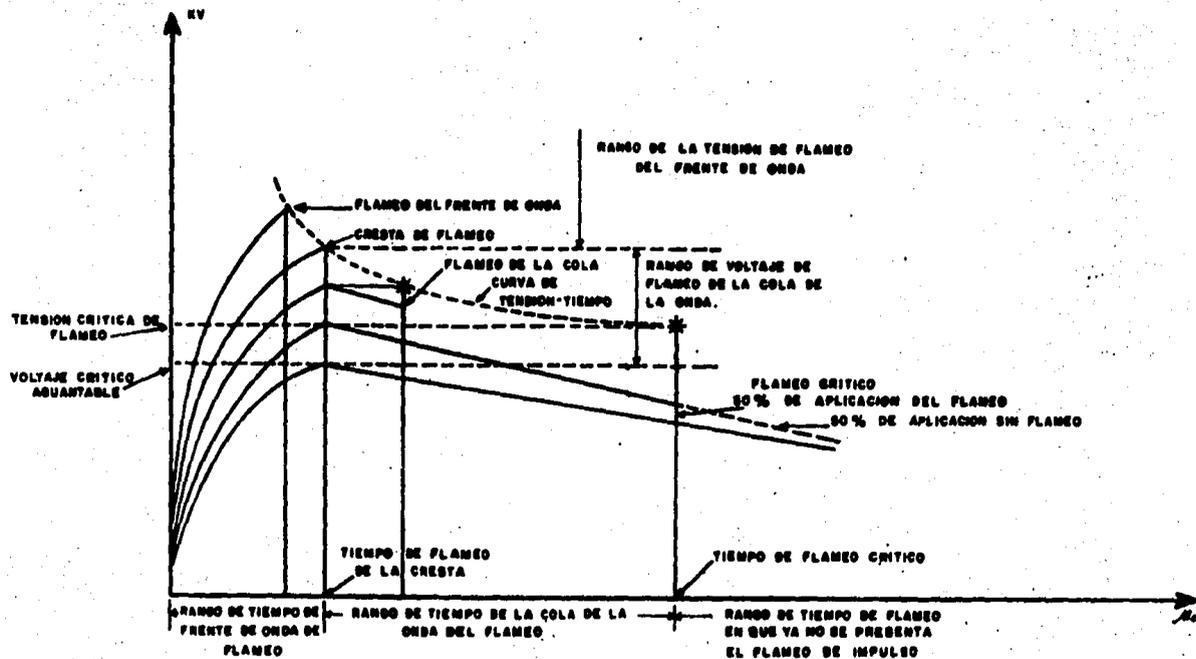


FIGURA 2.6.3

ONDAS DE IMPULSO MOSTRANDO LA TENSION CRITICA DE FLAMEO, LA TENSION CRITICA AJUSTABLE, EL FLAMEO DE LA COLA DE LA ONDA, EL FLAMEO DE LA CRESTA, EL FLAMEO DEL FRENTE DE ONDA Y LA CURVA DE TENSION-TIEMPO.

2.4.1 Nivel básico del aislamiento al impulso (N.B.A.I) conocido también como B.I.L. (Basic Impulse Level).

Con este nombre se designa al valor de tensión de cresta de una onda completa de tensión al impulso.

Para cada valor de tensión nominal le corresponde un valor de N.B.A.I. como se muestra en la tabla 2.2.

TABLA 2.2

VALORES NORMALIZADOS PARA EL NIVEL BASICO DEL AISLAMIENTO AL IMPULSO (N.B.A.I) HASTA 1000 M. DE ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR (S.N.M).

	Tensión nominal (KV)	N.B.A.I. (KV)
Hasta	1.0	10
	1.2 *	30
	2.5 *	45
	5.0 *	75
	13.2	110
	23.0	150
	34.5	200
	69.0	350
	115.0	550
	161.0	750-900
	230.0	1050-1550
	400.0	1550-1675

* Valores restringidos en México.

Estos valores fueron consecuencia de un gran número de observaciones de descargas atmosféricas. Se encontró que aproximadamente el 70% de las descargas atmosféricas tienen una magnitud de cresta igual a, o mayor que 2,000 KV. Se ha registrado un valor máximo de 20,000 KV.

Para poder obtener una descarga de tensión con valor específico en un laboratorio de pruebas, Marx diseñó un dispositivo denominado generador de ondas de tensión al impulso y ondas de corriente al impulso, que consiste esencialmente de una serie de condensadores separados por explosores, que se cargan en paralelo a través de resistencias alimentadas por una fuente de corriente continua. Cuando la carga de cada condensador alcanza un valor determinado, la diferencia de potencial entre los explosores hace saltar un arco entre estos quedando conectados los condensadores en serie, lo que produce un alto voltaje en forma de impulso positivo o negativo (dependiendo de la polaridad con la cual se hayan cargado los capacitores). Este impulso se aplica al equipo cuyo aislamiento se desea probar. La forma de onda producida por el generador de impulsos queda determinada por los valores de las resistencias, inductancias y capacitancias del circuito de descarga.

En la figura 2.7 se muestra el diagrama simple del generador de Marx.

Para altitudes mayores de 1,000 m. s.n.m. los valores N.B.A.I. deben ser corregidos por el factor de la densidad y humedad relativa del aire de acuerdo con la siguiente expresión :

Factor corregido :

$$\text{N.B.A.I.}_{\text{corregido}} = \text{N.B.A.I.}_{\text{s.n.m.}} \times \delta \times H. \quad \text{KV.}$$

En donde:

Densidad relativa del aire (δ)

$$= \frac{0.392 \cdot b}{273 + t} \quad \text{Adimensional.}$$

b= presión atmosférica en cm. de Hg.

t= temperatura en °C.

Humedad del medio ambiente (H).

H - en %

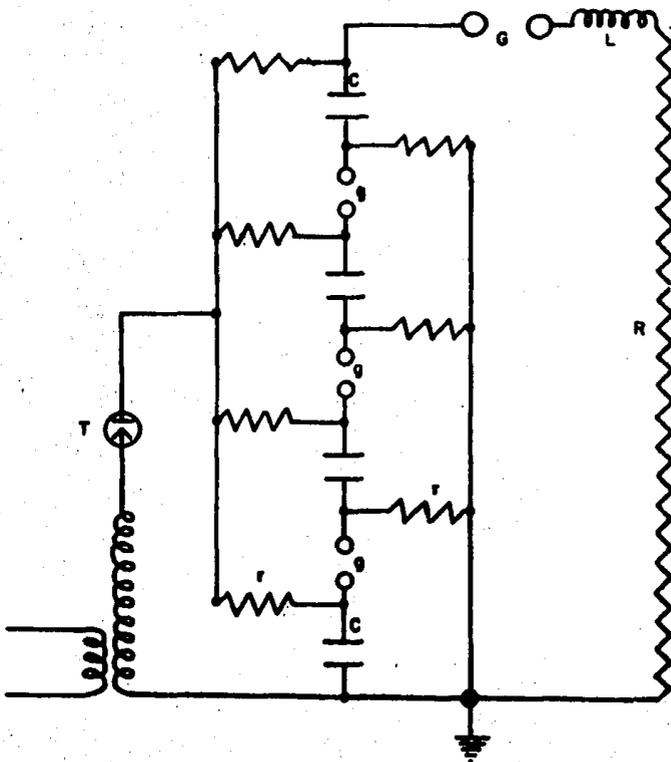


Fig. 2.7

Diagrama simple del generador de Marx.

CAPITULO III

CAPITULO III

3. FUNCIONAMIENTO, CLASIFICACION, PRUEBAS Y SELECCION DEL APARTARRAYOS

3.1 Funcionamiento del apartarrayos

El apartarrayos opera dentro de un rango de tensiones bien definidas, tomando un límite máximo y uno mínimo de operación. El máximo es un valor superior a la tensión nominal del sistema y el mínimo un valor ligeramente inferior a dicha tensión nominal, dependiendo de los valores de norma y diseño del fabricante. Tiene similitud de operación con un semiconductor en conducción en su nivel superior y como un circuito abierto o de impedancia infinita en su nivel inferior. Dicha sobretensión se deriva a tierra - en forma de corrientes muy elevadas que pasan a través de las - distancias de arco a los cilindros autovalvulares hasta la terminal de tierra, pasando por el indicador de fallas.

Cuando se presenta el fenómeno (sobretensión), el apartarrayos - debe descargar las sobretensiones y ser capaz de interrumpir la corriente remanente cuando termine el primer medio ciclo a frecuencia normal de la línea. O sea, esto significa extinción del fenómeno en forma completa en $1/120$ de segundo para frecuencia - de 60 hz.

Cuando se le aplica al apartarrayos una sobretensión transitoria de magnitud suficientemente alta para producir el cebado o flameo de los explosores. El apartarrayos se convierte en semiconductor y la energía asociada con la onda de la sobretensión transitoria se descarga a tierra a través de los discos del material cerámico que constituyen el elemento valvular.

Estos discos presentan una resistencia baja al paso de la corriente cuando la tensión aplicada disminuye, lo que limita la -

corriente de baja frecuencia que circula por el apartarrayos al convertirse este en un semiconductor, a un valor tal que el arco eléctrico entre los explosores se extingue definitivamente al primer paso de la corriente de baja frecuencia por cero y el apartarrayos vuelve a comportarse como aislador.

En la figura 3.1 se muestra el funcionamiento del apartarrayos.

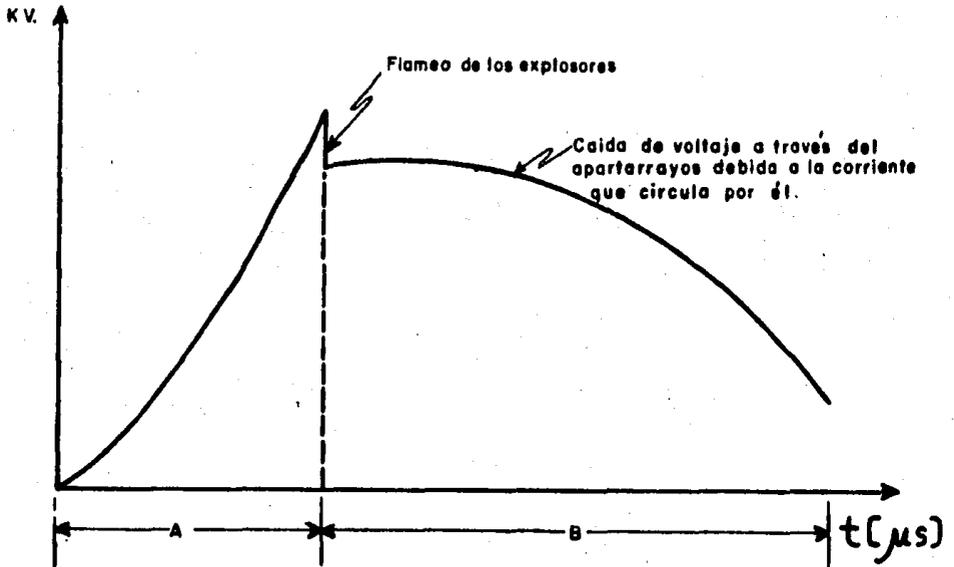


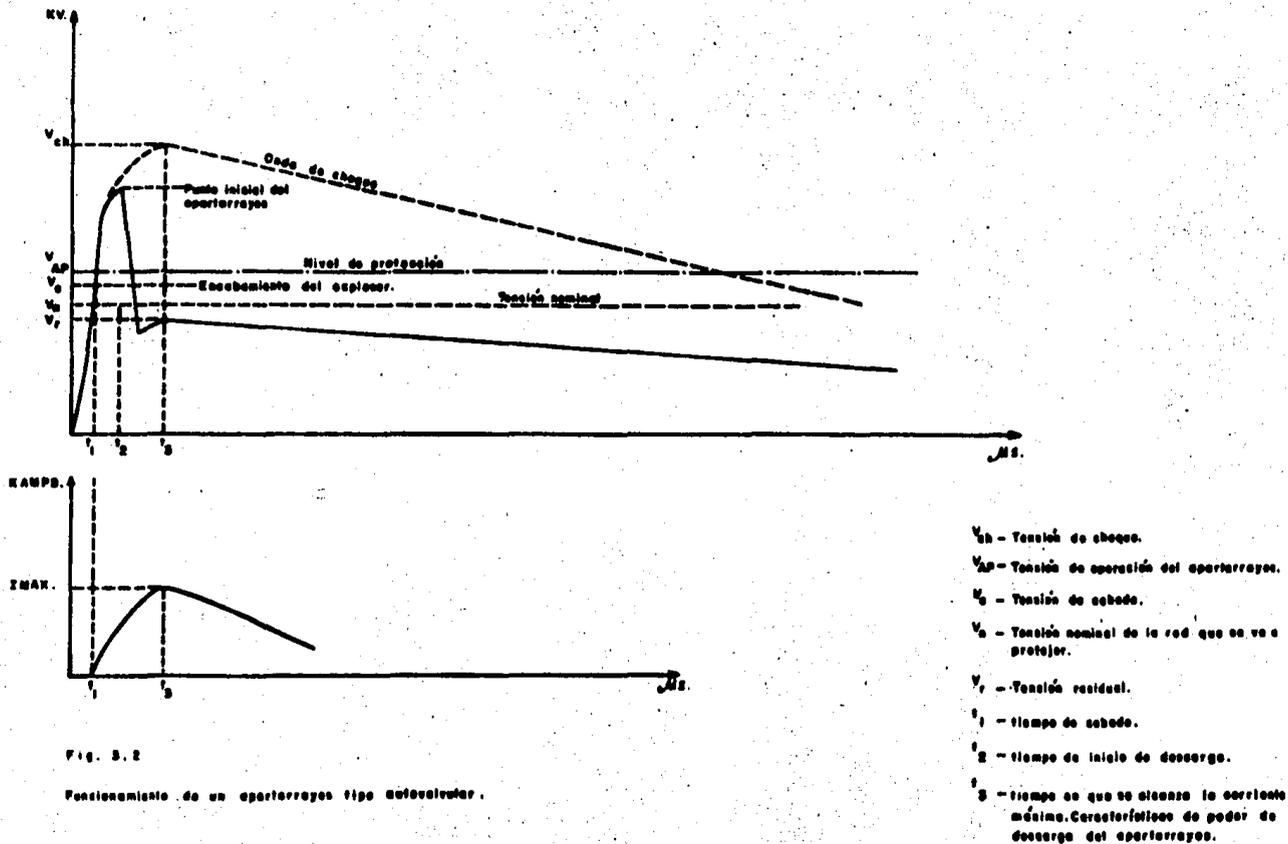
Fig. 3.1

Funcionamiento del apartarrayos.

En el intervalo "A" no existe corriente de descarga a través del apartarrayos. Este se comporta como aislador.

En el intervalo "B" sí existe corriente de descarga a través del apartarrayos. Este se comporta como una resistencia variable.

En la figura 3.2 se muestra el diagrama del funcionamiento de un apartarrayos tipo autovalvular.



3.2 Clasificación de los apartarrrayos

Los apartarrrayos están clasificados en dos grupos, de acuerdo con su principio de funcionamiento:

- Apartarrrayos tipo expulsión.
- Apartarrrayos tipo autovalvular.

3.2.1 Apartarrrayos tipo expulsión

Consiste de un explosor exterior al apartarrrayos y un elemento tubular de fibra encapsulado en un cilindro de porcelana, como se muestra en figura 3.3.

Los apartarrrayos tipo expulsión trabajan bajo el principio de romper el arco a base de una expulsión de gases, los cuales se forman al pasar la corriente de descarga por un elemento tubular de fibra, volatilizando una delgada capa de este material que da lugar a un fuerte desprendimiento de gases que provoca el corte del arco.

Después de haber actuado como extintor del arco, los gases y vapores se expulsan a la atmósfera por el canal que forma un deflector metálico.

Gracias a las propiedades especiales de la fibra no se forma sobre las paredes un depósito conductor después del paso del arco y la erosión que sufre la fibra es pequeña.

Inmediatamente después de la interrupción de la corriente, el apartarrrayos vuelve a su función inicial de aislador y queda listo para una nueva operación.

3.2.2 Apartarrrayos tipo autovalvular

Son los de uso más generalizado y están constituidos por cáma-

ras de arqueo y cilindros autovalvulares conectados en serie - así como de resistencias de control de alto valor óhmico conectadas en paralelo con los cilindros mencionados. Todas las partes anteriores están autocontenidas en un tubo de porcelana lleno de nitrógeno u otro gas inerte sellado herméticamente. Lo que impide que la humedad y la variación de la densidad del aire exterior alteren la operación correcta de la cámara de arqueo para la cual ha sido diseñado el apartarrayos, en la figura 3.4 se muestran las partes constitutivas de este tipo de apartarrayos.

A continuación se describen las partes mas importantes del apartarrayos tipo autovalvular, que son:

- La cámara de arqueo. Está formada por explosores calibrados de acuerdo a dos parámetros: la distancia que permita la formación del arco al valor de la tensión máxima de fase a neutro indicada en el inciso 3.1 y a la altitud de operación requerida.
- Los explosores. Están fabricados de diferentes materiales y formas según su propio diseño. Algunos de dichos materiales son tales como electrodos anulares y cilíndricos, cuerpos y separadores de esteatita y anillos de cobre.
- Cilindros valvulares. Están en serie con los explosores y su función es conectar una baja resistencia óhmica entre fase y tierra durante la operación del apartarrayos, dicha resistencia de respuesta no lineal varia inversamente proporcional a la corriente que circula por los cilindros.
- Resistencias de control. Se usan principalmente en los apartarrayos tipo Estación; son de un valor óhmico elevado y están conectados en paralelo con los explosores y elementos

valvulares, con objeto de permitir la circulación de una corriente pequeña (millamperes) que es llamada corriente de control, que permite tener una distribución uniforme de la tensión a través de todas las secciones de que está formado el apartarrayos.

