

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**



**SELECCION DE UNA SUBESTACION MODELO**  
**PARA PRACTICAS DE LABORATORIO**

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

**JESUS ANTONIO REYNOSO PABLOS**  
**JUAN RAYMUNDO SALVATORI RUIZ DE AGUIRRE**

**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**1979**

*247*  
*122*



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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 esta 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.

## CONTENIDO

	Pág.
<b>CAPITULO UNO.</b>	
Características de la Subestación tipo compacta.....	1
<b>CAPITULO DOS.</b>	
Equipo de Medición.....	7
<b>CAPITULO TRES.</b>	
Barras colectoras y cuchillas.....	31
<b>CAPITULO CUATRO.</b>	
Apartarrayos.....	36
<b>CAPITULO CINCO.</b>	
Interruptores.....	47
<b>CAPITULO SEIS.</b>	
Transformadores.....	52
<b>CAPITULO SIETE.</b>	
Red de tierra.....	75
<b>CONCLUSIONES.....</b>	87
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	90

## INTRODUCCION.

La presente tesis está basada en el seminario "Proyecto de una Subestación Modelo para Prácticas de Laboratorio", dirigido por el Ingeniero Victor Pérez Amador jefe del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

En la actualidad el uso de la subestación tipo compacta se ha generalizado debido a las grandes ventajas que proporciona a la industria en general, por lo que es necesario que el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería cuente con un modelo de este tipo. En esta tesis se pretende proporcionar las bases para la selección de un modelo de subestación tipo compacta que permita al alumno practicar en ella, obteniéndose de ésta manera el conocimiento de la operación y de los elementos principales que la constituyen. Para poder cumplir con este objetivo, se proponen modificaciones a la subestación compacta del tipo convencional.

Considerando que el transformador es una de las partes más importantes de la subestación, se propone una modificación de tal manera que el alumno pueda realizar las pruebas a los transformadores propuestas en el capítulo seis sin que tenga contacto directo con éstos. Otra modificación importante es la instalación de ventanas de cristal inastillable que permitan al alumno observar las partes que constituyen la subestación.

Así mismo, se proporciona la descripción y fórmulas de selección de los principales elementos de la subestación, haciendo mención de los

tipos de red de tierra comunmente usados así como de sus elementos.

La cantidad y ubicación de los elementos así como las dimensiones aproximadas de la subestación fueron tomadas considerando las opiniones de fabricantes de subestaciones tipo compactas, de tal manera que en el supuesto caso de su realización fuera lo más económico posible.

## CAPITULO UNO

### CARACTERISTICAS DE LA SUBESTACION TIPO COMPACTA.

Una subestación tipo compacta consiste en un gabinete en el cual se aloja el equipo eléctrico protegiendolo y evitando el contacto accidental de personas con partes "vivas". Para la selección del tipo de gabinete que deberá utilizar una subestación "tipo compacta", intervienen las condiciones ambientales, las características físicas y las características básicas de la subestación.

Los gabinetes que albergan equipo eléctrico son clasificados por las normas de la industria eléctrica según sean las condiciones ambientales en las cuales se localizarán éstos. Estas condiciones ambientales están referidas al tipo de atmósfera existente en el lugar de operación del equipo y, según sea el tipo de atmósfera se deberá utilizar la clasificación de gabinete apropiada. Estudiando el tipo de atmósfera existente en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, vemos que es factible la utilización de un gabinete para uso general (NEMA 1), el cual ofrece protección contra contactos accidentales con el equipo y contra salpicaduras de líquidos y lodos ligeros.

Las características físicas de una subestación tipo compacta, están determinadas por las necesidades particulares de cada usuario.

NEMA: National Electrical Manufacturers Association.

Dado que el objetivo de la subestación que se propone es con fines didácticos, éstas características revisten gran importancia ya que su finalidad implica importantes modificaciones a la subestación compacta del tipo convencional.

Tomando en consideración las opiniones de fabricantes del ramo, se llegó a la conclusión de que la forma más adecuada del gabinete para fines didácticos es la siguiente:

a). - La subestación compacta deberá contar con tres secciones. - La sección I alojará el equipo de medición, los apartarrayos y la protección en alta tensión. La sección II alojará dos transformadores y los juegos de cuchillas para pruebas. La sección III contendrá la protección y el tablero de distribución en baja tensión.

b). - La subestación deberá contar en su parte frontal con ventanas de cristal inastillable cuyas dimensiones deberán ser las máximas posibles de acuerdo con las limitaciones del fabricante.

c). - La subestación deberá contar con iluminación interior de tal manera que sus elementos puedan ser observados claramente desde las ventanas mencionadas.

d). - La segunda sección de la subestación deberá contar con juegos de cuchillas que permitan la conexión y desconexión de los transformadores entre sí, y del resto del equipo. Así también esta sección deberá contar con "terminales para pruebas" conectadas a las terminales de los transformadores que estarán localizadas en la parte frontal, existiendo las terminales correspondientes al neutro de tal manera que sean cuatro -

terminales para el lado de baja tensión y tres terminales para el lado de alta tensión por cada transformador. Cada terminal contará con una inscripción que indique a qué transformador corresponde y el lado al cual pertenece (alta ó baja tensión), de tal manera que sea posible la realización de la práctica 8 que se propone en el capítulo seis.

e). - Dado el acceso y la ubicación del Laboratorio de Máquinas - - Eléctricas, es importante considerar que una subestación de tipo compacta presentaría grandes dificultades para ser introducida en conjunto dentro del Laboratorio, por lo que para su instalación requerirá ser ensamblada - por partes.

Las características básicas de una subestación tipo compacta son - aquéllos parámetros que nos permiten seleccionar las capacidades de los - elementos que la constituyen. Estos parámetros son:

- a). - Tensión primaria.
- b). - La ó las tensiones secundarias.
- c). - El nivel de corto circuito en el primario.
- d). - El nivel de corto circuito en el secundario.
- e). - La frecuencia.
- f). - La capacidad.

La compañía que suministra la energía eléctrica es quién decide a - que tensión primaria se alimentará la subestación, indicará la frecuencia - y proporcionará el valor de corto circuito primario en el lugar de la sub - estación si ésta es alimentada directamente por una línea de aquella.

Si por otro lado una subestación es alimentada por una línea ó ali -

alimentador que no pertenece a la compañía suministradora de energía eléctrica, la tensión de dicho alimentador puede escogerse en algunas ocasiones, y en otras es obligado por condiciones preestablecidas. En estos casos el valor de corto circuito se tendrá que calcular tomando en cuenta el valor de corto circuito en el lugar de entrega de la energía por la compañía suministradora y la impedancia entre éste lugar y el punto para el que se quiera determinar el valor de corto circuito.

El Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería se encuentra en el último caso descrito, es decir si se quiere calcular el valor de corto circuito primario se deberá proceder como se indicó, ó bien considerar el valor de corto circuito de la subestación de la Facultad de Ingeniería.

Es importante hacer notar que el valor de corto circuito en el primario no tiene relación directa con el monto de la carga sino que depende exclusivamente de los generadores que alimentan una red ó un sistema y de la impedancia desde los generadores hasta el punto de la red bajo estudio.

En subestaciones de gran capacidad la tensión secundaria depende de un estudio económico en función de:

- a). - El tamaño de la carga en KVA.
- b). - La longitud de los alimentadores.
- c). - La regulación máxima permisible.