- **Indicador de fallas.** Tiene por objeto desconectar la terminal de tierra, en caso de una remota falla del apartarrayos. El indicador es un elemento que funciona instantáneamente asegurando una protección positiva, evitando se sostenga la falla a tierra y dando una indicación visual.

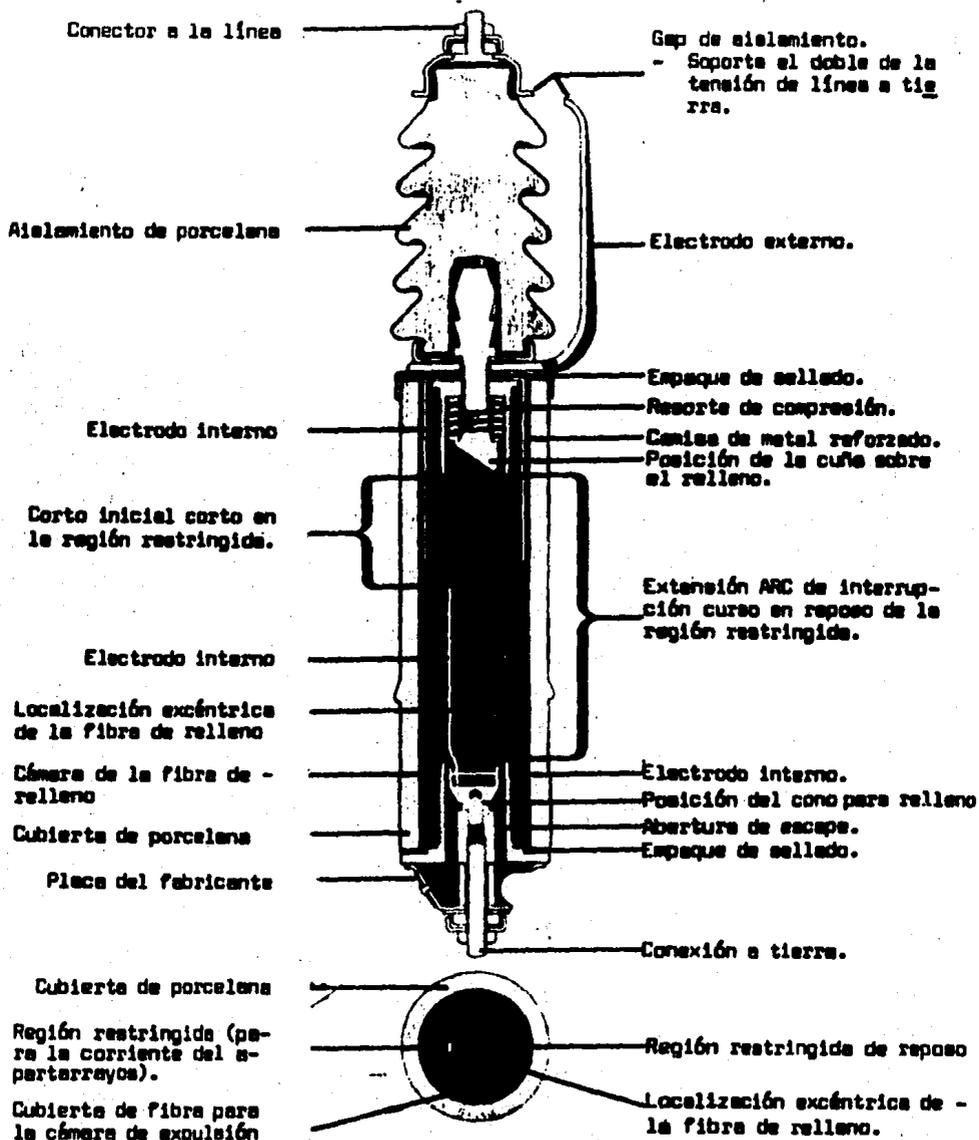


Fig. 3.3
 Apartarreyos tipo expulsión.

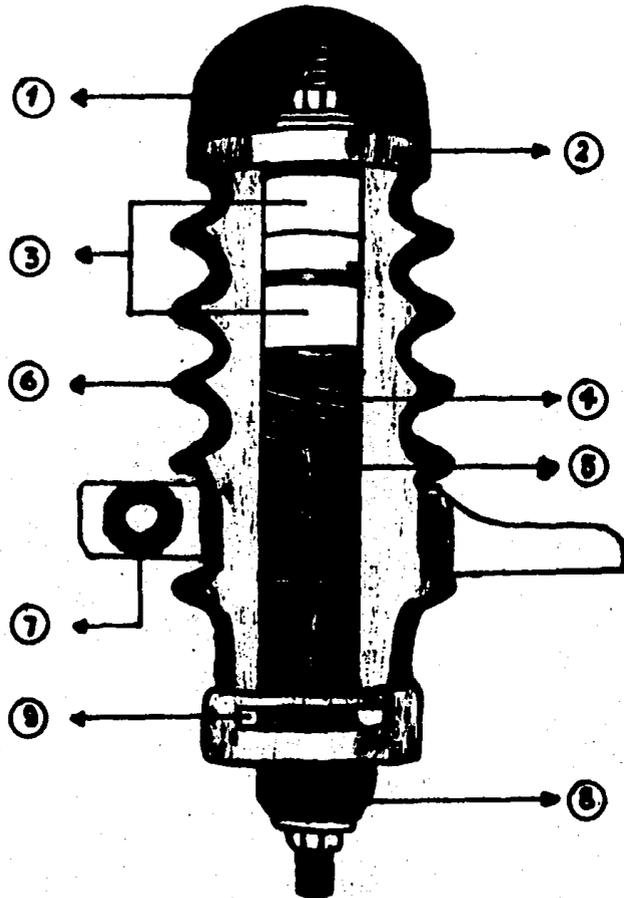


Fig. 3.4

Partes constitutivas de un aparterrayos autovalvular

1. Capuchón aislante.
2. Terminal superior, conector y tapa inferior.
3. Conjunto de cámaras de arco.
4. Resorte de contacto con derivador.
5. Cilindros autovalvulares.
6. Porcelana fabricada bajo proceso húmedo.
7. Abrazadera galvanizada.
8. Indicador de fallas.
9. Sello rolado.

TABLA 3.1

Clasificación normalizada de los apartarrayos

Tensiones nominales, KV (rnc)

1500 A (Secundarios)	5 000 A Serie B (Distribución)	5000 A Serie A (Intermedios)	10000 A (Estación)
0.175	3	3	3
0.280	4.5	6	6
0.500	6	9	9
0.660	7.5	12	12
	9	15	15
	10	21	21
	12	24	24
	15	27	27
	18	30	30
	21	33	33
	24	36	36
	27	39	39
	30	42	42
		48	48
		51	51
		54	54
		60	60
		72	72
		75	75
		84	84
		90	90
		96	96
		102	102

Continúa Tabla 3.1

1 500 A (Secundarios)	5 000 A Serie B (Distribución)	5 000 A Serie A (Intermedios)	10 000 A (Estación)
		108	108
		120	120
			126
			138
			144
			150
			168
			174
			180
			186
			192
			198
			230
			240
			258
			276
			294
			312
			372
			396
			420
			444
			468
			492
			510
			576
			612
			648
			684

3.3 Pruebas

Estas pruebas serán efectuadas de acuerdo a las normas nacionales vigentes y son las que se muestran en la tabla siguiente:

TABLA 3.2

Pruebas de Diseño, Rutina y Aceptación

PRUEBA	DISEÑO			RUTINA			ACEPTACION					
	10,000 AMPS	5,000 AMPS. SERIE A SERIE B		1500 AMPS	10,000 AMPS	5,000 AMPS. SERIE A SERIE B		1500 AMPS	10,000 AMPS	5,000 AMPS. SERIE A SERIE B		1500 AMPS
1	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
2	*	*	*						*	*	*	
3	*	*	*	*								
4	*											
5	*	*	*	*					*	*	*	*
6	*	*	*									
7	*	*	*	*								
8	*	*	*									
9	*	*	*	*								
10	*	*	*	*								

* Son las pruebas que se realizan a los aparterreyos.

En donde las pruebas son las siguientes;

1. Tensión de descarga a frecuencia del sistema.
2. Descarga al impulso con tensión normalizada, equivalente a un rayo, 1.2×50 seg.
3. Descarga con frente de onda de tensión de impulso.
4. Prueba para determinar la curva de tensión de descarga al impulso por maniobras de interruptores-tiempo.
5. Tensión residual.
6. Corriente al impulso.
7. Operación.
8. Alivio de presión.
9. Prueba del dispositivo de desconexión del apartarrayos.
10. Tensión de ionización interna y tensión de radio interferencia.

3.4 Información requerida para efectuar la selección de un apartarrayos.

Diagrama unifilar del sistema que contenga todos los datos eléctricos (capacidades, tensiones nominales; reactancias de secuencia positiva, negativa y cero de los generadores, impedancia de los transformadores, impedancia y admitancia de las líneas, e impedancias de las cargas, conexiones de los diversos equipos).

Como condición particular del punto donde se pretende instalar el apartarrayos deberá conocerse:

1. Tensión nominal.
2. Valor del N.B.A.I. de acuerdo con la coordinación del aislamiento en el sistema.
3. Altitud.

Con el fin de hacer una correcta selección de un apartarrayos se ha establecido una clasificación del comportamiento de los sistemas en cuanto a la forma de conexión a tierra.

Para realizar esta clasificación se han contemplado valores de dos cocientes:

R_0/X_1 y X_0/X_1 , siendo R_0 , X_0 , y X_1 la resistencia de secuencia cero, reactancia de secuencia cero y secuencia positiva respectivamente.

Esta clasificación se muestra en la tabla 3.3.

TABLA 3.3

Tipos de sistemas de acuerdo con su conexión a tierra.

Tipo de conexión a tierra	Estado del neutro	X_0/X_1	R_0/X_1
A	Conectado	$0 < X_0/X_1 < 3$	$0 < R_0/X_1 < 1$
B	Conectado	$0 < X_0/X_1 \leq 3$	$0 < R_0/X_1 \leq 1$
C	Conectado	$X_0/X_1 > 3$	$R_0/X_1 > 1$
D	Aislado	$-40 < X_0/X_1 < -4$	-----
E	Aislado	$-40 < X_0/X_1 < 0$	-----

- Tipo A. Son sistemas con neutro a tierra cuya relación R_0/X_1 es mayor que cero y menor a uno y X_0/X_1 es mayor que cero y menor que tres. Estos sistemas llevan cuatro hilos con neutro múltiple y conexiones de distribución, llamados comunmente multiterizados.

- Tipo B. Para sistemas con tierra múltiple con relación de reactancia (X_0/X_1) positiva y menor de 3 y aquellos cuya relación de resistencia (R_0/X_1) sea positiva y menor de uno en cualquier punto del sistema.

Este sistema es usualmente definido como "Efectivamente Aterrizado o Firmemente Aterrizado".

- Tipo C. Este sistema con todo y tener el neutro aterrizado, no llena los requerimientos del sistema tipo B, porque la relación de reactancia es mayor de tres con valor positivo: Sistemas usando tierra "Falsa" se incluyen en esta clasificación.

- Tipo D. Este sistema tiene el neutro aislado, en el cual la reactancia de secuencia cero es capacitiva y su relación (X_0/X_1) es negativa y queda comprendida entre menos de 40 y menos infinito.

- Tipo E. Este sistema con neutro aislado es el que no queda entre los límites del tipo D.

Se caracteriza por una corriente de carga relativamente alta o una reactancia de secuencia cero, positiva y muy alta. Para este sistema la relación de reactancia (X_0/X_1) es negativa con límites, es posible se tengan efectos de resonancia parcial, así que cada caso debe analizarse y tratarse individualmente.

Los valores de los cocientes de la tabla 3.3 pueden verse en for

ma gráfica en la figure 3.5.

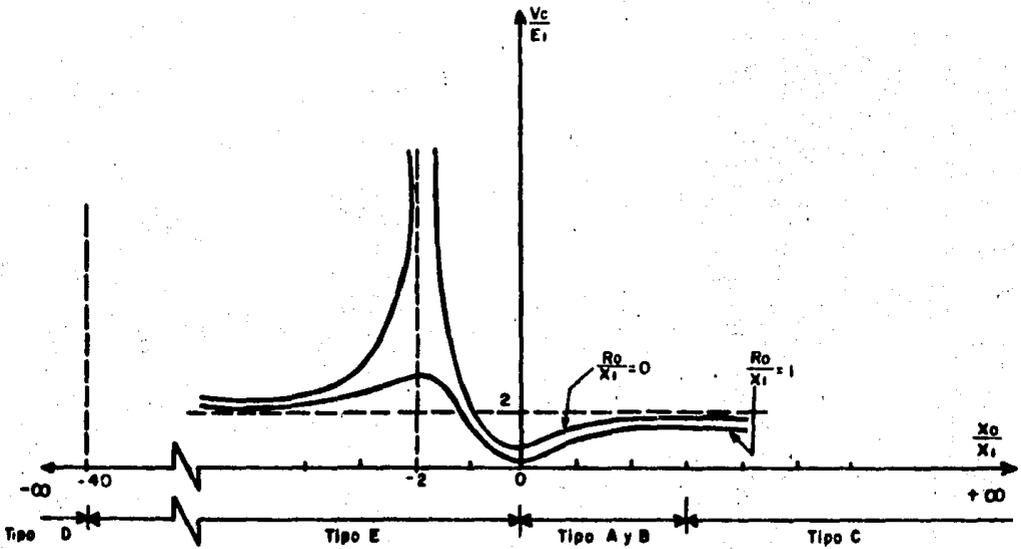


Fig. 3.5

Valores de $\frac{R_0}{X_1}$, $\frac{X_0}{X_1}$

En la gráfica de la figura 3.6 se representan las máximas tensiones de frecuencia fundamental, entre fase y tierra que pueden aparecer en condiciones de falla monofásica a tierra. Las sobretensiones de baja frecuencia que pueden producirse en estos sistemas a causa de una falla monofásica a tierra no exceden del 80% de la tensión entre hilos existentes antes de la falla.

Por lo tanto en estos sistemas podran utilizarse apartarrayos cuya tensión nominal, es igual a la tensión de decaebado, sea el 80% la máxima tensión de operación entre hilos. Para tomar en cuenta las elevaciones de tensión de operación que pueden producirse para varias condiciones de operación, por ejemplo al final

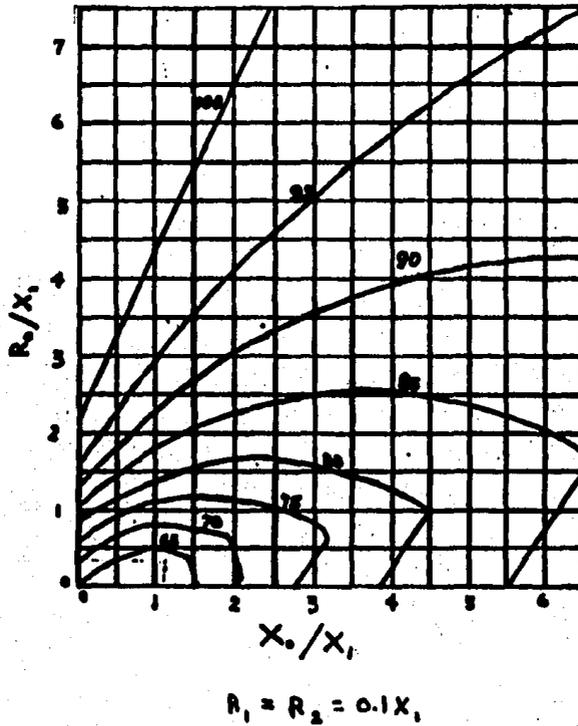


Fig. 3.6

NOTA: Los números colocados sobre las curvas indican la tensión máxima de fase a tierra que puede aparecer en cualquiera de las fases, expresada en porciento de la tensión normal entre fases.

Tensiones máximas entre fase y tierra en el lugar de la falla, - para sistemas con neutro conectado a tierra, bajo cualquier condición de falla.

de una línea larga en vacío o con poca carga, o bien a causa de una pérdida súbita de carga de un generador, se suele tomar como tensión máxima de operación una tensión del 5% mayor que la tensión normal de operación.

Niveles de aislamiento al impulso normalizado. Con el objeto de normalizar el aislamiento de los aparatos eléctricos, se fijó, en 1941, por un comité conjunto AIEE-EEL-NEMA, un Nivel Básico de Aislamiento al Impulso correspondiente a cada clase de tensión. Estos niveles de aislamiento quedan coordinados con el uso del apartarrayos de una tensión nominal igual a la máxima tensión entre hilos de operación del sistema.

En los sistemas con los neutros conectados directamente a tierra, pueden utilizarse apartarrayos cuya tensión nominal sea el 80% de la máxima tensión entre hilos de operación. Por esta razón, en este tipo de sistemas para clases de aislamiento de -- 115 Kv.

O mayores se reducen, frecuentemente, un escalón al aislamiento de los transformadores protegidos por apartarrayos, o sea que se utilice el nivel de aislamiento correspondiente a la clase de aislamiento correspondiente, inmediatamente inferior. A continuación se presenta la tabla 3.4 que contiene la clase de aislamiento, N.B.A.I. completo y el N.B.A.I. reducido.

TABLA 3.4

Clases de aislamiento, completo y reducido.

Clase de - aislamiento	Nivel básico de aislamiento al - impulso completo	Nivel básico de aislamiento al - impulso reducido
KV	KV	KV
5.0	75	-
8.7	95	-
15.0	110	-
23.0	150	-
34.5	200	-
46.0	250	-
69.0	350	-
92.0	450	-
115.0	550	450
138.0	650	550
161.0	750	650
230.0	1050	900
287.0	1300	1050
345.0	1425	1300
400.0	1550	1425
500.0	-	1550

Con respecto a la altitud sobre el nivel del mar del sistema eléctrico, este implica una disminución de la presión atmosférica, disminuyendo el nivel de aislamiento de los aisladores en el aire, por lo que es necesario aumentar el aislamiento externo de las instalaciones con respecto al que sería necesario al nivel del mar, para obtener el nivel de aislamiento requerido.

do a la altitud considerada.

La altura en metros sobre el nivel del mar esta representada por la expresi3n siguiente:

$$\text{Altura} = 8055.62 \text{ Ln } \frac{76.238}{P. \text{ Atmos}} \quad \text{m}$$

Al despejar de la relaci3n anterior la presi3n atmosf3rica queda representada como:

$$P. \text{ Atmosf3rica} = \frac{76.238}{\frac{\text{Altura}}{8055.62}} \quad \text{cm. Hg.}$$

Por otro lado considerando el factor de densidad del aire que es ta definido por la expresi3n siguiente:

$$= \frac{3.92 \text{ b}}{273 + T}$$

Donde:

b Es la presi3n barom3trica en cm. Hg.

T Es la temperatura ambiente en °C.

Con la altitud, presi3n atmosf3rica y la densidad del aire obtenemos la tabla 3.5.

Otro punto importante a considerar es la tensi3n de operaci3n - del apartarrayos por sobretensiones debidas a la operaci3n de in-
terruptores, ya que en este caso se deben coordinar el nivel de
aislamiento por operaci3n de interruptores de los equipos por -
proteger, se considera 0.83 de N.B.A.I. segun normas, la sobre-
tensi3n m3xima originada por la operaci3n de interruptores y el
valor de operaci3n del apartarrayos por sobretensiones de este -
tipo.

Para seleccionar la tensi3n de operaci3n del apartarrayos por so-
bretensiones ocasionadas por la operaci3n de interruptores en un

sistema eléctrico, se considera lo siguiente:

- a) Considerando un nivel de aislamiento al impulso para los devanados de los transformadores, se tiene que el nivel del aislamiento por operación de interruptores es: N.B.A.I. x 0.83.
- b) Según la norma la sobretensión máxima por operación de interruptores no debe ser mayor de 2.5 veces el valor de cresta de la tensión nominal de fase a tierra, es decir:

$$\frac{\text{KV. Sistema} \times 2 \times 2.5}{3} \quad \text{KV.}$$

TABLA 3.5

Valores de los factores de corrección para el N.B.A.I.

Altura M.S.N.M.	Presión mm. Hg.	Densidad relativa
0	760	1.0
100	753	.99
200	744	.98
300	735	.97
400	725	.95
500	716	.94
600	708	.93
700	699	.92
800	690	.91
900	682	.90
1000	673	.89
1100	665	.88
1200	657	.86
1300	649	.85
1400	641	.84

Continúa tabla 3.5

Altura M.S.N.M.	Presión mm. Hg.	Densidad relativa
1500	633	.83
1600	626	.82
1700	617	.81
1800	610	.80
1900	602	.79
2000	595	.78
2100	587	.77
2200	580	.76
2300	566	.75
2400	561	.74
2500	559	.74
2600	552	.73
2700	545	.72
2800	539	.71
2900	532	.70
3000	525	.69
3100	519	.68
3200	512	.67
3300	506	.67
3400	500	.66
3500	494	.65
3600	488	.64
3700	482	.63
3800	476	.63
3900	470	.62
4000	464	.61

c) Se selecciona la tensión de operación de los aparterreyos para sobretensiones por operación de interruptores con un valor mayor en un 9 ó 10% que la tensión del inciso b.

- d) Se adopta cualquiera de las dos tensiones del inciso anterior.
- e) Para la operación del apartarrayos para ondas de la naturaleza indicada, por lo que se obtiene el margen de protección del equipo por proteger, y queda representado por la expresión siguiente:

$$\text{Margen de protección} = \frac{\text{N.A.O.I.} - \text{T.O.A.}}{\text{T.O.A.}} \times 100$$

En donde: N.A.O.I. es el nivel del aislamiento por operación de interruptores T.O.A. es la tensión de operación del apartarrayos.

La coordinación de los valores antes señalados - debe hacerse de tal manera que la tensión de operación del apartarrayos para este tipo de sobretensiones originada por la operación de interruptores y menor que el nivel de aislamiento por operación de interruptores del equipo por proteger.

3.5 Localización de los apartarrayos.

Una de las consideraciones importantes para lograr una buena protección contra sobretensiones transitorias en subestaciones es precisamente la localización correcta de los apartarrayos.

Lo anterior se debe a que los apartarrayos tienen una zona de protección a ambos lados del lugar donde se ubique, de tal manera que la protección es máxima en el punto de su instalación y disminuye gradualmente a medida que se va separando del apartarrayos, por lo que a una distancia mayor del apartarrayos ya no protege al equipo.

La tensión que aparece en un punto a una distancia determinada -

del apartarrayos originada por una onda de sobretensiones esta -
dada por la relación siguiente :

$$E_x = E_0 + 2 \left(\frac{d}{dt} e \right) \frac{\%L}{300} \text{ KV}$$

Donde:

E_x = Tensión que aparece en el punto "x".

E_0 = Tensión de operación del apartarrayos.

$\frac{d}{dt} e$ = Pendiente de el frente de la onda incidente en
KV/Micro seg.

L = Distancia en metros de conductor comprendido entre el punto
a considerar.

Para determinar la separación máxima entre el transformador y -
los apartarrayos, partiendo de la tensión máxima admisible en di
cho transformador, podemos emplear la relación siguiente.

$$L = \frac{300 (E_m - E_0)}{2 \frac{d}{dt} e} \text{ m.}$$

Donde:

L = Separación máxima en metros.

E_m = Tensión máxima permisible en el equipo por proteger. Los -
dos restantes se especificaron anteriormente.

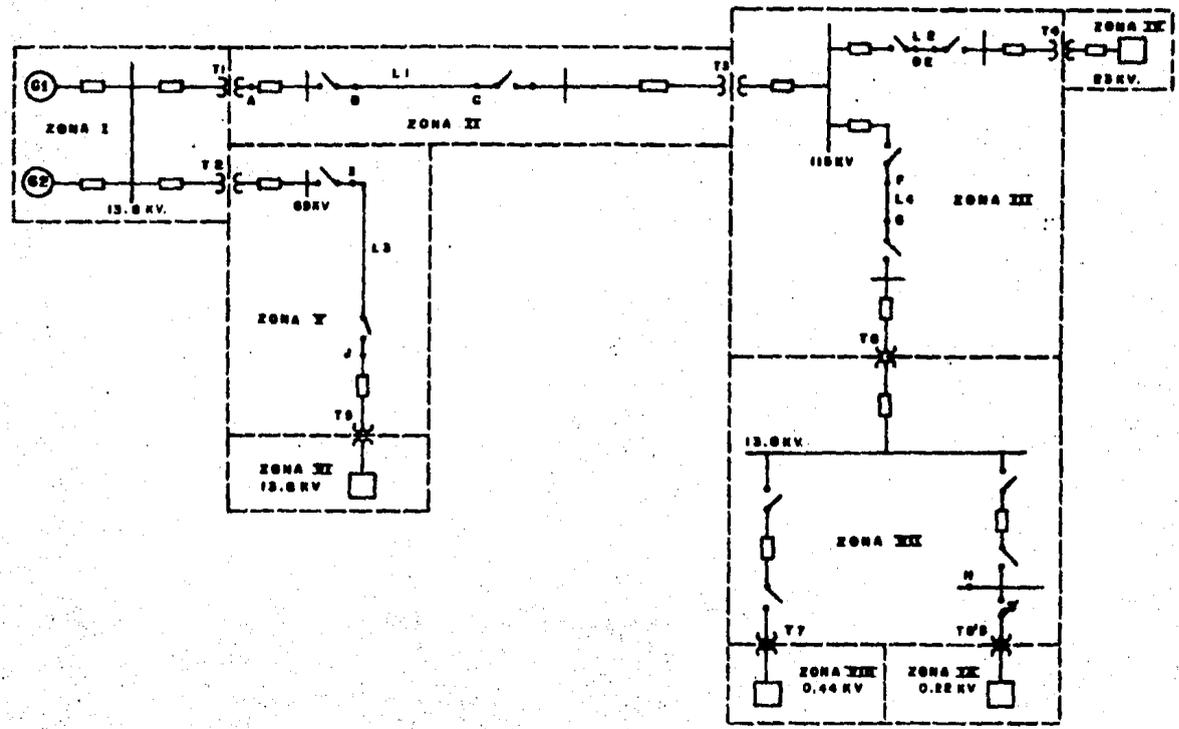
CAPITULO IV

CAPITULO IV

4. EJEMPLO QUE MUESTRA LA SELECCION DE APARTARRAYOS EN UN SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA DADO.

Se ha propuesto un sistema eléctrico de potencia que se muestra en el diagrama unifilar de la siguiente página, en el cual se hará la selección de los - apartarrayos en los lugares indicados.

DIAGRAMA UNFILAR DEL SISTEMA ELECTRICO POR ZONAS



DATOS DEL SISTEMA

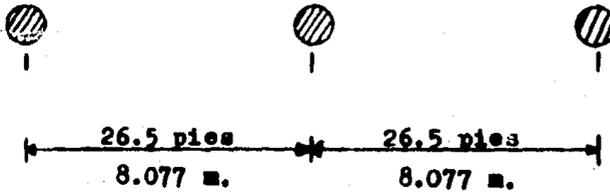
G ₁	G ₂	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	FCA. CENTO	IND.	CR. MADERA	RED. DIST.	UNIDA
15	15	25	5	25	10	5	15	10	0.225	25	15	5	10	5	10	10	0.225	EVA
15.0	15.0	15.0- 250	15.0- 60	250- 115	115- 25	25- 15.0	115- 15.0	15.0- 22/MY	13.0- 22/MY	250	115	60	115	15.0	0.400	25	0.225	EV
2.10. 3 PA 14.0. 0 PA 15.0. 2 PA		5%	6%	6%	7%	6%	7%	8%	5.5%									Z
0.0 Atro	0.0 Atro	0.0 Atro	0.0 Atro	0.0 Atro	0.0 Atro	0.0 Atro	0.0 Atro	0.0 Atro	0.0 Atro					0.0 Atro	0.0 Atro	0.0 Atro	0.0 Atro	F.P
										250	100	50	100					EN.
										ACSR	ACSR	ACSR	ACSR					CABLE
										6/7	6/7	6/1	6/7					CABLE

Distancia entre los conductores de las líneas de transmisión.

LINEA 1.

230 KV., 250 KM., 25 MVA.

COND. CABLE ACSR 900 M.C.M. 54/7.



LINEA 2 Y 4.

LINEA 2.

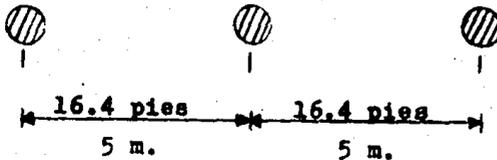
115 KV., 100 KM., 15 MVA.

COND. CABLE ACSR 900 M.C.M. 54/7.

LINEA 4.

115 KV., 100 KM., 10 MVA.

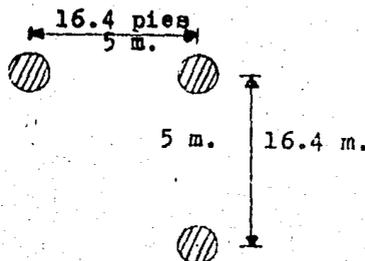
COND. CABLE ACSR 900 M.C.M. 54/7.



LINEA 3.

69 KV., 50 KM., 5 MVA.

COND. CABLE ACSR 2/0 M.C.M. 6/1.



LINEA 1.

CALCULO DE LOS PARAMETROS "Z" Y "Y".

DATOS:

LINEA A 230 KV., 250 KM., 25 MVA.

COND. CABLE ACSR 900 M.C.M. 54/7.

LONG. 250 KM. = 155.4 Millas.

DISTANCIA MEDIA GEOMETRICA.

D.M.G. = $\sqrt[3]{26.5(26.5)(53)} = 33.4$ pies. = 10.18 m.

FREC. 60 HZ.

$V_g = 230 \angle 0^\circ$ KV. $|\tilde{I}_r| = \frac{\text{KVA.}}{\sqrt{3} \text{ KV.}} = \frac{25,000}{\sqrt{3} (230)} = 62.75$ amperes.

$Z = R + jX_L$ $Y = \overset{0}{G} - jB = -jB$

DE TABLAS:

$I_{\text{max. cond.}} = 970$ Amperes.

$r = 0.104 \Omega/\text{millas}$

$X_a = 0.393 \Omega/\text{milla a 1 pie de separación.}$

$X_d = 0.4279 \Omega/\text{milla}$

$X'_a = 0.0898 \text{ M}\Omega \cdot \text{Milla a 1 pie de separación.}$

$X'_d = 0.1046 \text{ M}\Omega \cdot \text{Milla.}$

$R = r \times \text{LONG.} = 16.16 \Omega$

$X_L = (X_a + X_d) \times \text{LONG.} = 127.56 \Omega$

$Z = 16.16 + j127.56 \Omega = 128.57 \angle 82.77^\circ \Omega$

$jB = \frac{1}{-jX_C}$ $B = \text{Suceptancia capacitiva.}$

$X_C = (X'_a + X'_d) \times \frac{1}{\text{LONG.}} = 1252 \Omega$

$B = \frac{1}{X_C} = 8 \times 10^{-4} \text{ } \mathcal{U}$

$Y = -jB = -j8 \times 10^{-4} \mathcal{U} = 8 \times 10^{-4} \angle -90^\circ \mathcal{U}$

CALCULO DEL FACTOR DE REGULACION.

$$\tilde{V}_g = 230 \angle 0^\circ \text{ KV.} ; \tilde{V}_{gN} = \frac{230 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} = 132.79 \angle 0^\circ \text{ KV.}$$

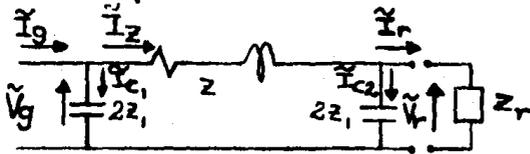
$$Z = 16.16 + j127.56 \Omega = 128.57 \angle 82.7^\circ \Omega$$

$$X_c = 1252 \Omega$$

La mitad de la reactancia capacitiva será :

$$z_c = -j X_c$$

$$2z_c = -j(2)(1252) \Omega = -j2504 \Omega = 2504 \angle -90^\circ \Omega$$



Ecuaciones.

$$\tilde{I}_g = \tilde{I}_{c1} + \tilde{I}_z ; \tilde{I}_z = \tilde{I}_r + \tilde{I}_{c2}$$

$$\Rightarrow \tilde{I}_g = \tilde{I}_{c1} + \tilde{I}_r + \tilde{I}_{c2}$$

$$\tilde{V}_g = \tilde{I}_z Z + \tilde{V}_r = \tilde{V}_z + \tilde{V}_r ; \tilde{V}_g = \tilde{V}_{c1} ; \tilde{V}_r = \tilde{V}_{c2}$$

$$\tilde{I}_g = \frac{\text{kVA}}{\sqrt{3} \text{ KV}} = 62.75 \angle 0^\circ \text{ Amps.}$$

$$\tilde{I}_{c1} = \frac{\tilde{V}_{gN}}{2z_c} = 10.29 \angle 90^\circ \text{ Amps.} = j10.29 \text{ Amps.}$$

$$\tilde{I}_z = \tilde{I}_g - \tilde{I}_{c1} = 63.59 \angle -9.31^\circ \text{ Amps.}$$

$$\tilde{V}_z = \tilde{I}_z Z = 8175.76 \angle 73.46^\circ \text{ Volts.} = 2327.5 + j7837.45 \text{ Volts.}$$

$$\tilde{V}_r = \tilde{V}_g - \tilde{V}_z = 130.7 \angle -3.44^\circ \text{ KV.}$$

$$\% \text{ Reg} = \frac{V_g - V_r}{V_r} \times 100$$

$$\% \text{ Reg} = 1.6\%$$

LINBA 2.

CALCULO DE LOS PARAMETROS "Z" Y "Y".

DATOS:

LINBA A 115 KV., 100 KM., 15 MVA.

COND. CABLE ACGR 900 M.C.M. 54/7.

LONG. 100 KM. = 62.15 MILLAS.

DISTANCIA MEDIA GEOMETRICA.

D.M.G. = $\sqrt[3]{5(5)(10)} = 6.5 \text{ m.} = 20.7 \text{ pies.}$

FREC. 60HZ.