Las subestaciones de tipo compacto no son comunmente usadas en grandes capacidades, por lo que la tensión secundaria está determinada en función de necesidades específicas como son las características de las

máquinas ó aparatos en cuanto a la tensión a que deben funcionar.

Si se desconoce el valor de corto circuito en el lado primario de un transformador, el valor del corto circuito en el secundario podrá ser determinado con buena aproximación mediante la fórmula de la corriente simétrica de corto circuito en el secundario.

$$I_{cc} = \frac{100 \text{ (KVAT)}}{(\%Z) \text{ KV}_{ff} (\sqrt{3})}$$

ó cuando se conoce la corriente de plena carga:

$$I_{cc} = \frac{I_{pc} (100)}{\%Z}$$

donde:

KVAT: capacidad del transformador en KVA.

$\%Z$  : por ciento de impedancia del transformador.

$\text{KV}_{ff}$  : tensión entre fases en el lado secundario del transformador.

$I_{pc}$  : corriente de plena carga.

$I_{cc}$  : corriente de corto circuito en el secundario.

La capacidad de una subestación estará de acuerdo a la demanda máxima que producirá la carga prevista. El siguiente paso será determinar los ciclos de operación durante un día típico de trabajo.

Considerando el comportamiento de un cierto tipo de carga, se puede llegar a determinar la demanda máxima. Obviamente este procedimiento es muy laborioso por lo cual se han elaborado tablas que indican facto -

res de demanda típicos para diferentes tipos de carga basados en la experiencia. Sumando las demandas máximas que produce cada tipo de carga se obtiene la demanda máxima total probable. En ocasiones puede considerarse que la demanda máxima total es menor que la suma de las demandas máximas individuales debido a que no ocurren simultáneamente (factor de diversidad).

Para seleccionar la capacidad de los diferentes elementos de una subestación, la demanda máxima debe aumentarse un cierto porcentaje considerando un posible crecimiento futuro.

## CAPITULO DOS

### EQUIPO DE MEDICION.

#### TRANSFORMADORES PARA MEDICION.

Los transformadores para medición están destinados a alimentar - aparatos de medida, relevadores ó aparatos análogos.

Tienen como función principal reducir a valores normales y no peli- grosos los valores de tensión y de corriente en un sistema eléctrico con el fin de permitir el empleo de aparatos de medición normalizados, por con - siguiente más económicos y que pueden manipularse sin peligro.

Existen dos categorías de transformadores para medición:

Transformadores de corriente. - El transformador de corriente es - un aparato en donde la corriente secundaria es dentro de las condiciones - normales de operación, prácticamente proporcional a la corriente prima - ria y está defasada de ésta un ángulo cercano a cero para un sentido apro - piado de conexiones.

El primario de este transformador está conectado en serie con el - circuito que se desea controlar, en tanto que el secundario está conectado a los circuitos de corriente de uno ó varios aparatos de medición, releva - dores ó aparatos análogos, todos ellos conectados en serie.

Un transformador de corriente puede tener uno ó varios devanados - secundarios bobinados sobre uno ó varios circuitos magnéticos separados.

Transformadores de Potencial. - Un transformador de potencial es - un transformador para medición, donde la tensión secundaria es dentro de

las condiciones normales de operación, prácticamente proporcional a la tensión primaria y defasada de ella un ángulo cercano a cero para un sentido apropiado de conexiones.

El primario de dicho transformador está conectado a las terminales entre las que se desea medir la tensión, en tanto que el secundario está conectado a circuitos de potencial de uno o varios aparatos de medida, relevadores ó aparatos análogos, conectados en paralelo.

Selección de transformadores de medición. - Los factores que determinan la selección de estos aparatos son:

- El tipo de instalación.
- El tipo de aislamiento.
- La potencia.
- La clase de precisión.

#### Tipo de Instalación.

Los transformadores para medición pueden ser construídos para ser usados en instalaciones interiores ó exteriores.

Generalmente por razones de economía, las instalaciones de baja y media tensión, hasta 25 KV, son diseñadas para servicio interior. Las instalaciones de tipo exterior son de tensiones desde 34.5 a 400 KV, salvo en los casos donde por condiciones particulares se hacen instalaciones interiores para tensiones hasta de 230 KV.

## Tipo de Aislamiento.

a). - Material para baja tensión. - Generalmente los aparatos son -  
construidos con aislamiento en aire ó aislamiento en resina sintética, su -  
poniéndose que lo común son las instalaciones interiores.

b). - Material de media tensión. - Los transformadores para insta -  
laciones interiores (tensiones de 3 a 25 KV) son construídos ya sea con ais -  
lamiento de aceite con envoltente de porcelana, ya sea con aislamiento en -  
resina sintética.

Hay que hacer notar que la mayoría de los diseños actuales emplean  
el material seco; los aparatos con aislamiento en aceite ó masa aislante -  
(compound) se utilizan muy poco y sólo para ampliaciones de instalaciones  
existentes.

Los aparatos para instalaciones exteriores son generalmente cons -  
truídos con aislamiento porcelana-aceite, aunque la técnica más moderna -  
está realizando ya aislamiento en seco para este tipo de transformadores.

c). - Material para alta tensión. - Los transformadores para alta -  
tensión son aislados con papel dieléctrico, impregnados en aceite y coloca -  
dos dentro de una envoltente de porcelana.

## Potencia.

La potencia nominal que se debe seleccionar para los transforma -  
dores de medición está en función de la utilización a que se destinará un -  
aparato de medición.

## Clase de precisión.

La selección de la clase de precisión depende igualmente de la utilización a que se destinan los transformadores. Independientemente a esto, los transformadores y los aparatos que van a ser conectados a ellos deberán presentar una similitud de exactitud.

Para las mediciones industriales y puramente inductivas de voltmetros y ampermetros, las clases 1, 1.2, 3 y 5 son siempre suficientes.

En algunos casos, la clase 0.5 ó 0.6 es utilizada cuando se trata de instrumentos más precisos.

Para transformadores de corriente empleados en alimentación de sistemas de protección, las clases de precisión 5 y 10 son utilizadas con valores definidos de factores de sobrecarga.

## TRANSFORMADORES DE CORRIENTE.

Los transformadores de corriente tienen por finalidad llevar la intensidad de corriente que se desea medir a un valor cómodo para manipular y registrar. Conectados en serie con las líneas de alimentación, están sujetos a las mismas sobretensiones y sobreintensidades que ellas. Estas solicitudes que son provocadas generalmente por un corto circuito, no son solamente función de la potencia tomada por el circuito de alimentación, sino que dependen de la potencia del sistema y de la impedancia de los circuitos afectados. Hace falta entonces, tener en cuenta la capacidad de corto circuito del sistema y el lugar en donde se conectará el transformador de corriente.

## Instalación.

Suponiendo que se ha elegido el tipo de instalación (interior ó intemperie), conviene examinar todavía que tipo de transformador de corriente - será posible utilizar en la misma. En efecto, la elección de un modelo pue - de estar incluída por elementos particulares, como pueden ser: posición, - altura, mantenimiento previsto, etc.

## Tensión nominal de aislamiento.

La tensión nominal de aislamiento de un transformador de corrien - te, debe ser cuando menos igual a la tensión más elevada del sistema en - que se utilice.

La elección de la tensión nominal de aislamiento depende igualmen - te de las condiciones especiales de la instalación elegida. En climas sali - nosos, tropicales, con neblina ó instalaciones a altitudes superiores a - - 1000 metros, se deberá preveer un nivel de aislamiento superior.

## Realización.

Los transformadores de corriente pueden estar construídos con uno ó varios circuitos magnéticos según las necesidades particulares de su utilización.

Los transformadores son provistos con un sólo circuito magnético - cuando alimentan un sólo aparato, teniendo una función bien definida, por - ejemplo: medición ó protección, ó cuando las exigencias de la explotación - permitan conectar sobre el mismo circuito magnético aparatos teniendo - -

funciones diferentes, pero donde las influencias mutuas de ellas no tengan consecuencias, por ejemplo un ampermetro indicador y un relevador de sobrecorriente.

Cuando son provistos con núcleos separados, cada circuito magnético alimenta los aparatos que tengan una función definida, por ejemplo un transformador que tenga tres circuitos magnéticos separados puede alimentar:

- El primero, la medición de precisión.
- El segundo una protección diferencial.
- El tercero, mediciones industriales y relevadores de sobrecorriente.

Un aparato construído con dos ó tres circuitos magnéticos separados, se comporta teóricamente como si se tratase de dos ó tres aparatos completamente diferentes, ya que sólo el bobinado primario es común; los circuitos magnéticos y los bobinados secundarios están completamente independientes y separados.

Los transformadores de corriente destinados a ser instalados en subestaciones de alta tensión (intemperie) y subestaciones interiores con gran capacidad en el sistema de alimentación, son comunmente construídos con varios núcleos separados.

Corrientes nominales normalizadas para transformadores de corriente.

La corriente nominal de los bobinados primarios y secundarios de un transformador de corriente, son los valores para los cuales los bobina-

dos están diseñados. Las diferentes normas (ANSI, VDE, CEB, CEI, etc.), han normalizado los valores de las corrientes primarias y secundarias de los aparatos.

Corriente nominal primaria.

En la selección de la corriente nominal primaria de un transformador de corriente, se debe tomar el valor normalizado superior al valor de la corriente nominal de la instalación.

En ciertos tipos de transformadores de corriente se realiza una doble ó una triple relación primaria, ya sea por medio de conexiones serie - paralelo del bobinado primario, ó por medio de tomas en los bobinados secundarios.

Tabla de valores normalizados.

SIMPLE RELACION DE TRANSFORMACION	
5	150
10	200
15	300
20	400
25	600
30	800
40	1200
50	1500
75	2000
100	3000

ANSI: American National Scientific Institute.

DOBLE RELACION DE TRANSFORMACION	
2 x 5	2 x 100
2 x 10	2 x 150
2 x 15	2 x 200
2 x 25	2 x 300
2 x 50	2 x 400
2 x 75	2 x 600

Corriente nominal secundaria.

El valor normalizado es generalmente de 5 Amperes; en ciertos ca sos, cuando el alambrado del secundario puede representar una carga im - portante, se puede seleccionar el valor de 1 Ampere.

Carga Secundaria.

La carga secundaria para un transformador de corriente, es el va - lor en ohms de la impedancia constituida por los instrumentos del secunda rio, comprendiendo sus conexiones.

La carga secundaria nominal es la impedancia del circuito secunda rio, correspondiente a la potencia de precisión bajo la corriente nominal.

Potencia Nominal.

La potencia nominal de los transformadores de corriente, es la po tencia aparente secundaria bajo una corriente nominal determinada. Está - indicada generalmente en la placa de características y se expresa en Volt - amperes, aunque también puede expresarse en ohms.

Para escoger la potencia nominal de un transformador de corriente, es necesario hacer la suma de las potencias de todos los aparatos que serán conectados en serie con su devanado secundario y tener en cuenta la pérdida por efecto de Joule de los cables de alimentación. Será necesario entonces tomar el valor nominal inmediato superior a la cifra obtenida.

**CARGAS NORMALES PARA TRANSFORMADORES DE CORRIENTE  
SEGUN NORMAS ANSI**

Designación de la carga	CARACTERISTICAS		CARACTERISTICAS PARA 60 HZ Y CORRIENTE SECUNDARIA DE 5 AMPS.		
	Resistencia ohms	Inductancia milihenrys	Impedancia ohms	Voltamperes	Factor de Potencia
BO.1	0.09	0.116	0.1	2.5	0.9
BO.2	0.18	0.232	0.2	5.0	0.9
BO.5	0.45	0.580	0.5	12.5	0.9
B1.0	0.5	2.3	1.0	25.0	0.5
B2.0	1.0	4.6	2.0	50.0	0.5
B4	2.0	9.2	4.0	100.0	0.5
B8	4.0	18.4	8.0	200.0	0.5

## Alimentación de Aparatos.

Según las condiciones particulares de cada instalación, diferentes aparatos deberán estar alimentados por los transformadores de corriente.

En el momento de seleccionar un transformador de corriente es necesario definir los elementos que tendrán como función la medición y aquellos que tendrán como función la protección en el conjunto que se estudia.

## Clases de Precisión.

Las clases de precisión normales son: 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.6, 1.2, y 5, dependiendo de las normas usadas.

La clase de precisión se designa por el error máximo admisible en por ciento que el transformador puede introducir en la medición, operando con su corriente nominal primaria y a frecuencia nominal. (Normas CEI, VDE, BSS, etc.).

Las normas ANSI definen la clase de precisión como el error máximo admisible en por ciento que el transformador puede introducir en la medición de potencia.

Cada clase de precisión especificada deberá asociarse con una ó varias cargas nominales de precisión.

**CONSUMOS PROPIOS DE LOS APARATOS ALIMENTADOS  
POR TRANSFORMADORES DE CORRIENTE A 50 HZ**

Aparatos	Modelo	Consumo en VA para la intensidad nominal.
Watthorímetros		0.5 a 1.5
Wattmetros de tablero	A inducción	1.5 a 3.0
	Electrodinámico	4.0 a 5.0
Wattmetros registradores	A inducción	1.5 a 2.0
	Electrodinámico	6.0 a 8.0
Wattmetros portátiles	Electrodinámico	1.0 a 4.0
Wattmetros de laboratorio		1.5 a 3.0
Medidores de defasaje		6.0 a 16.0
Fasómetros		10.0 a 18.0
Relevadores	De corriente máx. con atraso independiente	3.0 a 10.0
	Relevadores especiales de corriente máx., con atraso independiente.	15.0 a 25.0
	De máxima instantánea.	1.0 a 10.0
	Direccional	1.5 a 10.0
Relevadores	Diferencial compensado	1.6 a 10.0
	Diferencial	3.0 a 12.0
	A mínima impedancia.	0.5 a 2.0

TABLA DE CLASES DE PRECISION RECOMENDADAS SEGUN EL USO  
A QUE SE DESTINA EL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE.