$V_g = 115/\sqrt{3} \text{ KV.}$ $|I_r| = \frac{\text{KVA.}}{3 \text{ KV.}} = 75.3 \text{ Amps.}$

$Z = R + jX_L$ $Y = \frac{1}{jB} = -jB$

DE TABLAS:

$I_{\text{max. cond.}} = 970 \text{ Amps.}$

$r = 0.104 \ \Omega/\text{milla.}$

$X_m = 0.393 \ \Omega/\text{milla a 1 pie de separación.}$

$X_d = 0.3694 \ \Omega/\text{milla.}$

$X'_m = 0.0898 \ \Omega/\text{milla a 1 pie de separación.}$

$X'_d = 0.0903 \ \Omega/\text{milla.}$

$R = r \times \text{LONG.} = 6.46 \ \Omega$

$X_L = (X_m + X_d) \times \text{LONG.} = 47.38 \ \Omega$

$Z = 6.46 + j47.38 \ \Omega = 47.81 \angle 82.23^\circ \ \Omega$

$B = \frac{1}{X_c}$ $B = \text{Suceptancia capacitiva.}$

$X_c = (X'_m + X'_d) \times \frac{1}{\text{LONG.}} = 2897.88 \ \Omega$

$B = 3.5 \times 10^{-4} \ \text{U}$

$Y = -jB = -j(3.5 \times 10^{-4}) \ \text{U} = 3.5 \times 10^{-4} \angle -90^\circ \ \text{U}$

CALCULO DEL FACTOR DE REGULACION.

$$\tilde{V}_g = 115 \angle 0^\circ \text{ KV.}; \tilde{V}_{gN} = \frac{115 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} = 66.59 \angle 0^\circ \text{ KV.}$$

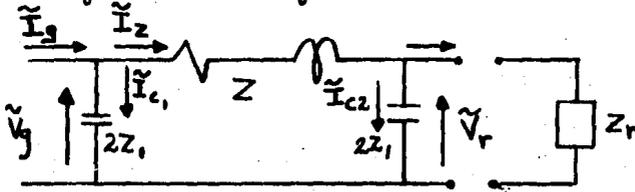
$$Z = 6.46 + j 47.38 \Omega = 47.81 \angle 82.22^\circ \Omega.$$

$$X_c = 2897.8 \Omega.$$

La mitad de la impedancia de la reactancia capacitiva será:

$$Z_c = -j X_c$$

$$2Z_1 = -j(2)2897.8 \Omega = -j5795.6 \Omega = 5795.6 \angle -90^\circ \Omega$$



Ecuaciones.

$$\tilde{I}_g = \tilde{I}_{c1} + \tilde{I}_z; \tilde{I}_z = \tilde{I}_r + \tilde{I}_{c2}$$

$$\Rightarrow \tilde{I}_g = \tilde{I}_{c1} + \tilde{I}_r + \tilde{I}_{c2}$$

$$\tilde{V}_g = \tilde{I}_z Z + \tilde{V}_r = \tilde{V}_z + \tilde{V}_r; \tilde{V}_g = \tilde{V}_{c1}; \tilde{V}_r = \tilde{V}_{c2}$$

$$\tilde{I}_g = \frac{\text{KVA}}{\sqrt{3} \text{ KV.}} = 75.3 \angle 0^\circ \text{ Amps.}$$

$$\tilde{I}_{c1} = \frac{\tilde{V}_{gN}}{2Z_1} = 11.45 \angle 90^\circ \text{ Amps.}$$

$$\tilde{I}_z = \tilde{I}_g - \tilde{I}_{c1} = 75.3 - j11.45 = 76.16 \angle -8.64^\circ \text{ Amps.}$$

$$\tilde{V}_z = \tilde{I}_z Z = 3641.21 \angle 73.59^\circ \text{ Volts} = 1028.67 + j3,492.88 \text{ Volts.}$$

$$\tilde{V}_r = \tilde{V}_g - \tilde{V}_z = 65.45 \angle -3.06^\circ \text{ KV de fase a neutro}$$

$$\% \text{ Reg} = \frac{\tilde{V}_g - \tilde{V}_r}{\tilde{V}_r} \times 100$$

$$\% \text{ Reg} = 1.43 \%$$

LINEA 3.

CALCULO DE LOS PARAMETROS "Z" Y "Y".

DATOS:

LINEA A 69 KV., 50 KM., 5 MVA.

COND. CABLE ACSR 2/0 M.C.M. 6/1.

LONG. 50 KM. = 31.075 Millas.

DISTANCIA MEDIA GEOMETRICA.

D.M.G. $= \sqrt[3]{5(5)(7.07)} = 18.4$ pies = 5.612 m.

FREQ. 60 HZ.

$V_g = 69 \angle 0^\circ$ KV.

$$|I_x| = \frac{KVA.}{3 KV.} = \frac{5,000}{3 (69)} = 41.84 \text{ amperes.}$$

$$Z = R + jX_L \quad Y = \frac{1}{Z} = -jB = -jB$$

DE TABLAS:

$I_{max. cond.} = 270$ Amperes.

$r = 0.706 \Omega/\text{milla}$

$X_a = 0.641 \Omega/\text{milla}$ a 1 pie de separación.

$X_d = 0.3573 \Omega/\text{milla}$

$X'_a = 0.1182 M\Omega \cdot \text{Milla}$ a 1 pie de separación.

$X'_d = 0.0874 M\Omega \cdot \text{Milla.}$

$R = r \times \text{LONG.} = 21.94 \Omega$

$X_L = (X_a + X_d) \times \text{LONG.} = 31.022 \Omega$

$Z = 21.94 + j31.022 = 37.996 \angle 54.73^\circ \Omega$

$jB = \frac{1}{-jX_C} \quad B = \text{Suceptancia capacitiva.}$

$X_C = (X'_a + X'_d) \times \frac{1}{\text{LONG.}} = 6616.25 \Omega$

$B = \frac{1}{X_C} = 1.5 \times 10^{-4} \text{ V}$

$Y = -jB = -j1.5 \times 10^{-4} \text{ V} = 1.5 \times 10^{-4} \angle -90^\circ \text{ V}$

CALCULO DEL FACTOR DE REGULACION.

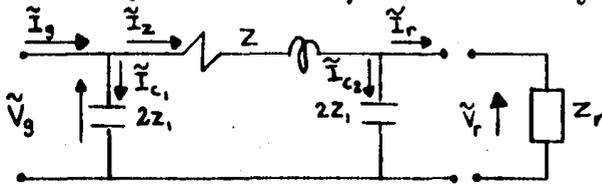
$$\tilde{V}_g = 69 \angle 0^\circ \text{ kV. ; } \tilde{V}_{gN} = \frac{69 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} = 39.84 \angle 0^\circ \text{ kV.}$$

$$Z = 21.94 + j 31.022 \Omega = 37.996 \angle 54.73^\circ \Omega.$$

$$X_c = 6616.25 \Omega$$

La mitad de la reactancia capacitiva será :

$$Z_c = -j X_c ; 2Z_1 = -j (2)(6616.25) = -j 13232.5 \Omega = 13232.5 \angle -90^\circ \Omega.$$



Equaciones :

$$\tilde{I}_g = \tilde{I}_{c_1} + \tilde{I}_z ; \tilde{I}_z = \tilde{I}_r + \tilde{I}_{c_2}$$

$$\Rightarrow \tilde{I}_g = \tilde{I}_{c_1} + \tilde{I}_r + \tilde{I}_{c_2}$$

$$\tilde{V}_g = \tilde{I}_z Z + \tilde{V}_r = \tilde{V}_z + \tilde{V}_r ; \tilde{V}_g = \tilde{V}_{c_1} ; \tilde{V}_r = \tilde{V}_{c_2}$$

$$\tilde{I}_g = \frac{\text{kVA}}{\sqrt{3} \text{ kV}} = 41.836 \angle 0^\circ \text{ Amps.}$$

$$\tilde{I}_{c_1} = \frac{\tilde{V}_{gN}}{2Z_1} = 3.01 \angle 90^\circ = j 3.01 \text{ Amps.}$$

$$\tilde{I}_z = \tilde{I}_g - \tilde{I}_{c_1} = 41.944 \angle -4.115^\circ \text{ Amps.}$$

$$\tilde{V}_z = \tilde{I}_z Z = 1593.7 \angle 50.615^\circ \text{ Volts.} = 1011.25 + j 1231.77 \text{ Volts.}$$

$$\tilde{V}_r = \tilde{V}_g - \tilde{V}_z = 38.85 \angle -1.817^\circ \text{ kV.}$$

$$\% \text{ Reg} = \frac{V_g - V_r}{V_r} \times 100$$

$$\% \text{ Reg} = 2.55 \%$$

LINEA 4.

CALCULO DE LOS PARAMETROS "Z" Y "Y".

DATOS:

LINEA A 115 KV., 100 KM., 10 MVA.

COND. CABLE ACSR 900 M.C.M. 54/7.

LONG. 100 KM. = 62.15 Millas.

DISTANCIA MEDIA GEOMETRICA.

D.M.G. = $\sqrt[3]{5(5)(10)} = 20.7$ pies = 6.5 m.

FREQ. 60 HZ.

$$V_g = 115 \angle 0^\circ \text{ KV.} \quad |I_r| = \frac{\text{KVA.}}{3\text{KV.}} = \frac{10,000}{3(115)} = 50.2 \text{ Amperes.}$$

$$Z = R + jX_L$$

$$Y = G - jB = -jB$$

DE TABLAS:

$I_{\text{max. cond.}} = 970$ Amperes.

$r = 0.104 \Omega/\text{milla}$

$X_a = 0.393 \Omega/\text{milla}$ a 1 pie de separación.

$X_d = 0.3694 \Omega/\text{milla}$

$X'_a = 0.898 \text{ M}\Omega \cdot \text{Milla}$ a 1 pie de separación.

$X'_d = 0.903 \text{ M}\Omega \cdot \text{Milla.}$

$R = r \times \text{LONG.} = 6.46 \Omega.$

$X_L = (X_a + X_d) \times \text{LONG.} = 47.38 \Omega$

$Z = 6.46 + j47.38 = 47.81 \angle 82.23^\circ \Omega$

$$jB = \frac{1}{-jX_c} \quad B = \text{Suceptancia capacitiva.}$$

$X_c = (X'_a + X'_d) \times \frac{1}{\text{LONG.}} = 28,978.2 \Omega$

$B = \frac{1}{X_c} = 3.45 \times 10^{-5} \text{ } \mathcal{U}$

$Y = -jB = -j3.45 \times 10^{-5} \mathcal{U} = 3.45 \times 10^{-5} \angle -90^\circ \mathcal{U}.$

CALCULO DEL FACTOR DE REGULACION.

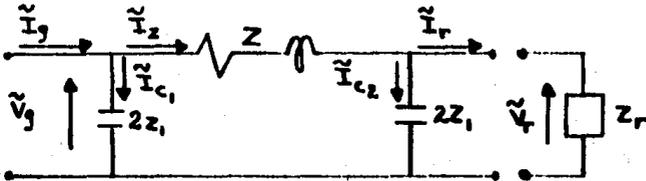
$$\tilde{V}_g = 115 \angle 0^\circ \text{ KV.}; \quad \tilde{V}_{gN} = \frac{115 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} = 66.39 \angle 0^\circ \text{ KV.}$$

$$Z = 6.46 + j 47.38 = 47.81 \angle 82.23^\circ \Omega$$

$$X_c = 28,978.2 \Omega$$

La mitad de la reactancia capacitiva será :

$$Z_c = -jX_c \quad 2Z_c = -j(2)(28,978.2) = -j57,956.4 = 57,956.4 \angle -90^\circ \Omega$$



Ecuaciones :

$$\tilde{I}_g = \tilde{I}_{c1} + \tilde{I}_z; \quad \tilde{I}_z = \tilde{I}_z + \tilde{I}_{c2}$$

$$\Rightarrow \tilde{I}_g = \tilde{I}_{c1} + \tilde{I}_z + \tilde{I}_{c2}$$

$$\tilde{V}_g = \tilde{I}_z Z + \tilde{V}_r = \tilde{V}_z + \tilde{V}_r; \quad \tilde{V}_g = \tilde{V}_{c1}; \quad \tilde{V}_r = \tilde{V}_{c2}$$

$$\tilde{I}_g = \frac{\text{kVA}}{\sqrt{3} \text{ KV}} = 50.2 \angle 0^\circ \text{ Amps.}$$

$$\tilde{I}_{c1} = \frac{\tilde{V}_{gN}}{2Z_c} = 1.14 \angle 90^\circ \text{ Amps.} = j 1.14 \text{ Amps.}$$

$$\tilde{I}_z = \tilde{I}_g - \tilde{I}_{c1} = 50.213 \angle -1.3^\circ \text{ Amps.}$$

$$\tilde{V}_z = \tilde{I}_z Z = 2400.7 \angle 80.93^\circ \text{ Volts} = 378.45 + j 2370.7 \text{ Volts.}$$

$$\tilde{V}_r = \tilde{V}_g - \tilde{V}_z = 66,054.106 \angle -2.056^\circ \text{ Volts} = 66.054 \angle -2.056^\circ \text{ KV.}$$

$$\% \text{ Reg} = \frac{V_g - V_r}{V_r} \times 100$$

$$\% \text{ Reg} = 0.508 \%$$

DATOS ELECTRICOS FALTANTES.

INDUSTRIA : $Z_{IND} = \frac{(KV)^2}{MVA} = \frac{(0.11)^2}{10} = 0.01936 \Omega.$

RED DIST. :
(Una carga) $Z_{R.D.} = \frac{(KV)^2}{MVA} = \frac{(0.22)^2}{0.1125} = 0.43022 \Omega.$

LINEA 1 : $Z_{L_1} = 16.16 + j 127.56 \Omega.$

LINEA 2 : $Z_{L_2} = 6.46 + j 47.38 \Omega.$

LINEA 3 : $Z_{L_3} = 21.94 + j 31.022 \Omega.$

LINEA 4 : $Z_{L_4} = 6.46 + j 47.38 \Omega.$

CD. MADRO: $Z_{C.H.} = \frac{(KV)^2}{MVA} = \frac{(23)^2}{10} = 52.9 \Omega.$

PCA. CEMTO: $Z_{F.C.} = \frac{(KV)^2}{MVA} = \frac{(2.8)^2}{5} = 38.088 \Omega.$

RED DIST. :
(Carga total) $Z_{R.D.} = 0.43022 \Omega.$

$$Z_{R.D.TOTAL} = \frac{0.43022}{40} = 0.01075 \Omega.$$

$T_B(Total) :$ $Z_{T_B} = 3.5 \% = 0.035 \text{ p.u.}$

$$Z_{T_B(TOTAL)} = \frac{0.035}{40} = 0.000875 \text{ p.u.}$$

CALCULO DE VALORES BASE MONOFASICOS

ZONA	KVA	KV	AMP	-A-
I	501-5000	Voz = 7.96	Yoz = 629.14	Zoz = 12.672
II	501-5000	Voz = 122.79	Yoz = 37.653	Zoz = 3220.6360
III	501-5000	Voz = 66.39	Yoz = 75.3122	Zoz = 261.526
IV	501-5000	Voz = 13.270	Yoz = 376.534	Zoz = 36.166
V	501-5000	Voz = 39.83	Yoz = 125.533	Zoz = 317.2660
VI	501-5000	Voz = 7.96	Yoz = 629.14	Zoz = 12.672
VII	501-5000	Voz = 7.96	Yoz = 629.14	Zoz = 12.672
VIII	501-5000	Voz = 0.254	Yoz = 19669.039	Zoz = 0.0129
IX	501-5000	Voz = 0.127	Yoz = 39370.079	Zoz = 0.00322

CALCULO DE VALORES POR UNIDAD (P. U.).

$$\textcircled{G_1} \quad X_1' = j0.3 \text{ p.u.}$$

$$\bar{X}_1' = j0.3 \text{ p.u.}$$

$$Y \quad X_2' = j0.1 \text{ p.u.}$$

$$\bar{X}_2' = j0.1 \text{ p.u.}$$

$$\textcircled{G_2} \quad X_0' = j0.15 \text{ p.u.}$$

$$\bar{X}_0' = j0.15 \text{ p.u.}$$

$$\textcircled{T_1} \quad Z_{T_1} = 5\%$$

$$\bar{Z}_{T_1} = 0.05 \left(\frac{13.8}{13.8} \right)^2 \left(\frac{15000}{25000} \right) = 0.03 \text{ p.u.}$$

$$f.p. = 0.8$$

$$\bar{Z}_{T_1} = 0.03 \angle 36.87^\circ \text{ p.u.}$$

$$\theta = 36.87^\circ$$

$$\bar{Z}_{T_1} = 0.024 + j0.018 \text{ p.u.}$$

$$\textcircled{T_2} \quad Z_{T_2} = 5\%$$

$$\bar{Z}_{T_2} = 0.05 \left(\frac{13.8}{18.8} \right)^2 \frac{15000}{5000} = 0.15 \text{ p.u.}$$

$$f.p. = 0.8$$

$$\bar{Z}_{T_2} = 0.15 \angle 36.87^\circ = 0.12 + j0.09 \text{ p.u.}$$

$$\textcircled{T_3} \quad Z_{T_3} = 6\%$$

$$\bar{Z}_{T_3} = 0.06 \left(\frac{230}{280} \right)^2 \frac{15000}{25000} = 0.036 \text{ p.u.}$$

$$f.p. = 0.8$$

$$\bar{Z}_{T_3} = 0.036 \angle 36.87^\circ = 0.0288 + j0.0216 \text{ p.u.}$$

$$\textcircled{T_4} \quad Z_{T_4} = 7\%$$

$$\bar{Z}_{T_4} = 0.07 \left(\frac{115}{115} \right)^2 \frac{15000}{10000} = 0.105 \text{ p.u.}$$

$$f.p. = 0.8$$

$$\bar{Z}_{T_4} = 0.105 \angle 36.87^\circ = 0.084 + j0.063 \text{ p.u.}$$

$$\textcircled{T_5} \quad Z_{T_5} = 6\%$$

$$\bar{Z}_{T_5} = 0.06 \left(\frac{69}{69} \right)^2 \frac{15000}{5000} = 0.18 \text{ p.u.}$$

$$f.p. = 0.8$$

$$\bar{Z}_{T_5} = 0.18 \angle 36.87^\circ = 0.141 + j0.108 \text{ p.u.}$$

$$\textcircled{T_6} \quad Z_{T_6} = 7\%$$

$$\bar{Z}_{T_6} = 0.07 \left(\frac{115}{115} \right)^2 \frac{15000}{15000} = 0.07 \text{ p.u.}$$

$$f.p. = 0.8$$

$$\bar{Z}_{T_6} = 0.07 \angle 36.87^\circ = 0.056 + j0.042 \text{ p.u.}$$

$$\textcircled{T_7} \quad Z_{T_7} = 5\%$$

$$\bar{Z}_{T_7} = 0.05 \left(\frac{13.8}{13.8} \right)^2 \frac{15000}{10000} = 0.075 \text{ p.u.}$$

$$f.p. = 0.8$$

$$\bar{Z}_{T_7} = 0.075 \angle 36.87^\circ = 0.06 + j0.045 \text{ p.u.}$$

$$\textcircled{T_8} \quad Z_{T_8} = 3.5\%$$

$$\bar{Z}_{T_8} = 0.035 \left(\frac{13.8}{13.8} \right)^2 \frac{15000}{112.5} = 4.666 \text{ p.u.}$$

$$f.p. = 0.8$$

$$\bar{Z}_{T_8} = 4.666 \angle 36.87^\circ = 3.7328 + j2.7996 \text{ p.u.}$$

PARA 40 T₈

$$\bar{Z}_{T_8 \text{ TOTAL}} = 0.116 \angle 36.87^\circ = 0.093 + j0.069 \text{ p.u.}$$