Clase	Utilización
0.1	Calibración y medidas de laboratorio.
0.2-0.3	Medidas de laboratorio, alimentación - de wathorímetros para alimentadores - de gran potencia.
0.5-0.6	Alimentación de wathorímetros para - facturación en circuitos de distribu- - ción, wathorímetros industriales.
1.2	<p>Ampermetros indicadores.  Ampermetros registradores.  Fasómetros indicadores.  Fasómetros registradores.  Wathorímetros indicadores.  Wathorímetros industriales.  Wathorímetros registradores.  Protecciones diferenciales.  Relevadores de impedancia y de distan-  cia.</p>
3-5	Protecciones en general (relevadores - de sobrecorriente).

## Precisión para protección.

Las normas ANSI hacen la siguiente clasificación para protección:

1. - Clase C
2. - Clase T

La primera, cubre a todos los transformadores que tienen los devanados uniformemente distribuidos y por lo tanto, el flujo de dispersión en el núcleo no tiene efecto apreciable en el error de relación. La relación de transformación en ellos puede ser calculada por métodos analíticos.

La segunda, cubre a todos los transformadores que tienen los devanados no distribuidos de manera uniforme y por tanto, el flujo de dispersión en el núcleo tiene un efecto apreciable en el error de relación. La relación de transformación en los mismos debe ser determinada por prueba.

Ambas clasificaciones deben ser complementadas por la tensión nominal secundaria que el transformador puede suministrar a una carga normal a 20 veces la corriente nominal secundaria, sin exceder en 10% el error de relación. Este error, además deberá estar limitado al 10% a cualquier corriente entre 1 y 20 veces la corriente nominal, y a cualquier carga inferior a la nominal.

Capacidad de resistencia de los transformadores de corriente a los corto circuitos.

Debido a que los transformadores de corriente van conectados en serie con las líneas de alimentación, éstos están sujetos a las mismas sobretensiones y sobrecorrientes que las líneas.

Estas sobrecorrientes, provocadas generalmente por corto circui -

tos, no son solamente función de la potencia tomada por un alimentador, sino que dependen de la potencia de la central o del sistema y de la impedancia de los circuitos que se encuentran entre las fuentes de energía y el lugar de la falla.

La resistencia de los transformadores de corriente a los corto circuitos, está determinada por las corrientes límites térmica y dinámica, definidas por las normas ANSI como:

a). - La corriente límite térmica es el valor eficaz de la corriente primaria más grande que el transformador de corriente pueda soportar por efecto Joule durante un segundo, sin sufrir deterioros y teniendo el circuito secundario en corto circuito. Esta corriente límite térmica se expresa en Kiloamperes eficaces, ó "n" veces la corriente nominal primaria.

b). - La corriente límite dinámica es el valor de cresta de la primera amplitud de corriente que un transformador puede soportar por efectos mecánicos, sin sufrir deterioros y teniendo su circuito secundario en corto circuito. Su amplitud se expresa en Kiloamperes (cresta).

## TRANSFORMADORES DE POTENCIAL

### Conexión.

Los transformadores de potencial van conectados ya sea entre fases, ó bien entre fase y tierra.

La conexión entre fase y tierra se emplea normalmente con grupos de tres transformadores monofásicos conectados en estrella:

1o. Cuando se trata de subestaciones con tensiones de 45 KV ó su -

periores.

20. Cuando se desea medir la tensión y la potencia de cada una de las fases por separado.

30. Para alimentar algún indicador de tierra.

40. Cuando el número de Voltamperes suministrados por dos transformadores de potencial es insuficiente.

Tensión nominal de servicio.

Se escoge generalmente, la tensión nominal de aislamiento en KV - superior y más próxima a la tensión de servicio.

Tensión nominal secundaria.

La tensión nominal secundaria según ANSI, es de 120 volts para los transformadores de tensión nominal de servicio hasta 25 KV y de 115 volts para aquéllos de 34.5 KV ó más. En transformadores conectados entre fase y tierra, es normal también una tensión secundaria de 115/1.73 volts.

Los transformadores de potencial son construídos en la generalidad de los casos con un sólo bobinado secundario que alimenta los aparatos de medición y protección. Se proveen normalmente dos bobinados secundarios en el caso de que se deseé alimentar relevadores de tierra.

Potencia nominal.

Para escoger la potencia nominal de un transformador de tensión, - se hace generalmente la suma de las potencias nominales de todos los apa-

ratos conectados al secundario. Se tienen en cuenta por otro lado, las caídas de tensión en las líneas si las distancias entre los transformadores y los instrumentos de medición son importantes. Se escoge la potencia normal inmediata superior a la suma de las potencias.

#### Clase de precisión.

Las clases de precisión normales para los transformadores de potencial son: 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.6, 1.2, 3 y 5 dependiendo de las normas usadas.

**CARGAS NORMALES PARA TRANSFORMADORES  
DE POTENCIAL SEGUN NORMAS ANSI**

CARGAS NORMALES			CARACTERISTICAS EN BASE A 120 V. y 60 HZ.			CARACTERISTICAS EN BASE A 69.3 V. Y 60 HZ.		
DESIG.	V. A.	f. p.	R:ohms	L:hys	Z:ohms	R:ohms	L:hys	Z:ohms
W	12.5	0.10	115.2	3.0420	1154	38.4	1.0140	384
X	25	0.70	403.2	1.0920	576	134.4	0.3640	192
Y	75	0.85	163.2	0.2680	192	54.4	0.0894	64
Z	200	0.85	61.2	0.1010	72	20.4	0.0336	24
ZZ	400	0.85	30.6	0.0554	36	10.2	0.0168	12

TABLA DE CLASES DE PRECISION RECOMENDADAS SEGUN EL USO  
A QUE SE DESTINA EL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE.

Clase	Utilización
0.1	Calibración.
0.2-0.3	Mediciones en laboratorio, alimentación de integradores (wathorímetros) para sistemas de gran potencia.
0.5-0.6	Instrumentos de medición e integradores.
1.2-3-5	Vóltmetros de tableros. Vóltmetros registradores. Wattmetros de tableros. Wathorímetros. Frecuencímetros de tableros. Sincronoscopios. Reguladores de tensión. Relevadores de protección, etc.

**TABLA DE CONSUMO APROXIMADO DE LOS APARATOS CONECTADOS  
A LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIAL.**

Aparatos	Consumo aprox. en VA.
<b>Vóltmetros:</b>	
Indicadores	3.5 - 15
Registradores	15 - 25
<b>Wattmetros:</b>	
Indicadores	6 - 10
Registradores	5 - 12
<b>Medidores de fase:</b>	
Indicadores	7 - 20
Registradores	15 - 20
<b>Wathorímetros</b>	3 - 15
<b>Frecuencímetros:</b>	
Indicadores	1 - 15
Registradores	7 - 15
<b>Relevadores de tensión</b>	10 - 15
<b>Relevadores selectivos</b>	2 - 10
<b>Relevadores direccionales</b>	25 - 40
<b>Sincronoscopios</b>	6 - 25
<b>Reguladores de tensión</b>	30 - 250

## DATOS CARACTERISTICOS PARA LA SELECCION DE LOS INSTRUMENTOS ELECTRODINAMICOS.

Para la selección óptima de los instrumentos, es indispensable que se proporcione al fabricante de los mismos los datos indicados a continuación:

Medición por realizar en circuitos.

- a). - Monofásicos alternos.
- b). - Trifásicos equilibrados con tres conductores.
- c). - Trifásicos desequilibrados con tres conductores.
- d). - Trifásicos desequilibrados con cuatro conductores.