FCA.
CEM.

$$Z_{RC} = 38.088 \Omega$$

$$f.p. = 0.8$$

$$\bar{Z}_{RC} = \frac{38.088}{12.672} = 3.005 \angle 36.87^\circ \text{ p.u.}$$

$$\bar{Z}_{RC} = 2.404 + j1.808 \text{ p.u.}$$

C.D.
HAD.

$$Z_{CM} = 52.9 \Omega$$

$$f.p. = 0.8$$

$$\bar{Z}_{CM} = \frac{52.9}{35.266} = 1.5 \angle 36.87^\circ \text{ p.u.}$$

$$\bar{Z}_{CM} = 1.2 + j0.9 \text{ p.u.}$$

IND.

$$Z_{IND} = 0.01936 \Omega$$

$$f.p. = 0.8$$

$$\bar{Z}_{IND} = \frac{0.01936}{0.0129} = 1.5 \angle 36.87^\circ \text{ p.u.}$$

$$\bar{Z}_{IND} = 1.2 + j0.9 \text{ p.u.}$$

RED
DST.

$$Z_{RD} = 0.45022 \Omega$$

$$f.p. = 0.8$$

$$\bar{Z}_{RD} = \frac{0.45022}{0.0032} = 138.6 \angle 36.87^\circ \text{ p.u.}$$

$$\bar{Z}_{RD} = 106.88 + j80.16 \text{ p.u.}$$

PARA LAS 40 CARGAS

$$\bar{Z}_{RD-TOTAL} = 3.34 \angle 36.87^\circ = 2.672 + j2.004 \text{ p.u.}$$

L₁

$$Z_{L1} = 16.16 + j127.56 \Omega$$

$$Z_{L1} = 128.57 \angle 82.77^\circ \Omega$$

$$\bar{Z}_{L1} = \frac{16.16 + j127.56}{3826.686} = 0.00458 + j0.036 \text{ p.u.}$$

$$\bar{Z}_{L1} = 0.0064 \angle 82.77^\circ \text{ p.u.}$$

L₂

$$Z_{L2} = 6.46 + j49.8 \Omega$$

$$Z_{L2} = 47.81 \angle 82.23^\circ \Omega$$

$$\bar{Z}_{L2} = \frac{6.46 + j49.8}{881.526} = 0.0073 + j0.0537 \text{ p.u.}$$

$$\bar{Z}_{L2} = 0.0542 \angle 82.23^\circ \text{ p.u.}$$

L₃

$$Z_{L3} = 24.94 + j31.022 \Omega$$

$$Z_{L3} = 37.976 \angle 54.73^\circ \Omega$$

$$\bar{Z}_{L3} = \frac{24.94 + j31.022}{314.107} = 0.0698 + j0.09876 \text{ p.u.}$$

$$\bar{Z}_{L3} = 0.1209 \angle 54.73^\circ \text{ p.u.}$$

L₄

$$Z_{L4} = 6.46 + j49.8 \Omega$$

$$Z_{L4} = 47.81 \angle 82.23^\circ \Omega$$

$$\bar{Z}_{L4} = \frac{6.46 + j49.8}{881.526} = 0.0073 + j0.0537 \text{ p.u.}$$

$$\bar{Z}_{L4} = 0.0542 \angle 82.23^\circ \text{ p.u.}$$

CIRCUITO EQUIVALENTE DE SECUENCIA POSITIVA DEL SISTEMA

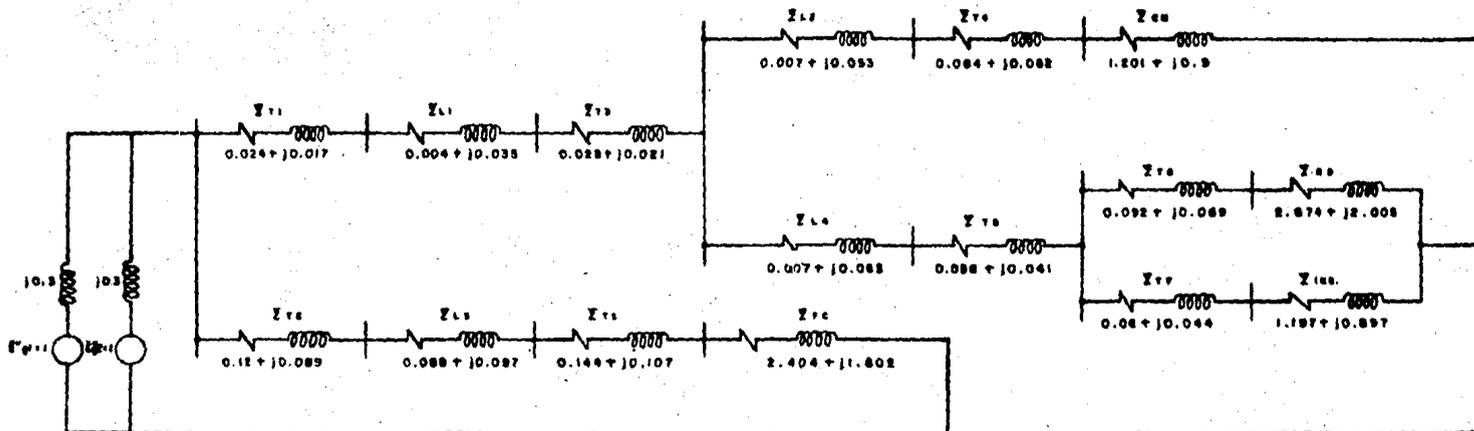
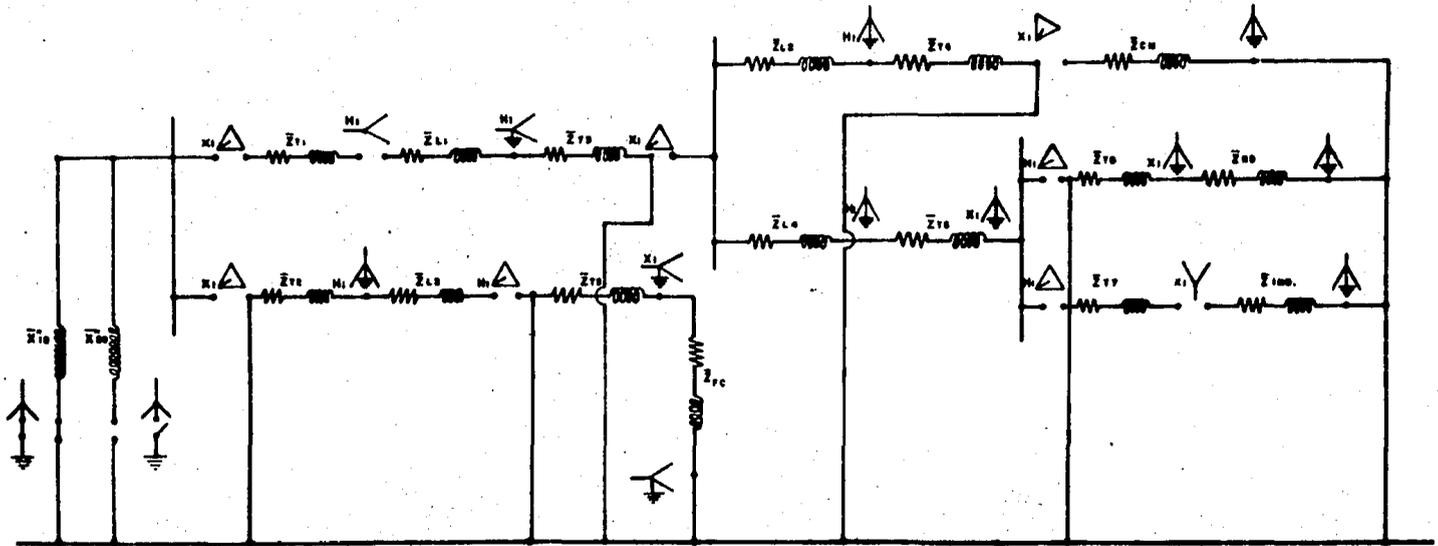


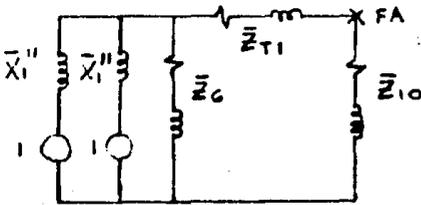
DIAGRAMA EQUIVALENTE DE SECUENCIA CERO DEL SISTEMA



Cálculo de la falla en el punto A.

Tomando como referencia el diagrama del sistema tenemos:

SECUENCIA POSITIVA



$$\bar{Z}_1 = \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_{T1} = 0.064 \angle 60.25^\circ$$

$$\bar{Z}_1 = 0.032 + j0.056$$

$$\bar{Z}_2 = \bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_{T4} + \bar{Z}_{CM}$$

$$\bar{Z}_2 = 1.643 \angle 38.15^\circ = 1.292 + j1.015$$

$$\bar{Z}_3 = \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_{T6} = 0.113 \angle 56.16^\circ$$

$$\bar{Z}_3 = 0.063 + j0.094$$

$$\bar{Z}_4 = \bar{Z}_{T8} + \bar{Z}_{R0} = 3.457 \angle 36.86^\circ$$

$$\bar{Z}_4 = 2.766 + j2.074$$

$$\bar{Z}_5 = \bar{Z}_{T7} + \bar{Z}_{IND} = 1.57 \angle 36.81^\circ$$

$$\bar{Z}_5 = 1.257 + j0.941$$

$$\bar{Z}_6 = \bar{Z}_{T2} + \bar{Z}_{L3} + \bar{Z}_{T5} + \bar{Z}_{FC}$$

$$\bar{Z}_6 = 3.445 \angle 37.44^\circ = 2.736 + j2.095$$

$$\bar{Z}_7 = \bar{Z}_4 \parallel \bar{Z}_5 = 1.079 \angle 36.82^\circ$$

$$\bar{Z}_7 = 0.863 + j0.646$$

$$\bar{Z}_8 = \bar{Z}_6 + \bar{Z}_7 = 1.185 \angle 38.62^\circ$$

$$\bar{Z}_8 = 0.926 + j0.74$$

$$\bar{Z}_9 = \bar{Z}_2 \parallel \bar{Z}_8 = 0.688 \angle 38.42^\circ$$

$$\bar{Z}_9 = 0.539 + j0.427$$

$$\bar{Z}_{10} = \bar{Z}_1 + \bar{Z}_9 = 0.747 \angle 40.22^\circ$$

$$\bar{Z}_{10} = 0.571 + j0.483$$

$$\bar{Z}_{11} = \bar{X}_1'' \parallel \bar{X}_1'' = 0.15 \angle 90^\circ = j0.15$$

$$\bar{Z}_{12} = \bar{Z}_6 \parallel \bar{Z}_{11} = 0.146 \angle 88.07^\circ$$

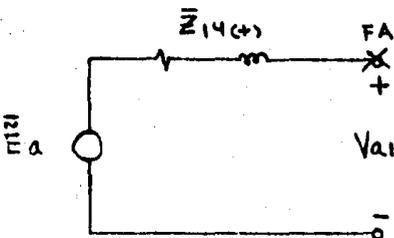
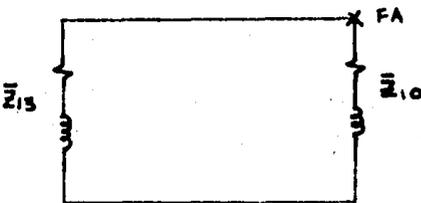
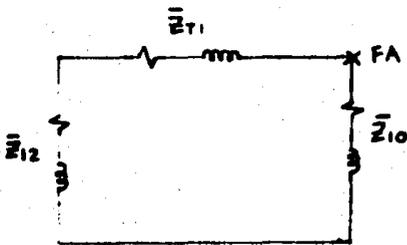
$$\bar{Z}_{12} = 0.004 + j0.145$$

$$\bar{Z}_{13} = \bar{Z}_{12} + \bar{Z}_{T1} = 0.164 \angle 80.19^\circ$$

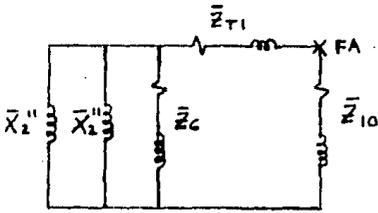
$$\bar{Z}_{13} = 0.028 + j0.162$$

$$\bar{Z}_{14(+)} = \bar{Z}_{13} \parallel \bar{Z}_{10} = 0.139 \angle 73.3^\circ$$

$$\bar{Z}_{14(+)} = 0.039 + j0.133$$



SECUENCIA NEGATIVA



$$\bar{Z}_{15} = \bar{X}_2'' // \bar{X}_2'''$$

$$\bar{Z}_{15} = 0.2 \angle 90^\circ = j0.2$$

$$\bar{Z}_{16} = \bar{Z}_{15} // \bar{Z}_C$$

$$\bar{Z}_{16} = 0.192 \angle 87.45^\circ = 0.008 + j0.191$$

$$\bar{Z}_{17} = \bar{Z}_{16} + \bar{Z}_{T1}$$

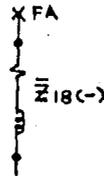
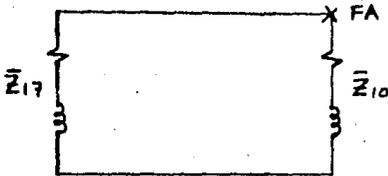
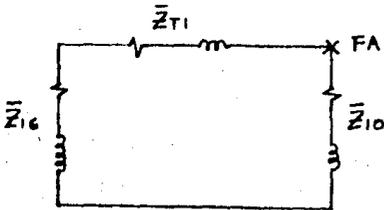
$$\bar{Z}_{17} = 0.21 \angle 81.25^\circ = 0.032 + j0.208$$

$$\bar{Z}_{18(-)} = \bar{Z}_{10} // \bar{Z}_{17}$$

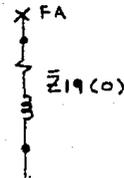
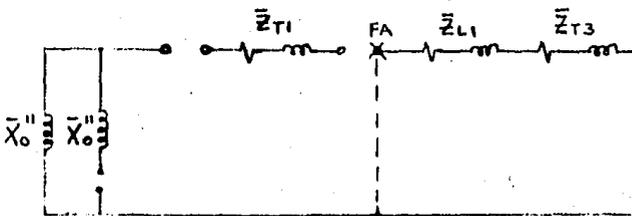
$$\bar{Z}_{18(-)} = 0.171 \angle 72.58^\circ = 0.051 + j0.163$$

$$\bar{Z}_{19(0)} = \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_{T3}$$

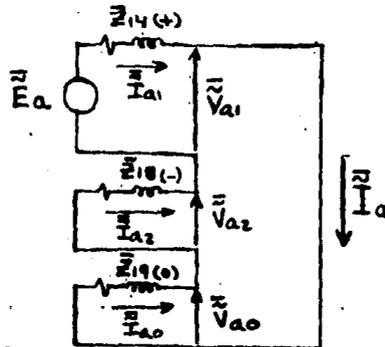
$$\bar{Z}_{19(0)} = 0.064 \angle 60.25^\circ = 0.032 + j0.056$$



SECUENCIA CERO



Cálculo de la corriente de falla para un corto circuito monofásico de fase a tierra en el punto A, conociendo las impedancias de secuencia positiva, negativa y cero.