Circuitos de tensión.

- a). - Conexión directa: generalmente hasta 600 volts.
- b). - Arriba de 600 volts solamente por medio de transformador de potencial.
- c). - En los circuitos trifásicos, hay que mencionar la tensión entre las fases inclusive en los circuitos trifásicos con neutro.
- d). - Al emplear transformador de potencial, hay que mencionar su relación de transformación, su tensión en el primario y la tensión del secundario la cual será conectada con el instrumento.

Circuito de corriente.

- a). - Conexión directa a 5 Amperes.
- b). - Arriba de 5 Amperes, solamente a través de transformador -

de corriente, debiéndose indicar su relación de transformación y sus corrientes nominales en el primario y en el secundario (5 Amperes).

Punto Cero.

Generalmente se encuentra en el comienzo de la escala.

Cálculo de las Escalas.

Se obtiene la potencia empleando las fórmulas siguientes:

$$\text{Potencia Activa Monofásica} == V \times I \times \text{Cos } \varnothing$$

$$\text{Potencia Activa Trifásica} == \sqrt{3} \times V \times I \times \text{Cos } \varnothing$$

$$\text{Potencia Reactiva Monofásica} == V \times I \times \text{Sen } \varnothing$$

$$\text{Potencia Reactiva Trifásica} == \sqrt{3} \times V \times I \times \text{Sen } \varnothing$$

Los valores arriba obtenidos corresponden a la potencia máxima del circuito, considerándose las tensiones y corrientes en sus valores nominales y el factor de potencia en su valor admitido.

Sin embargo, no existen en la realidad las condiciones nominales y por esto para calcular el valor final de la escala, se emplea un factor de nominado "FACTOR DE COMPARACION" (F. C.), que puede calcularse de la siguiente manera:

-Circuito Monofásico:

$$\text{F. C.} = \frac{\text{Valor final de la escala deseada}}{V \times I}$$

-Circuito Trifásico:

$$F.C. = \frac{\text{Valor final de la escala deseada}}{\sqrt{3} \times V \times I}$$

El Factor de Comparación debe ser superior a 0.5 e inferior a 1.2 con el fin de no sobrecargar el instrumento.

Sobrecarga.

Los instrumentos electrodinámicos generalmente están contruidos para soportar una sobrecarga permanente del 20% en el circuito de corriente sin sufrir daños.

Variación en la indicación debida a la frecuencia.

Los wattmetros, varmetros e indicadores de factor de potencia trifásicos pueden trabajar dentro de la escala de 15 a 100 HZ sin que la variación en la indicación exceda la clase de exactitud. En los varmetros e indicadores de factor de potencia monofásicos, deberá especificarse la frecuencia de trabajo ( 60 HZ. ).

La posición vertical de las soleras es la forma más eficiente para la conducción de corriente, tanto alterna como directa debido a su mejor ventilación, ya sea que se usen una sola ó en grupos de soleras separadas entre sí cierto espacio para dejar circular el aire y mejorar la ventilación.

Cuando varias soleras se agrupan en forma laminar, la eficiencia de conducción de corriente por unidad de sección transversal es menor que cuando se usa una solera.

Al conducir corriente directa en grupos de soleras y debido al poco espacio que hay entre ellas, su conducción de calor disminuye, lo que hace que las soleras del centro se calienten más, bajando la eficiencia de conducción de corriente.

En corriente alterna el efecto es al contrario, ya que debido al efecto superficial que origina mayor densidad de corriente en la periferia del conductor, ocasiona que en un conductor formado por más de 6 soleras, la capacidad de conducción del grupo ya no aumenta en la misma proporción que al aumentar el número de soleras.

### Cuchillas.

Las cuchillas ó seccionadores son elementos que nos sirven para — aislar ó separar la energía eléctrica en diversas partes de una instalación para realizar trabajos, revisiones, y principalmente para la realización de pruebas y mediciones.

Las cuchillas deberán trabajar bajo tensión pero sin carga, ya que el arco que se produce con la apertura bajo carga daña considerablemente las superficies de contacto de éstas.

## CAPITULO TRES

### BARRAS COLECTORAS Y CUCHILLAS

**Barras colectoras.** - Entendemos por barras colectoras al conjunto de conductores eléctricos que se utilizan como conexión común de los diferentes circuitos de que consta una subestación.

Los circuitos que se conectan ó derivan de las barras pueden ser: - generadores, líneas de transmisión, bancos de transformadores, bancos de tierra, etc.

En una subestación se pueden tener uno ó varios juegos de barras - que agrupen diferentes circuitos en uno ó varios niveles de voltaje, dependiendo del diseño de la subestación.

Las barras colectoras están formadas principalmente de los siguientes elementos:

a). - Conductores eléctricos.

b). - Aisladores: sirven de elemento aislante eléctrico y de soporte mecánico del conductor.

c). - Conectores y herrajes: sirven para unir un tramo de conductor con el siguiente y para sujetar el conductor al aislador.

El diseño propio de las barras colectoras, implica la selección apropiada de lo siguiente: material del conductor, tipo y forma del mismo, selección de los aisladores y sus accesorios, así como la selección de las distancias entre apoyos y entre fases. El diseño se hace en base a los esfuerzos estáticos y dinámicos a que estarán sometidas las barras, a las necesidades

dades de conducción de corrientes, a las disposiciones físicas, etc. La selección final de las barras se hace atendiendo a aspectos económicos, materiales existentes en el mercado y normas establecidas.

El elemento principal de que se componen las barras colectoras es el conductor eléctrico que llamaremos barra. Cada juego de barras consta de tantos conductores como fases tenga el circuito, ya sea de corriente alterna ó de corriente directa.

#### Tipos de Barras.

Los tipos de barras normalmente usados son los siguientes:

a). - Cables. - El cable es un conductor formado por un haz de alambres trenzados en forma helicoidal, siendo el tipo más usado. Se han usado conductores de un solo alambre en subestaciones de pequeña capacidad.

Las principales ventajas del uso de cable son las siguientes:

1. - Es el más económico de los tres tipos.
2. - Se logra tener claros más grandes.

Sus desventajas son:

1. - Se tienen mayores pérdidas por efecto corona.
2. - Se tienen mayores pérdidas por efecto superficial.

Los materiales más usados para cables son el cobre y el aluminio reforzado con acero (ACSR). Este último tiene alta resistencia mecánica, buena conductividad eléctrica y bajo peso.

b). - Tubos. - Las barras colectoras tubulares se usan principalmente para llevar grandes cantidades de corriente, especialmente en subesta--

ciones de bajo perfil como las instaladas en zonas urbanas.

El uso de tubo en subestaciones compactas resulta más económico - que el uso de otro tipo de barra. En subestaciones con tensiones muy altas, reduce el área necesaria para su instalación además de que requiere estructuras más ligeras. Los materiales más usados para tubos son el cobre y el aluminio.

Las principales ventajas del uso de tubo son las siguientes:

1. - Tiene igual resistencia a la deformación en todos los planos.
2. - Reduce el número de soportes necesarios debido a su rigidez.
3. - Facilidad de unión entre dos tramos de tubo.
4. - Reduce las pérdidas por efecto corona.
5. - Tiene capacidades de conducción de corrientes relativamente --

grandes por área.