$$\vec{I}_{a1} = \frac{\vec{E}_a}{\vec{Z}_{1(+)} + \vec{Z}_{2(-)} + \vec{Z}_{0(0)}}$$

$$\vec{I}_{a1} = \frac{1}{0.372 \angle 70.88^\circ} = 2.688 \angle -70.88^\circ$$

$$\vec{V}_{a1} = \vec{E}_a - \vec{Z}_{1(+)} \vec{I}_{a1} = 1 - (0.139 \angle 73.3^\circ)(2.688 \angle -70.88^\circ)$$

$$\vec{V}_{a1} = 0.628 \angle -1.36^\circ$$

$$\vec{V}_{a2} = -\vec{Z}_{2(-)} \vec{I}_{a2} = -(0.171 \angle 72.58^\circ)(2.688 \angle -70.88^\circ)$$

$$\vec{V}_{a2} = -0.459 \angle 1.7^\circ$$

$$\vec{V}_{a0} = -\vec{Z}_{0(0)} \vec{I}_{a0} = -(0.064 \angle 60.25^\circ)(2.688 \angle -70.88^\circ)$$

$$\vec{V}_{a0} = -0.172 \angle -10.63^\circ$$

$$\vec{I}_a = \vec{I}_{a1} + \vec{I}_{a2} + \vec{I}_{a0} = 3(2.688 \angle -70.88^\circ)$$

$$\vec{I}_a = 8.064 \angle -70.88^\circ$$

$$\vec{I}_b = a^2 \vec{I}_{a(+)} + a \vec{I}_{a(-)} + \vec{I}_{a(0)} = 0$$

$$\vec{I}_c = a \vec{I}_{a(+)} + a^2 \vec{I}_{a(-)} + \vec{I}_{a(0)} = 0$$

$$\tilde{V}_a = \tilde{V}_{a1} + \tilde{V}_{a2} + \tilde{V}_{a0} = 0$$

$$\tilde{V}_b = a^2 \tilde{V}_{a1} + a \tilde{V}_{a2} + \tilde{V}_{a0}$$

$$\tilde{V}_b = (1 \angle -120^\circ)(0.628 \angle -1.36^\circ) + (1 \angle 120^\circ)(-0.459 \angle 1.7^\circ) - 0.172 \angle -10.63^\circ$$

$$\tilde{V}_b = 0.935 \angle 105.26^\circ$$

$$\tilde{V}_c = a \tilde{V}_{a1} + a^2 \tilde{V}_{a2} + \tilde{V}_{a0}$$

$$\tilde{V}_c = (1 \angle 120^\circ)(0.628 \angle -1.36^\circ) + (1 \angle -120^\circ)(-0.459 \angle 1.7^\circ) - 0.172 \angle -10.63^\circ$$

$$\tilde{V}_c = 1.017 \angle 255.61^\circ$$

En el punto de falla:

$$I_B = \frac{25000}{\sqrt{3}(230)} = 62.75 \text{ [Amp]}$$

Las corrientes que se presentan al ocurrir la falla son:

$$\tilde{I}_a = I_B \tilde{I}_a = (62.75)(8.064 \angle -70.88^\circ) = 506.01 \angle -70.88^\circ \text{ [Amp.]}$$

$$\tilde{I}_b = 0$$

$$\tilde{I}_c = 0$$

$$V_{BN} = \frac{230}{\sqrt{3}} = 132.79 \text{ [kV]}$$

Las tensiones que se presentan al ocurrir la falla son:

$$\tilde{V}_a = 0$$

$$\tilde{V}_b = V_{BN} \tilde{V}_b = 132.79 (0.935 \angle 105.26^\circ) = 124.15 \angle 105.26^\circ \text{ [kV]}$$

$$\tilde{V}_c = V_{BN} \tilde{V}_c = 132.79 (1.017 \angle 255.61^\circ) = 135.04 \angle 255.61^\circ \text{ [kV]}$$

Para la selección del apartarrayos en el punto A consideramos:

$$\bar{Z}_1 = R_1 + jX_1 = 0.039 + j0.133$$

$$\bar{Z}_0 = R_0 + jX_0 = 0.032 + j0.056$$

$$\frac{X_0}{X_1} = \frac{0.056}{0.133} = 0.421$$

$$\frac{R_0}{X_1} = \frac{0.032}{0.133} = 0.24$$

Por el resultado de los cocientes nos damos cuenta que se trata de un sistema tipo A.

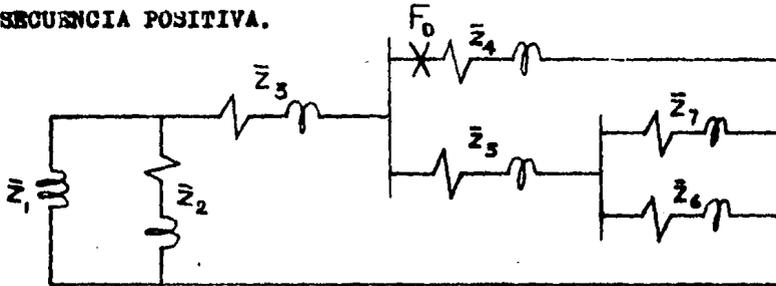
En seguida hacemos:

$$\frac{230}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} \times 1.05 \times 0.68 = 134.08 \text{ [KV]}$$

Con este resultado, entramos a buscar el valor inmediato superior de tensión en la tabla normalizada y elegimos un apartarrayos clase Estación, 138 KV, 10000 A.

CALCULO DE LA FALLA EN EL PUNTO " D " .

TOMANDO COMO REFERENCIA EL DIAGRAMA DEL SISTEMA TENEMOS :
SECUENCIA POSITIVA.



$$\bar{Z}_1 = j0.15 \mu\Omega \quad \bar{Z}_2 = 2.685 + j2.055 = 3.379 \angle 37.11^\circ$$

$$\bar{Z}_3 = 0.056 + j0.071 = 0.092 \angle 52.88^\circ \quad \bar{Z}_4 = 1.291 + j1.014 = 1.641 \angle 38.14^\circ$$

$$\bar{Z}_5 = 0.043 + j0.024 = 0.1131 \angle 28.6^\circ \quad \bar{Z}_6 = 1.35 + j1.011 = 1.686 \angle 36.82^\circ$$

$$\bar{Z}_7 = 2.766 + j2.074 = 3.457 \angle 36.86^\circ \quad \bar{Z}_8 = 0.005 + j0.146 = 0.146 \angle 88.03^\circ$$

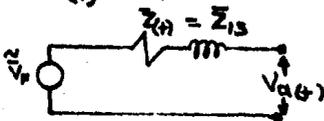
$$\bar{Z}_9 = 0.061 + j0.2198 = 0.2281 \angle 74.18^\circ$$

$$\bar{Z}_{10} = \bar{Z}_6 \parallel \bar{Z}_7 = 0.907 + j0.68 = 1.153 \angle 36.83^\circ$$

$$\bar{Z}_{11} = \bar{Z}_5 + \bar{Z}_{10} = 0.97 + j0.775 = 1.24 \angle 38.56^\circ$$

$$\bar{Z}_{12} = \bar{Z}_9 \parallel \bar{Z}_{11} = 0.07 + j0.184 = 0.1976 \angle 69.12^\circ$$

$$\bar{Z}_{13(+)} = \bar{Z}_4 \parallel \bar{Z}_{12} = 0.073 + j0.163 = 0.178 \angle 65.9^\circ$$



SECUENCIA NEGATIVA.

$$\bar{Z}_{14} = \bar{X}_1 \parallel \bar{X}_2 = j0.2$$

$$\bar{Z}_{15} = \bar{Z}_2 \parallel \bar{Z}_{14} = 0.009 + j0.1926 = 0.1928 \angle 87.4^\circ$$

$$\bar{Z}_{16} = \bar{Z}_3 + \bar{Z}_{15} = 0.065 + j0.266 = 0.2743 \angle 76.35^\circ$$

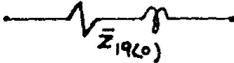
$$\bar{Z}_{17} = \bar{Z}_{11} \parallel \bar{Z}_{16} = 0.08 + j0.217 = 0.232 \angle 69.77^\circ$$

$$\bar{Z}_{18(-)} = \bar{Z}_4 \parallel \bar{Z}_{17} = 0.084 + j0.188 = 0.206 \angle 66^\circ$$

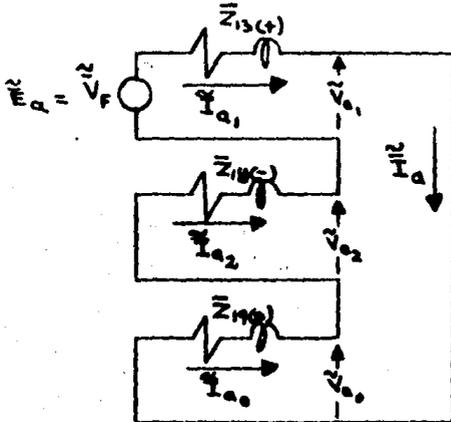


SECUENCIA CERO.

$$\bar{Z}_{19(0)} = \bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_{T4} = 0.091 + j 0.115 = 0.146 \angle 51.64^\circ$$



CALCULO DE LA CORRIENTE DE FALLA PARA UN CORTO CIRCUITO MONOFASICO DE FASE A TIERRA EN EL PUNTO "D", CONOCIENDO LAS IMPEDANCIAS DE SECUENCIA POSITIVA, NEGATIVA Y CERO.



$$\begin{aligned} \bar{E}_a = \bar{V}_f &= 110^\circ \\ \bar{I}_{a_1} &= \bar{I}_{a_2} = \bar{I}_{a_0} \\ \bar{I}_a &= \bar{I}_{a_1} + \bar{I}_{a_2} + \bar{I}_{a_0} \end{aligned}$$

$$\bar{I}_{a_1} = \frac{\bar{E}_a}{\bar{Z}_{13(+)} + \bar{Z}_{18(-)} + \bar{Z}_{19(0)}} = 1.893 \angle -2.074^\circ$$

$$\bar{V}_{a_1} = \bar{E}_a - \bar{Z}_{13(+)} \bar{I}_{a_1} = 0.903 \angle -19.63^\circ$$

$$\bar{V}_{a_2} = -\bar{Z}_{18(-)} \bar{I}_{a_1} = 0.39 \angle 243.91^\circ$$

$$\bar{V}_{a_0} = -\bar{Z}_{19(0)} \bar{I}_{a_1} = 0.2763 \angle 229.56^\circ$$

$$\bar{I}_a = 3\bar{I}_{a_1} = 5.68 \angle -2.074^\circ$$

$$\bar{V}_a = \bar{V}_{a_1} + \bar{V}_{a_2} + \bar{V}_{a_0} = 0$$

$$\bar{V}_b = a^2 \bar{V}_{a_1} + a \bar{V}_{a_2} + \bar{V}_{a_0} = 0.906 \angle 238.13^\circ$$

$$\bar{V}_c = a \bar{V}_{a_1} + a^2 \bar{V}_{a_2} + \bar{V}_{a_0} = 1.146 \angle 119.12^\circ$$

EN EL PUNTO DE FALLA:

$$I_B = 75.30 \text{ A.}$$

LAS CORRIENTES QUE SE PRESENTAN AL OCURRIR LA FALLA SON:

$$\tilde{I}_a = I_B \tilde{I}_a = 427.62 \angle -2.074^\circ \text{ A.}$$

$$\tilde{I}_b = 0 \quad \tilde{I}_c = 0$$

LAS TENSIONES QUE SE PRESENTAN AL OCURRIR LA FALLA SON:

$$\tilde{V}_a = 0$$
$$\tilde{V}_b = V_{BN} \tilde{V}_b = 60.13 \angle 238.13^\circ \text{ KV.}$$

$$\tilde{V}_c = V_{BN} \tilde{V}_c = 76.08 \angle 119.12^\circ \text{ KV.}$$

PARA LA SELECCION DEL APARTARRAYOS EN EL PUNTO "D" CONSIDERAMOS:

$$\frac{X_0}{X_1} = \frac{0.1084}{0.1681} = 0.66$$

$$\frac{R_0}{X_1} = \frac{0.0842}{0.1681} = 0.51$$

POR EL RESULTADO DE LOS COCIENTES NOS DAMOS CUENTA QUE SE TRATA DE UN SISTEMA TIPO "A".

EN SEGUIDA HACEMOS:

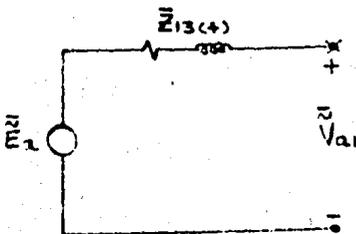
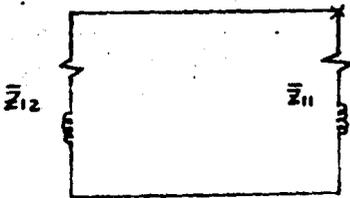
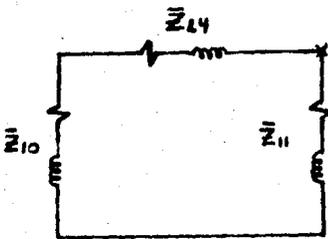
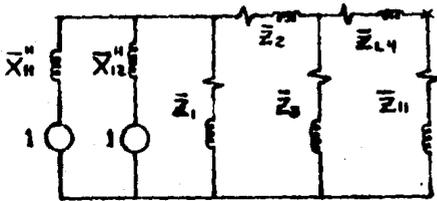
$$V_{NAPART.} = \frac{115}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} \times 1.05 \times 0.70 = 69.01 \text{ KV.}$$

CON ESTE RESULTADO, BUSCAMOS EL VALOR INMEDIATO SUPERIOR DE TENSION EN LA TABLA NORMALIZADA Y ELEGIMOS UN APARTARRAYOS CLASE - INTERMEDIA, 72 KV., 5000 A...

CALCULO DE LA FALLA EN EL PUNTO "G".

TOMANDO COMO REFERENCIA EL DIAGRAMA DEL SISTEMA TENEMOS:

SECUENCIA POSITIVA.



$$\bar{Z}_1 = \bar{Z}_{T2} + \bar{Z}_{L3} + \bar{Z}_{T6} + \bar{Z}_{FC}$$

$$\bar{Z}_1 = 3.449 / 33.47^\circ = 2.737 + j2.099$$

$$\bar{Z}_2 = \bar{Z}_{T1} + \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_{T3}$$

$$\bar{Z}_2 = 0.095 / 52.86^\circ = 0.0573 + j0.075$$

$$\bar{Z}_3 = \bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_{T4} + \bar{Z}_{CM}$$

$$\bar{Z}_3 = 1.643 / 38.21^\circ = 1.291 + j1.016$$

$$\bar{Z}_4 = \bar{Z}_{T6} + \bar{Z}_{RD}$$

$$\bar{Z}_4 = 3.449 / 36.86^\circ = 2.759 + j2.069$$

$$\bar{Z}_5 = \bar{Z}_{T7} + \bar{Z}_{10D}$$

$$\bar{Z}_5 = 1.575 / 36.86^\circ = 1.226 + j0.945$$

$$\bar{Z}_6 = \bar{Z}_4 // \bar{Z}_5$$

$$\bar{Z}_6 = 1.081 / 36.86^\circ = 0.865 + j0.648$$

$$\bar{Z}_7 = X_{11}'' // X_{12}''$$

$$\bar{Z}_7 = 0.15 / 90^\circ = j0.15$$

$$\bar{Z}_8 = \bar{Z}_1 // \bar{Z}_7$$

$$\bar{Z}_8 = 0.146 / 88.07^\circ = 0.0049 + j0.145$$

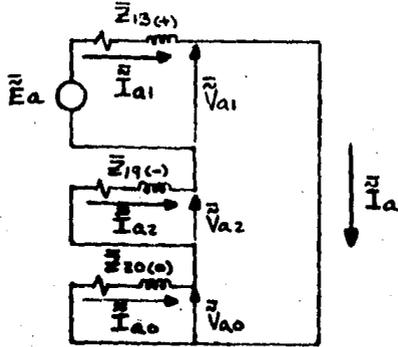
$$\bar{Z}_9 = \bar{Z}_6 + \bar{Z}_2$$

$$\bar{Z}_9 = 0.23 / 74.3^\circ = 0.062 + j0.221$$

$$\bar{Z}_{10} = \bar{Z}_9 // \bar{Z}_3$$

$$\bar{Z}_{10} = 0.206 / 70.05^\circ = 0.073 + j0.193$$

CALCULO DE LA CORRIENTE DE FALLA PARA UN CORTO CIRCUITO MONOFASICO DE FASE A TIERRA EN EL PUNTO "G", CONOCIENDO LAS IMPEDANCIAS DE SECUENCIA POSITIVA, NEGATIVA Y CERO.



$$\vec{I}_{a1} = \frac{\vec{E}_a}{\vec{Z}_{1(+)} + \vec{Z}_{1(-)} + \vec{Z}_{2(0)}}$$

$$\vec{I}_{a1} = \frac{1}{0.431 \angle 2.43^\circ} = 2.32 \angle -3.43^\circ$$

$$\vec{V}_{a1} = \vec{E}_a - \vec{Z}_{1(+)} \vec{I}_{a1} = 1 - (0.217 \angle 66.26^\circ)(2.32 \angle -3.43^\circ) = 0.891 \angle -30.1^\circ$$

$$\vec{V}_{a2} = -\vec{Z}_{1(-)} \vec{I}_{a2} = -(0.0201 \angle 65.84^\circ)(2.32 \angle -3.43^\circ) = -0.046 \angle 62.41^\circ$$

$$\vec{V}_{a0} = -\vec{Z}_{2(0)} \vec{I}_{a0} = -(0.195 \angle 58.89^\circ)(2.32 \angle -3.43^\circ) = -0.452 \angle 56.46^\circ$$

$$\vec{I}_a = 3 \vec{I}_{a1} = 3(2.32 \angle -3.43^\circ) = 6.96 \angle -3.43^\circ$$

$$\vec{I}_b = a^2 \vec{I}_{a1} + a \vec{I}_{a2} + \vec{I}_{a0} = 0$$

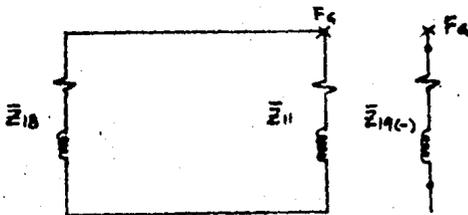
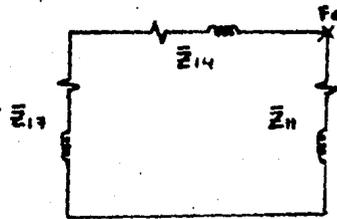
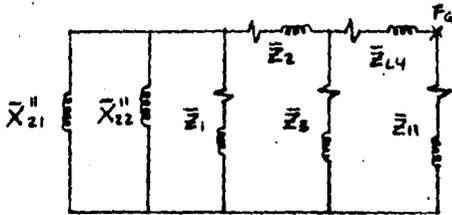
$$\vec{I}_c = a \vec{I}_{a1} + a^2 \vec{I}_{a2} + \vec{I}_{a0} = 0$$

$$\vec{V}_a = \vec{V}_{a1} + \vec{V}_{a2} + \vec{V}_{a0} = 0$$

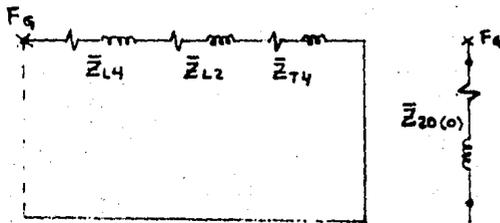
$$\vec{V}_b = 1^2 \vec{V}_{a1} + 1 \vec{V}_{a2} + \vec{V}_{a0} = 1.272 \angle 219.97^\circ$$

$$\vec{V}_c = 2 \vec{V}_{a1} + 1 \vec{V}_{a2} + \vec{V}_{a0} = 0.742 \angle 106.75^\circ$$

SECUENCIA NEGATIVA.