Sus desventajas son:

1. - Alto costo del tubo en comparación con los otros tipos de barras.
2. - Requiere un gran número de juntas de unión debido a las longitudes relativamente cortas con que se fabrican los tramos de tubo.

La selección del tamaño y peso de los tubos está hecha en base a la capacidad de conducción de corriente y de su deflexión. Generalmente el -- factor determinante en el diseño de barras tubulares es la deflexión. En la mayoría de los casos se usan diámetros mayores que los necesarios para -- la conducción de corriente, obteniéndose así un aumento en la longitud de - los claros y por lo tanto una reducción en el número de soportes, disminuyendo además las pérdidas por efecto corona.

Ventajas del tubo de aluminio sobre el de cobre:

1. - Mayor capacidad de corriente en igualdad de peso.
2. - A igual conductividad el costo del tubo de aluminio es menor que el de cobre.
3. - Requiere estructuras más ligeras.

Desventajas del tubo de aluminio sobre el de cobre:

1. - Mayor volúmen del tubo a igual conductividad.
2. - Los conectores son más costosos.
- c). - Barras de solera. - La forma de barra más comúnmente usada para llevar grandes cantidades de corriente (especialmente en interiores) es la solera de cobre ó de aluminio.

Las principales ventajas del uso de soleras son las siguientes:

1. - Es relativamente más económica que el tubo.
2. - Es superior eléctricamente para la conducción de corriente directa.
3. - Tiene excelente ventilación debido a la mayor superficie de radiación en comparación con su sección transversal, especialmente en posición vertical.

Sus principales desventajas son:

1. - Baja resistencia mecánica al pandeo debido a los esfuerzos de corto circuito.
2. - Mayores pérdidas por efecto superficial y de proximidad cuando se conduce corriente alterna.
3. - Requieren de un número mayor de aisladores soporte.

La celda de cuchillas de prueba, contendrá tres juegos de cuchillas trifásicas ó tripolares de operación en grupo y sin carga por medio de un accionamiento mecánico, el cuál contendrá ó contará con un seguro para protección.

Las cuchillas de prueba se escogen de acuerdo con la tensión a la que trabajarán y para un servicio a la intemperie ó bajo techo.

Así mismo, las cuchillas deberán estar mecánica y térmicamente capacitadas para resistir el valor de corto circuito máximo.

El reglamento establece que para tensiones de 6 KV y capacidades menores de 200 KVA, se pueden emplear los seccionadores ó cuchillas para interrumpir el circuito con carga.

Establece también, que los contactos de los seccionadores estarán dimensionados para la intensidad máxima del circuito y como mínimo para 200 Amperes. Su calentamiento no deberá exceder de 30°C sobre la temperatura ambiente con el 100% de su carga nominal.

## CAPITULO CUATRO

### APARTARRAYOS

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

Con el circuito eléctrico al cual protege en condiciones normales, el apartarrayos que está conectado entre fase y tierra, debe comportarse como un aislador. Al aplicarle un sobrevoltaje de una magnitud determinada, el apartarrayos debe convertirse en conductor, y al desaparecer este, el apartarrayos debe convertirse de nuevo en aislador, interrumpiendo la corriente que se ha establecido a través de él.

Apartarrayos autovalvulares.

Actualmente el tipo de apartarrayos universalmente usado en los sistemas eléctricos de potencia es el conocido como apartarrayos autovalvular, formado por una serie de explosores conectados en serie con discos hechos de una mezcla de carburo de silicio y un aglutinante, moldeados a presión y cocidos, que constituyen el elemento valvular del apartarrayos. Estos discos se comportan como una resistencia variable, tal que para voltajes bajos su resistencia es muy alta y para voltajes altos su resistencia es baja.

Todos estos elementos están protegidos por una cubierta de porcelana que permite instalar el apartarrayos a la intemperie.

#### Funcionamiento del apartarrayos autovalvular.

En el lugar de un sistema eléctrico en el que se desea limitar la magnitud de los sobrevoltajes se instalan tres apartarrayos, cada uno conectado de un lado a una de las fases del sistema y del otro lado a tierra. El apartarrayos debe comportarse como un aislador, no sólo cuando tiene aplicado el voltaje normal de fase a tierra, sino también para los mayores sobrevoltajes de baja frecuencia que puedan producirse en ese punto del sistema, los cuales se presentan en caso de una falla monofásica ó bifásica a tierra. En las fases no afectadas por el corto circuito, esta condición es sumamente importante y condiciona la elección del apartarrayos, ya que estos aparatos tienen una capacidad térmica limitada que les permite descargar las corrientes de duración muy corta debidas a sobrevoltajes producidos por descargas atmosféricas y las corrientes debidas a sobrevoltajes de alta frecuencia debidos a la operación de interruptores que tienen duraciones del orden de 1000 microsegundos, pero no tienen capacidad térmica suficiente para descargar corriente de baja frecuencia de duración relativamente larga.

Cuando se le aplica al apartarrayos un sobrevoltaje transitorio de magnitud suficientemente alta para producir el cebado ó flamco de los explosores, el apartarrayos se convierte en conductor y la energía asociada con la onda de sobrevoltaje transitorio se descarga a tierra a través de los

discos de material cerámico que constituyen al elemento valvular. Estos discos presentan una resistencia baja al paso de la corriente cuando el voltaje aplicado es alto. Esta resistencia va aumentando a medida que el voltaje aplicado disminuye, lo que limita la corriente de baja frecuencia que circula por el apartarrayos al convertirse éste en un conductor, a un valor tal que el arco eléctrico entre los explosores se extinga definitivamente al primer paso de la corriente de baja frecuencia por cero y el apartarrayos vuelva a comportarse como un aislador.

Como puede verse la característica de resistencia variable del elemento valvular tiene una gran importancia en el comportamiento del apartarrayos, tanto para interrumpir la corriente de baja frecuencia que tiende a circular por el apartarrayos al convertirse este en conductor, como para limitar la magnitud de la caída de voltaje a través del apartarrayos durante el período de descarga.

La característica eléctrica del material cerámico que constituye al elemento valvular, está dada por la siguiente expresión:

$$I^a R = C$$

donde:

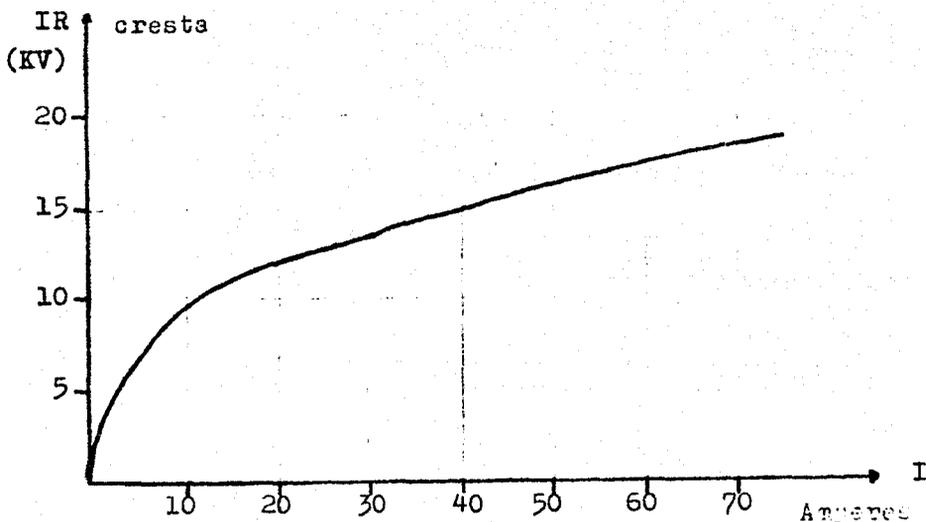
R: resistencia variable del elemento valvular

I: corriente que circula por el apartarrayos

a y C: constantes.