SECUENCIA CERO.



$$\bar{Z}_{11} = \bar{Z}_6 + \bar{Z}_{T6}$$

$$\bar{Z}_{11} = 1.151 \angle 36.82^\circ = 0.921 + j0.689$$

$$\bar{Z}_{12} = \bar{Z}_{10} + \bar{Z}_{L4}$$

$$\bar{Z}_{12} = 0.258 \angle 72.61^\circ = 0.077 + j0.246$$

$$\bar{Z}_{13(-)} = \bar{Z}_{11} \parallel \bar{Z}_{12}$$

$$\bar{Z}_{13(-)} = 0.217 \angle 66.35^\circ = 0.087 + j0.199$$

$$\bar{Z}_{14} = \bar{X}_{21}'' \parallel \bar{X}_{22}''$$

$$\bar{Z}_{14} = 0.2 \angle 90^\circ = j0.2$$

$$\bar{Z}_{15} = \bar{Z}_1 \parallel \bar{Z}_{14}$$

$$\bar{Z}_{15} = 0.192 \angle 87.45^\circ = 0.0085 + j0.192$$

$$\bar{Z}_{16} = \bar{Z}_2 + \bar{Z}_{15}$$

$$\bar{Z}_{16} = 0.276 \angle 76.2^\circ = 0.0658 + j0.268$$

$$\bar{Z}_{17} = 0.243 \angle 70.97^\circ = 0.079 + j0.229$$

$$\bar{Z}_{18} = \bar{Z}_{17} + \bar{Z}_{L4}$$

$$\bar{Z}_{18} = 0.024 \angle 73.01^\circ = 0.0066 + j0.283$$

$$\bar{Z}_{19(-)} = \bar{Z}_{11} \parallel \bar{Z}_{18}$$

$$\bar{Z}_{19(-)} = 0.0201 \angle 65.84^\circ = 0.0082 + j0.0183$$

$$\bar{Z}_{20(0)} = \bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_{T4}$$

$$\bar{Z}_{20(0)} = 0.195 \angle 59.89^\circ = 0.098 + j0.169$$

EN EL PUNTO DE FALLA:

$$I_b = \frac{15000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 75.31 \text{ A.} \quad V_{bn} = \frac{115}{\sqrt{3}} = 66.39 \text{ KV.}$$

LAS CORRIENTES QUE SE PRESENTAN AL OCURRIR LA FALLA SON:

$$\tilde{I}_a = I_b \tilde{I}_a = 524.175 \angle -3.43^\circ$$

$$\tilde{I}_b = 0 \quad \tilde{I}_c = 0$$

LAS TENSIONES QUE SE PRESENTAN AL OCURRIR LA FALLA SON:

$$\tilde{V}_a = 0$$

$$\tilde{V}_b = V_{bn} \tilde{V}_b = 84.44 \angle 219.99^\circ \text{ KV.}$$

$$\tilde{V}_c = V_{bn} \tilde{V}_c = 62.54 \angle 106.75^\circ \text{ KV.}$$

PARA LA SELECCION DEL APARTARRAYOS EN EL PUNTO "G" CONSIDERAMOS:

$$\frac{X_0}{X_1} = \frac{0.169}{0.199} = 0.849$$

$$\frac{R_0}{X_1} = \frac{0.098}{0.199} = 0.492$$

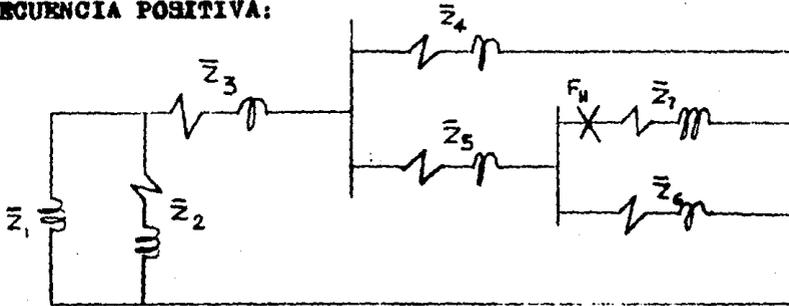
POR EL RESULTADO DE LOS COCIENTES NOS DAMOS CUENTA QUE SE TRATA DE UN SISTEMA TIPO "A".

EN SEGUIDA HACEMOS:

$$V_{AP} = \frac{115}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} \times 1.05 \times 0.7 = 69 \text{ KV.}$$

CON ESTE RESULTADO, BUSCAMOS EL VALOR INMEDIATO SUPERIOR DE TENSION EN LA TABLA NORMALIZADA Y ELEGIMOS UN APARTARRAYOS CLASE INTERMEDIA, 72 KV., 5000 A.

**CALCULO DE LA FALLA EN EL PUNTO "H" DE FASE A TIERRA.
SECUENCIA POSITIVA:**



$$\bar{Z}_1 = \bar{X}_1' // \bar{X}_2'' = j0.15 = 0.15 \angle 90^\circ$$

$$\bar{Z}_2 = \bar{Z}_{T2} + \bar{Z}_{L3} + \bar{Z}_{T5} + \bar{Z}_{R.C.} = 2.683 + j2.055 = 3.379 \angle 37.41^\circ$$

$$\bar{Z}_3 = \bar{Z}_T + \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_{T8} = 0.056 + j0.074 = 0.092 \angle 52.88^\circ$$

$$\bar{Z}_4 = \bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_{T4} + \bar{Z}_{C.M.} = 1.291 + j1.014 = 1.641 \angle 38.14^\circ$$

$$\bar{Z}_5 = \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_{T6} = 0.063 + j0.094 = 0.1131 \angle 56.16^\circ$$

$$\bar{Z}_6 = \bar{Z}_{T7} + \bar{Z}_{L8} = 1.35 + j1.011 = 1.686 \angle 36.86^\circ$$

$$\bar{Z}_7 = \bar{Z}_{T8} + \bar{Z}_{R.D.} = 2.766 + j2.074 = 3.457 \angle 36.86^\circ$$

$$\bar{Z}_8 = \bar{Z}_1 // \bar{Z}_2 = 0.005 + j0.1458 = 0.1459 \angle 88.03^\circ$$

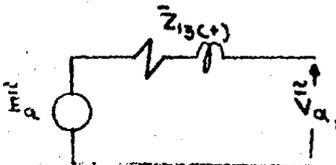
$$\bar{Z}_9 = \bar{Z}_3 + \bar{Z}_6 = 0.061 + j0.2198 = 0.2281 \angle 74.48^\circ$$

$$\bar{Z}_{10} = \bar{Z}_4 // \bar{Z}_9 = 0.0691 + j0.1924 = 0.2045 \angle 70.23^\circ$$

$$\bar{Z}_{11} = \bar{Z}_5 + \bar{Z}_{10} = 0.1391 + j0.2864 = 0.3153 \angle 65.23^\circ$$

$$\bar{Z}_{12} = \bar{Z}_6 // \bar{Z}_{11} = 0.1314 + j0.2356 = 0.2698 \angle 60.85^\circ$$

$$\bar{Z}_{13(4)} = \bar{Z}_7 // \bar{Z}_{12} = 0.1291 + j0.2161 = 0.2518 \angle 59.15^\circ$$



SECUENCIA NEGATIVA:

$$\bar{Z}_{14} = \bar{X}'_1 // \bar{X}'_2 = j0.2 = 0.2 \underline{90^\circ}$$

$$\bar{Z}_{15} = \bar{Z}_2 // \bar{Z}_{14} = 0.0087 + j0.1926 = 0.1928 \underline{87.4^\circ}$$

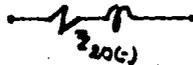
$$\bar{Z}_{16} = \bar{Z}_3 + \bar{Z}_{15} = 0.0647 + j0.266 = 0.2743 \underline{76.25^\circ}$$

$$\bar{Z}_{17} = \bar{Z}_4 + \bar{Z}_{16} = 0.078 + j0.2283 = 0.2413 \underline{71.12^\circ}$$

$$\bar{Z}_{18} = \bar{Z}_5 + \bar{Z}_{17} = 0.1409 + j0.322 = 0.3517 \underline{66.37^\circ}$$

$$\bar{Z}_{19} = \bar{Z}_6 // \bar{Z}_{18} = 0.1419 + j0.2601 = 0.2962 \underline{61.58^\circ}$$

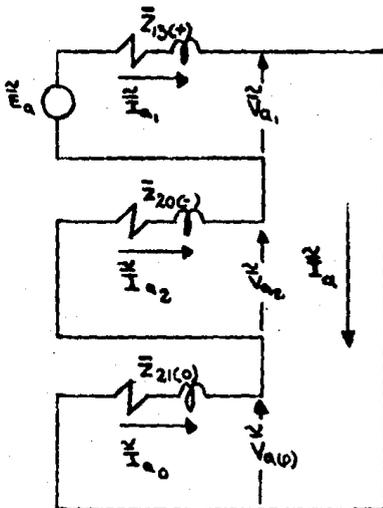
$$\bar{Z}_{20(-)} = \bar{Z}_7 // \bar{Z}_{19} = 0.1394 + j0.236 = 0.2747 \underline{57.48^\circ}$$



SECUENCIA CERO:

$$\bar{Z}_{20(0)} = \bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_{T4} + \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_{T6} = 0.154 + j0.209 = 0.259 \underline{53.6^\circ}$$

CALCULO DE LA CORRIENTE DE FALLA PARA UN CORTO CIRCUITO EN EL PUNTO "H", CONOCIENDO LAS IMPEDANCIAS DE SECUENCIA POSITIVA, NEGATIVA Y CERO.



$$V_{a1} = 7.96 \underline{10^\circ} \text{ KV.}$$

$$\bar{I}_{a1} = 1.2738 \underline{-57.44^\circ}$$

$$\bar{V}_{a1} = 0.6798 \underline{-0.81^\circ}$$

$$\bar{V}_{a2} = -0.348 - j0.0126 = -0.349 \underline{2.05^\circ}$$

$$\bar{V}_{a0} = -0.329 + j0.022 = -0.329 \underline{-3.34^\circ}$$

$$\bar{V}_a = 0$$

$$\bar{V}_b = 0.559 \underline{208.4^\circ}$$

$$\bar{V}_c = 1.0478 \underline{118.25^\circ}$$

$$\bar{I}_a = 3\bar{I}_{a1} = 3.821 \underline{-57.44^\circ}$$

LA BASE DE LA CORRIENTE EN EL PUNTO DE FALLA "H" ES:

$$I_B = 627.55 \text{ A.}$$

LAS CORRIENTES EN EL PUNTO DE FALLA "H" SON:

$$\vec{I}_a = I_B \vec{I}_a = 2395.11 \angle -57.41^\circ \text{ A.}$$

$$\vec{I}_b = 0$$

$$\vec{I}_c = 0$$

LAS TENSIONES AL NEUTRO EN EL PUNTO DE FALLA "H" SON:

$$\vec{V}_n = 0$$

$$\vec{V}_b = V_{bn} \vec{V}_b = 4.449 \angle 208.4^\circ \text{ KV.}$$

$$\vec{V}_c = V_{cn} \vec{V}_c = 8.54 \angle 119.25^\circ \text{ KV.}$$

PARA LA SELECCION DEL APARTARRAYOS EN EL PUNTO DE FALLA "H".

TIPO DE CONEXION A TIERRA ES "A".

$$\frac{X_2}{X_1} = \frac{0.209}{0.2161} = 0.967$$

$$\frac{R_0}{X_1} = \frac{0.154}{0.2161} = 0.7126$$

$$V_{W \text{ APART.}} = \frac{18.8}{\sqrt{3}} \sqrt{2} \times 1.05 \times 0.72 = 8.518 \text{ KV.}$$

CON ESTOS VALORES NOS VAMOS A LA TABLA DE VALORES DE TENSIONES NORMALIZADAS, AL VALOR DE TENSION INMEDIATO SUPERIOR.

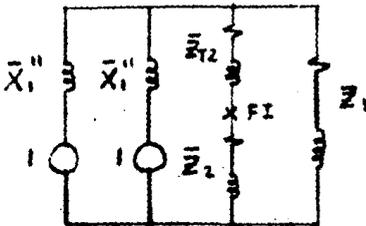
ESCOJEMOS EL APARTARRAYOS DE 9 KV., SERIE B (DISTRIBUCION)

5,000 A.

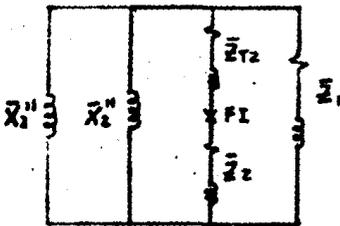
Cálculo de la falla en el punto I.

Tomando como referencia el diagrama del sistema tenemos:

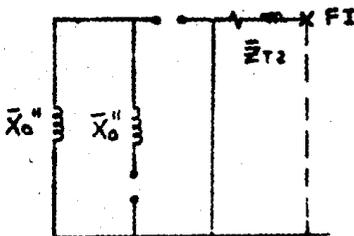
SECUENCIA POSITIVA



SECUENCIA NEGATIVA



SECUENCIA CERO



$$\bar{Z}_1 = \bar{Z}_{T1} + \bar{Z}_{I0} = 0.762 \angle 40.26^\circ$$

$$\bar{Z}_1 = 0.582 + j 0.493$$

$$\bar{Z}_2 = \bar{Z}_{L3} + \bar{Z}_{T5} + \bar{Z}_{Tc}$$

$$\bar{Z}_2 = 3.296 \angle 37.84^\circ = 2.616 + j 2.006$$

$$\bar{Z}_3 = \bar{X}_1'' // \bar{X}_1'' = 0.15 \angle 90^\circ = j 0.15$$

$$\bar{Z}_4 = \bar{Z}_1 // \bar{Z}_3 = 0.131 \angle 92.41^\circ$$

$$\bar{Z}_4 = 0.017 + j 0.129$$

$$\bar{Z}_5 = \bar{Z}_4 + \bar{Z}_{T2} = 0.253 \angle 57.85^\circ$$

$$\bar{Z}_5 = 0.137 + j 0.218$$

$$\bar{Z}_{6(1)} = \bar{Z}_2 // \bar{Z}_5 = 0.235 \angle 56.4^\circ$$

$$\bar{Z}_{6(1)} = 0.13 + j 0.195$$

$$\bar{Z}_7 = \bar{X}_2'' // \bar{X}_2'' = 0.2 \angle 90^\circ = j 0.2$$

$$\bar{Z}_8 = \bar{Z}_1 // \bar{Z}_7 = 0.168 \angle 80.29^\circ$$

$$\bar{Z}_8 = 0.028 + j 0.165$$

$$\bar{Z}_9 = \bar{Z}_8 + \bar{Z}_{T2} = 0.293 \angle 59.77^\circ$$

$$\bar{Z}_9 = 0.148 + j 0.254$$

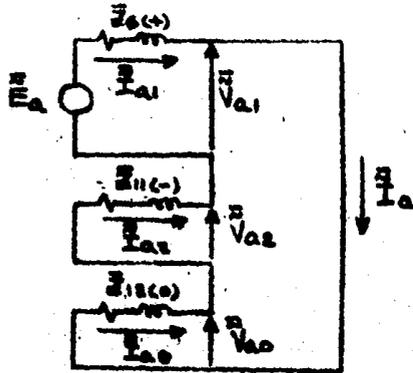
$$\bar{Z}_{11(1)} = \bar{Z}_2 // \bar{Z}_9 = 0.27 \angle 57.98^\circ$$

$$\bar{Z}_{11(1)} = 0.143 + j 0.228$$

$$\bar{Z}_{12(1)} = \bar{Z}_{T2} = 0.15 \angle 36.86^\circ$$

$$\bar{Z}_{12(1)} = 0.12 + j 0.089$$

Cálculo de la corriente de falla para un corto circuito monofásico de fase a tierra en el punto I, conociendo las impedancias de secuencia positiva, negativa y cero.



$$\vec{I}_{a1} = \frac{\vec{E}_a}{\vec{Z}_{G(+)} + \vec{Z}_{G(-)} + \vec{Z}_{G(0)}}$$

$$\vec{I}_{a1} = \frac{1}{0.645 \angle 52.49^\circ} = 1.55 \angle -52.49^\circ$$

$$\vec{V}_{a1} = 1 - (0.235 \angle 56.4^\circ)(1.55 \angle -52.49^\circ) = 0.637 \angle 2.24^\circ$$

$$\vec{V}_{a2} = - (0.27 \angle 57.98^\circ)(1.55 \angle -52.49^\circ) = -0.418 \angle 5.49^\circ$$

$$\vec{V}_{a0} = - (0.15 \angle 36.86^\circ)(1.55 \angle -52.49^\circ) = -0.232 \angle -15.63^\circ$$

$$\vec{V}_a = 0$$

$$\vec{V}_b = 0.885 \angle 251.76^\circ$$

$$\vec{V}_c = 1.054 \angle 111.66^\circ$$

$$\vec{I}_a = 3(1.55 \angle -52.49^\circ) = 4.65 \angle -52.49^\circ$$

$$\vec{I}_b = \vec{I}_c = 0$$

En el punto de falla:

$$I_B = \frac{5000}{\sqrt{3}(69)} = 41.83 \text{ [Amp.]}$$

Las corrientes que se presentan al ocurrir la falla son:

$$\tilde{I}_a = I_B \tilde{I}_a = (41.83)(4.65 \angle -52.49^\circ) = 194.5 \angle -52.49^\circ \text{ [Amp]}$$

$$\tilde{I}_b = \tilde{I}_c = 0$$

$$V_{BN} = \frac{69}{\sqrt{3}} = 39.83 \text{ [kV]}$$

Las tensiones que se presentan al ocurrir la falla son:

$$\tilde{V}_a = 0$$

$$\tilde{V}_b = (38.83)(0.885 \angle 251.76^\circ) = 35.25 \angle 251.76^\circ \text{ [kV]}$$

$$\tilde{V}_c = (38.83)(1.054 \angle 111.66^\circ) = 41.98 \angle 111.66^\circ \text{ [kV]}$$

Para la selección del apartarrayos en el punto I consideramos:

$$\frac{X_0}{X_1} = \frac{0.089}{0.195} = 0.456$$

$$\frac{R_0}{X_1} = \frac{0.12}{0.195} = 0.615$$

Se trata de un sistema tipo A.

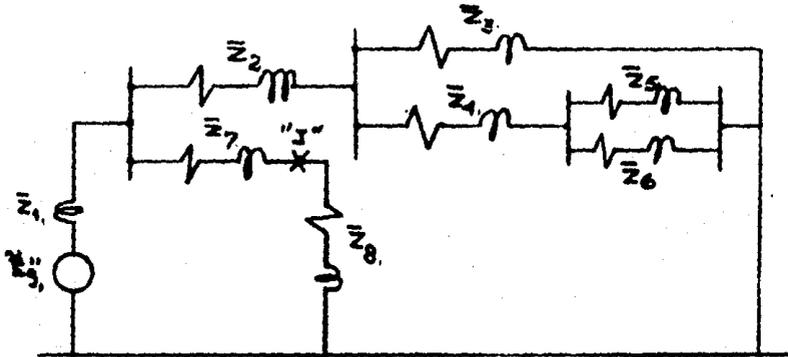
En seguida hacemos:

$$\frac{69}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} \times 1.05 \times 0.7 = 41.4 \text{ [kV]}$$

Con este resultado, entramos a la tabla normalizada y buscamos el valor inmediato superior de tensión y elegimos un apartarrayos clase Intermedia, 42 KV, 5000 A.

Cálculo de la falla de fase a tierra en el punto "J".

Diagrama equivalente de secuencia positiva.



$$\bar{Z}_1 = \bar{X}_{11} // \bar{X}_{21} = j0.15 \text{ p.u.}$$

$$\bar{Z}_2 = \bar{Z}_{T1} + \bar{Z}_{L1} + \bar{Z}_{T3} = 0.057 + j0.075 = 0.094 \angle 52.8^\circ \text{ p.u.}$$

$$\bar{Z}_3 = \bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_{T4} + \bar{Z}_{C.H.} = 1.287 + j1.016 = 1.61 \angle 38.3^\circ \text{ p.u.}$$

$$\bar{Z}_4 = \bar{Z}_{L4} + \bar{Z}_{T6} = 0.063 + j0.095 = 0.1147 \angle 56.5^\circ \text{ p.u.}$$

$$\bar{Z}_5 = \bar{Z}_{T9} + \bar{Z}_{R.O.1} = 2.765 + j2.074 = 3.45 \angle 36.2^\circ \text{ p.u.}$$

$$\bar{Z}_6 = \bar{Z}_{T7} + \bar{Z}_{INA1} = 1.26 + j0.94 = 1.57 \angle 36.8^\circ \text{ p.u.}$$

$$\bar{Z}_7 = \bar{Z}_{T2} + \bar{Z}_{L3} = 0.129 + j0.189 = 0.26 \angle 49.2^\circ \text{ p.u.}$$

$$\bar{Z}_8 = \bar{Z}_{T5} + \bar{Z}_{F.C.1} = 2.55 + j1.9 = 3.18 \angle 36.9^\circ \text{ p.u.}$$

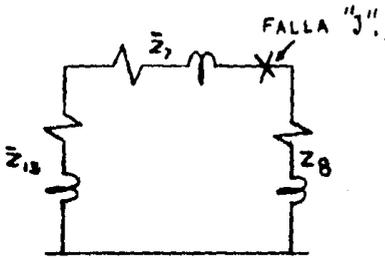
$$\bar{Z}_9 = \bar{Z}_5 // \bar{Z}_6 = 1.08 \angle 36.8^\circ = 0.86 + j0.64 \text{ p.u.}$$

$$\bar{Z}_{10} = \bar{Z}_4 + \bar{Z}_9 = 0.92 + j0.74 = 1.19 \angle 38.7^\circ \text{ p.u.}$$

$$\bar{Z}_{11} = \bar{Z}_3 // \bar{Z}_{10} = 0.68 \angle 38.5^\circ = 0.54 + j0.43 \text{ p.u.}$$

$$\bar{Z}_{12} = \bar{Z}_2 + \bar{Z}_{11} = 0.6 + j0.5 = 0.78 \angle 40.2^\circ \text{ p.u.}$$

$$\bar{Z}_{13} = \bar{Z}_{12} // \bar{Z}_1 = 0.13 \angle 82.5^\circ = 0.017 + j0.13 \text{ p.u.}$$

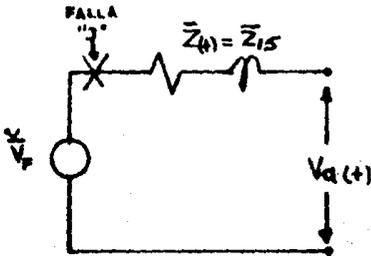


$$\bar{Z}_{14} = \bar{Z}_{13} + \bar{Z}_7 = 0.2 + j0.32 = 0.38 \angle 57.1^\circ \text{ p.u.}$$

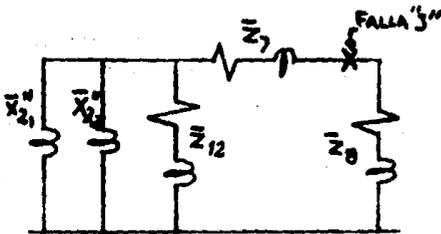
$$\begin{aligned} \bar{Z}_{(1)} &= \bar{Z}_{15} = \bar{Z}_{14} \parallel \bar{Z}_8 = 0.34 \angle 54.9^\circ \text{ p.u.} \\ &= 0.2 + j0.28 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

$$\bar{V}_F = 0.975 \angle -1.8^\circ \text{ p.u.}$$

$$\bar{I}_F = 0.97 - j0.08 \text{ p.u.}$$



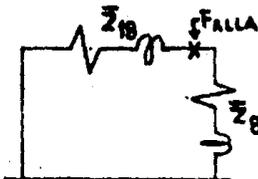
Secuencia Negativa (-).



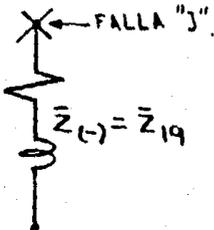
$$\bar{Z}_{16} = \bar{X}_{21} \parallel \bar{X}_{22} = j0.2 \text{ p.u.}$$

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{17} &= \bar{Z}_{16} \parallel \bar{Z}_{12} = 0.17 \angle 80.5^\circ \text{ p.u.} \\ &= 0.028 + j0.166 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{18} &= \bar{Z}_{17} + \bar{Z}_7 = 0.217 + j0.355 \text{ p.u.} \\ &= 0.416 \angle 58.5^\circ \text{ p.u.} \end{aligned}$$

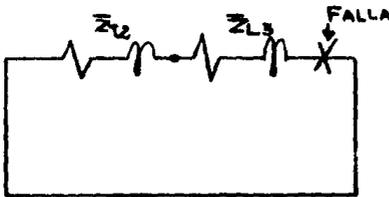


$$\begin{aligned} \bar{Z}_{(1)} &= \bar{Z}_{(1)} = \bar{Z}_{18} \parallel \bar{Z}_8 = 0.37 \angle 56^\circ \text{ p.u.} \\ &= 0.2 + j0.3 \text{ p.u.} \end{aligned}$$



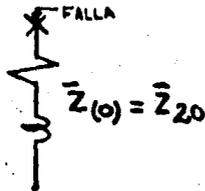
Secuencia Cero (0).

A partir del diagrama equivalente de secuencia cero del Sistema Eléctrico de Potencia tenemos:

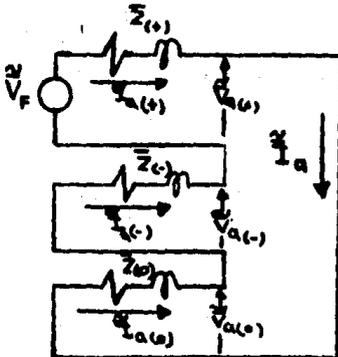


$$\bar{Z}_{20} = \bar{Z}_{(0)} = \bar{Z}_{L2} + \bar{Z}_{L3}$$

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{(0)} &= 0.2 + j0.188 \text{ p.u.} \\ &= 0.26 \angle 44.8^\circ \text{ p.u.} \end{aligned}$$



Cálculo de la corriente de falla en el punto "J".



$$\begin{aligned} \tilde{V}_F &= \tilde{E}_{a(+)} = 0.975 \angle -1.8^\circ \text{ p.u.} \\ &= 0.97 - j0.03 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

$$\tilde{I}_{a(+)} = \tilde{I}_{a(-)} = \tilde{I}_{a(0)}$$

$$\tilde{I}_{a(+)} = \frac{\tilde{E}_{a(+)}}{\bar{Z}_{(+) + \bar{Z}_{(-)} + \bar{Z}_{(0)}}$$

$$\tilde{I}_{a(+)} = 1.04 \angle -57.8^\circ = 0.55 - j0.88 \text{ p.u.}$$

$$\tilde{V}_{a(+)} = \tilde{E}_{a(+)} - \tilde{I}_{a(+)} \bar{Z}_{(+)} = 0.62 - j0.012 = 0.62 \angle -1.15^\circ \text{ p.u.}$$

$$\tilde{V}_{a(-)} = -\bar{Z}_{(-)} \tilde{I}_{a(-)} = -0.38 + j0.012 = -0.38 \angle -1.9^\circ \text{ p.u.}$$

$$\tilde{V}_{a(0)} = -\bar{Z}_{(0)} \tilde{I}_{a(0)} = -0.27 + j0.06 = -0.278 \angle -13.1^\circ \text{ p.u.}$$

$$\tilde{V}_a = \tilde{V}_{a(+)} + \tilde{V}_{a(-)} + \tilde{V}_{a(0)} = 0 \quad ; \quad \tilde{V}_a = 0$$

Conociendo las siguientes expresiones:

$$a = 1 \angle 120^\circ = 0.5 + j0.866.$$

$$a^2 = 1 \angle -120^\circ = -0.5 - j0.866$$

$$a^2 + a = -1 = 1 \angle 180^\circ$$

$$\tilde{I}_a = \tilde{I}_{a(+)} + \tilde{I}_{a(-)} + \tilde{I}_{a(0)} = 3 \tilde{I}_{a(+)}$$

$$\tilde{I}_a = 3.12 \angle -58^\circ \text{ p.u.}$$

$$\tilde{I}_b = 0 ; \tilde{I}_c = 0$$

$$\tilde{V}_b = a^2 \tilde{V}_{a(+)} + a \tilde{V}_{a(-)} + \tilde{V}_{a(0)}$$

$$\tilde{V}_b = -0.41 - j0.8 = 0.9 \angle 243^\circ \text{ p.u.}$$

$$\tilde{V}_c = a \tilde{V}_{a(+)} + a^2 \tilde{V}_{a(-)} + \tilde{V}_{a(0)}$$

$$\tilde{V}_c = -0.36 + j0.9 = 1 \angle 111.4^\circ \text{ p.u.}$$

$$I_B = \frac{\text{KVA}}{\sqrt{3} V_B} = 128.7 \angle 11.8^\circ \text{ Amps.}$$

$$\tilde{I}_a = I_B \tilde{I}_a ; \tilde{I}_a = 402.08 \angle -56.13^\circ \text{ Amps.}$$

$$\tilde{I}_b = 0, \tilde{I}_c = 0$$

$$V_{B_N} = 38.85 \angle -1.8^\circ \text{ KV.}$$

$$\tilde{V}_a = 0$$

$$\tilde{V}_b = V_{B_N} \tilde{V}_b ; \tilde{V}_b = 35.13 \angle 241.2^\circ \text{ KV.}$$

$$\tilde{V}_c = V_{B_N} \tilde{V}_c ; \tilde{V}_c = 38.9 \angle 109.6^\circ \text{ KV.}$$

Selección de los Apartarrayos para el punto "J".

DATOS:

$$R_0 = 0.2$$

$$X_0 = 0.188$$

$$X_1 = 0.28$$

$$I_{cc} = 402.08 \angle -56.13^\circ \text{ Amps.}$$

$$V_{B.N} = 58.85 \angle -1.8^\circ \text{ kV.}$$

$$\frac{X_0}{X_1} = 0.67 \quad ; \quad \frac{R_0}{X_1} = 0.71$$

Como $0 < \frac{X_0}{X_1} < 3$ y $0 < \frac{R_0}{X_1} < 1 \Rightarrow$ SISTEMA TIPO A.

Con los valores de $\frac{I_D}{X_1}$ y $\frac{R_D}{X_1}$ de la Fig. 3.7 obtenemos un

valor del 75%.

$$V_{AP} = \frac{V_{af}}{\sqrt{3}} \sqrt{2} (1.05) (\% \text{ gráfica})$$

$$V_{AP} = \frac{67.3}{\sqrt{3}} \sqrt{2} (1.05) (0.75)$$

$$V_{AP} = 43.27 \text{ kV.}$$

Con este valor de V_{AP} , se entra a la tabla 3.1 y se obtiene el valor de tensión del Apartarrayos que se va a seleccionar.

Apartarrayos a seleccionar es :

$$V_{AP} = 48 \text{ kV. SERIE A. INTERMEDIOS 5000 Amperes.}$$

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Es una necesidad fundamental instalar apertterryos para proteger a los -
sistemas eléctricos de potencia contra sobretensiones transitorias de -
cualquier origen, con el fin de garantizar una operación confiable y con-
tinua.

BIBLIOGRAFIA

B I B L I O G R A F I A

1. PROTECTION OF TRANSMISSION SYSTEMS AGAINST LIGHTING.
Autor: Dr. W. W. Lewis
Editorial: John Wiley & Sons Inc. London-Chapman & Hall, Ltd (1950).
2. THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY ON THE ATMOSPHERE AND IT'S CAUSES.
Autor: V. F. Hess
Editorial: Van Nostrand Company, 1928.
3. PHYSICS OF THE EARTH, VOL. 8
Autor: O. H. Gish
Editorial: Mc. Graw Hill Book Co., 1939.
4. TERRESTRIAL MAGNETISM AND ELECTRICITY.
Autor: O. H. Gish
Editorial: Mc. Graw Hill Book Co., 1939.
5. ATMOSPHERIC ELECTRICITY.
Autor: O. H. Gish
Editorial: Mc. Graw Hill
6. REDES ELECTRICAS (19 y 20 PARTE).
Autor: Ing. Jacinto Viqueira Landa
Editorial: Representaciones y servicios de ingeniería S. A., 1975.
7. ESTACIONES DE TRANSFORMACION Y DISTRIBUCION. PROTECCION DE SISTEMAS ELECTRICOS.
Autor: José Ramírez Vázquez
Ediciones: CEAC, S.A. 1974.

8. GRAFICAS Y TABLAS PARA EL CALCULO DE LINEAS DE TRANSMISION Y SUBESTACIONES.
Autor: Ing. Daniel Barrios-Morales Frías
Editorial: Representaciones y servicios de ingeniería S.A. 1974.
9. ANALISIS DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA (2ª EDICION).
Autor: William D. Stevenson, Jr.
Editorial: Mc. Graw Hill, 1981.
10. INTRODUCCION AL ANALISIS DE LOS SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA (2ª - EDICION).
Autor: Ing. Gilberto Enrique Harper
Editorial: LIMUSA 1978.
11. NORMA OFICIAL MEXICANA, NOM-J-321-1978.
Aparterrayos
Dirección General de Normas.
12. NORMA OFICIAL MEXICANA, NOM-J271-1980.
Técnicas de pruebas en alta tensión
Dirección General de Normas.
13. I.E.E.E. STANDARD FOR SURGE ARRESTERS FOR A.C. POWER CIRCUITS.
ANSI/IEEE c62.1-1981.
14. AMERICAN NATIONAL STANDARD
ANSI c62.2-1981.
15. CATALOGO 353 IUSA, MAYO 1984.