Si el valor de "a" fuese igual a uno, la caída de voltaje a través del apartarrayos sería constante, ya que la resistencia variaría en proporción inversa a la corriente. En la práctica el valor de "a" es del orden de 0.83,

lo que significa que la caída de voltaje a través del apartarrayos está dada por el producto  $IR$ ; aumenta ligeramente al aumentar la corriente, como puede verse en la siguiente figura.



El comportamiento de un apartarrayos queda definido por los siguientes valores:

1. - Voltaje de cebado ó de flameo: magnitud de voltaje que causa el cebado de los explosores y por lo tanto la descarga a través del apartarrayos. Este voltaje depende de la forma de onda aplicada.

2. - Voltaje de descebado ó de corte: después de que el sobrevoltaje ha sido eliminado, el apartarrayos debe ser capaz de interrumpir la corriente de baja frecuencia al primer paso por cero y recobrar su condición de aislador. El voltaje de descebado ó de corte es el valor eficaz del máximo-

voltaje de baja frecuencia (50 ó 60 Hz) aplicado al apartarrayos para el cual éste puede interrumpir la corriente y mantenerse en un estado no conductor.

El voltaje de descebado es generalmente igual al voltaje nominal del apartarrayos, aunque algunos apartarrayos de diseño reciente tienen un voltaje de descebado mayor que su voltaje nominal.

3. - Voltaje máximo de descarga: el voltaje de descarga del apartarrayos, ó sea la caída de voltaje  $IR$  producida por la circulación de corriente a través del apartarrayos, depende de la forma de onda de la corriente - y de la magnitud de la corriente.

La corriente de descarga a través del apartarrayos no depende sólo de las características del apartarrayos sino también de las características del sistema al que está conectado.

4. - Capacidad de descarga: un apartarrayos debe tener la capacidad térmica suficiente para descargar los distintos tipos de corrientes que pueden llegar a circular por él.

Se definen los siguientes tres valores de capacidad de descarga para los cuales se han normalizado las pruebas correspondientes:

a). - Capacidad de descarga de corriente de gran intensidad y corta duración. - Esta condición corresponde a la descarga de corrientes debidas a descargas atmosféricas. En la prueba normalizada se considera una onda de corriente  $(4 \text{ a } 8) \times (10 \text{ a } 20)$  microsegundos y se define ésta capacidad de descarga como el valor de cresta en amperes, de la mayor corriente que - debe poder descargar el apartarrayos.

b). - Capacidad de descarga de corriente de baja intensidad y larga-

duración. - Esta condición corresponde a descargas debidas a transitorios producidos por la conexión ó desconexión de circuitos. La prueba normalizada especifica que el apartarrayos debe poder soportar 20 descargas de ondas de corriente rectangulares de 2000 microsegundos de duración y de un valor de cresta determinado.

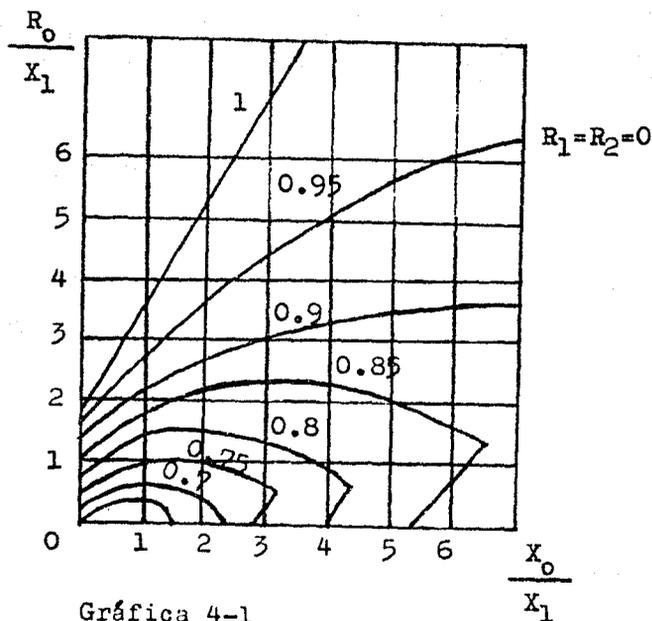
Una manera más adecuada de definir la capacidad del apartarrayos para este tipo de descargas es, especificando la longitud de línea de un voltaje determinado que puede descargar el apartarrayos.

c). - Capacidad del apartarrayos para un ciclo de descargas sucesivas. - La prueba normalizada que define ésta capacidad, especifica que el apartarrayos debe soportar durante un ciclo de trabajo consistente en 20 - descargas sucesivas de ondas de corriente de 8 x 20 microsegundos de un valor de cresta determinado.

Selección de los apartarrayos.

El punto de partida para la selección de los apartarrayos es la determinación del máximo sobrevoltaje de baja frecuencia que puede presentarse en el punto del sistema en el que van a instalarse los apartarrayos. En efecto, el voltaje de descebado de los apartarrayos debe ser siempre superior al máximo sobrevoltaje de baja frecuencia al que pueda quedar sometido el apartarrayos; si no fuese así, el apartarrayos no podría interrumpir la corriente de baja frecuencia que tiende a circular por él una vez que se ha -- convertido en conductor debido a un sobrevoltaje transitorio de suficiente - magnitud. La capacidad térmica de un apartarrayos es limitada, suficiente

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



Los sobrevoltajes de baja frecuencia de mayor magnitud que pueden presentarse en un sistema se deben, en la mayor parte de los casos, a cortocircuitos monofásicos a tierra que producen una elevación de voltaje en las fases que no han fallado. La magnitud de éstos sobrevoltajes depende de las características del sistema y especialmente de la forma en que estén conectados los neutros de los transformadores y generadores.

Los dos parámetros principales que definen la magnitud de éstos sobrevoltajes son las relaciones:

$$\frac{X_0}{X_1} \quad \text{y} \quad \frac{R_0}{X_1}$$

donde:

$X_1$ : reactancia positiva del sistema vista desde el punto considerado.

$X_0$ : reactancia de secuencia cero.

$R_0$ : resistencia de secuencia cero.

En la gráfica 4-1 se muestra la magnitud de los sobrevoltajes a tierra durante un cortocircuito monofásico a tierra, expresada en por unidad con respecto al voltaje entre hilos existente antes de ocurrir la falla, en función de  $X_0/X_1$  y  $R_0/X_1$ . Partiendo del conocimiento de estos voltajes, ó lo que es equivalente, del valor de las relaciones  $X_0/X_1$  y  $R_0/X_1$  pueden seleccionarse los apartarrayos como se indica a continuación.

Los sistemas eléctricos se clasifican desde el punto de vista de la forma de conectar los neutros y en función de las relaciones  $X_0/X_1$  y  $R_0/X_1$  en cinco grupos: A, B, C, D, E como se muestra en la tabla 4-1.

Los sistemas de los tipos A y B son sistemas con los neutros conectados directamente a tierra y en los que se verifica que:

$$0 < \frac{X_0}{X_1} < 3 \quad \text{y} \quad 0 < \frac{R_0}{X_1} < 3$$

Como puede verse en la gráfica 4-1 los sobrevoltajes de baja frecuencia que pueden producirse en éstos sistemas a causa de una falla monofásica

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

Tabla 4-1

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

Los sistemas tipo A corresponden a sistemas de distribución con transformadores conectados en estrella y con los neutros conectados directamente a tierra. En ellos se verifica que:

$$0 < \frac{X_o}{X_1} < 3 \quad \text{y} \quad 0 < \frac{R_o}{X_1} < 1$$

De acuerdo con las curvas de la gráfica 4-1 para este tipo de sistemas pueden usarse apartarrayos cuyo voltaje nominal sea el 75% del voltaje máximo de operación entre hilos.

Los sistemas del tipo B son aquellos en los que la relación  $X_o/X_1$  es positiva e igual ó menor que 3 y la relación  $R_o/X_1$  es igual ó menor que 1 en cualquier punto del sistema y corresponden a lo que se llama sistemas efectivamente conectados a tierra.

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

$$\frac{X_o}{X_1} > 3 \quad \text{ó} \quad \frac{R_o}{X_1} > 1$$

Generalmente corresponden a sistemas con el neutro conectado a tierra a través de una impedancia. De acuerdo con la gráfica de la figura 4-1, los sobrevoltajes debidos a fallas monofásicas a tierra pueden llegar a alcanzar valores del 100% del voltaje entre hilos y aún algo mayores. -- Las curvas de la gráfica 4-1 se han trazado suponiendo  $R_1 = R_2 = 0$ . Para valores de  $R_1$  y  $R_2$  distintos de cero, los sobrevoltajes de baja frecuencia son ligeramente inferiores a los indicados, por lo que éste tipo de sistema puede usar apartarrayos cuyo voltaje nominal sea igual al 100% del voltaje máximo de operación entre hilos.

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

$$-\infty < \frac{X_0}{X_1} < -40$$

Los sistemas del tipo E, son sistemas con el neutro aislado y en los que se verifica que:

$$-40 < \frac{X_0}{X_1} < 0$$

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

## CAPITULO CINCO

### INTERRUPTORES

#### SELECCION DE UN INTERRUPTOR.

Para definir a un interruptor de los que se utilizan en subestaciones industriales, deben especificarse las siguientes características:

- a). - Tensión nominal.
- b). - Corriente nominal ó corriente de carga máxima prevista.
- c). - Capacidad interruptiva.
- d). - Medio en que interrumpe.
- e). - Tensiones y tipo de corriente (c. a. ó c. d.) de control para - - circuitos de cierre y apertura, motores, etc.
- f). - Relación de transformación de transformadores de corriente.
- g). - Tipo y calibre del conductor con el cual se conectará el interruptor al sistema.
- h). - Equipo especial.
- i). - Condiciones de servicio especiales.

El interruptor de alta tensión asume las funciones de los tres primeros incisos enunciados. Para ejecutarlas debidamente debe escogerse para la tensión correcta, la corriente de carga máxima y para la corriente de corto circuito máxima posible, previamente determinada para el punto de su instalación.

La habilidad de interrumpir una corriente de corto circuito, comúnmente llamada "capacidad interruptiva" (C.I.) se expresa en millones de -

volt amperes (MVA) ó en miles de volt amperes (KVA). De acuerdo con las normas ASA se calcula la capacidad interruptiva multiplicando la corriente máxima que el interruptor es capaz de interrumpir por la tensión nominal del mismo y por raíz de tres para un sistema trifásico.

La corriente máxima que es capaz de interrumpir debe ser igual ó mayor que la corriente de corto circuito máxima esperada para el punto de su instalación. Por el medio en que se extingue el arco dentro de los interruptores, éstos se clasifican en:

- Interruptores en aceite.
- Interruptores en aire.
- Interruptores en gas.
- Interruptores en vacío.

En los diseños modernos y para lograr altas capacidades interruptivas, el aceite, aire ó gas se proyectan ya sea longitudinalmente ó transversalmente contra el arco. En interruptores en aire de tensiones intermedias (2.4 hasta 13.8 KV) se alarga el arco mediante la aplicación de un campo magnético. Esto favorece su rápido enfriamiento en las cámaras de arco y finalmente su extinción.

Comparando a grandes rasgos los interruptores que utilizan diferentes medios de extinción puede decirse:

Los de aceite son de construcción robusta y han probado su confiabilidad por muchos años. Su operación y mantenimiento son sencillos. Sus ventajas son su peso, su volúmen y su relativa lentitud. Los de poco volúmen de aceite son más livianos pero también más delicados en cuanto a su operación y mantenimiento.

Los interruptores en aire son relativamente livianos, compactos y fáciles de mantener en el rango de tensiones y capacidades interruptivas intermedias. Su construcción en los rangos de tensión y capacidad interruptiva altas es compleja. En estos rangos generalmente se utiliza en lugar de aire, hexafluoruro de azufre, que es un gas con excelentes propiedades aislantes pero costoso. Los interruptores en aire son sumamente eficaces en la extinción de arcos y el tiempo de extinción del arco es menor que el de los interruptores en aceite.

Lo más novedoso en materia de interruptores son los interruptores en vacío. Siendo el vacío perfecto el mejor aislante, la interrupción en él es la más eficaz, la que se realiza aún en menos tiempo que en los interruptores en aire y utilizando un mecanismo más sencillo. Son sumamente livianos en comparación con los demás interruptores y el mantenimiento en cuanto a contactos y cámaras de arqueo es muy sencillo.

Estos interruptores se están fabricando actualmente para 14.4 y 23 KV con una capacidad interruptiva máxima de 500 MVA en 23 KV.

Los mecanismos que operan a los interruptores varían en su diseño de un fabricante a otro. Los más sencillos son los manuales, ya que su operación depende de la habilidad de un operador. Su capacidad interruptiva es baja y en la actualidad se fabrican para servicio bajo techo únicamente. Sus elementos de disparo por sobrecarga ó cortocircuito son burdos.

Los mecanismos más sencillos que operan sin la intervención de la fuerza humana son los de solenoide. Estos son lentos y requieren de un frencuente de energía auxiliar generalmente bastante grande.

Actualmente se están popularizando cada vez más los mecanismos de energía almacenada en los cuales un motor carga a un resorte. Al recibirse la señal de cierre se descarga la energía almacenada en el resorte sobre el mecanismo el cual cierra el interruptor en forma eficiente. La potencia que consumen para su operación es pequeña y en caso necesario un operador puede fácilmente cargar al resorte sin que se afecte la velocidad de cierre. Los interruptores equipados con este tipo de mecanismo requieren poca atención, por lo cual se prestan para subestaciones en sitios aislados. Para interruptores de gran capacidad se requieren mecanismos neumáticos que son más potentes que los anteriores.

Al especificar un interruptor para una subestación, deben indicarse las tensiones de control del mecanismo, que son las que operan a los solenoides principales y auxiliares de cierre y disparo que hubiere, a los motores y a los relés auxiliares. Como fuente de energía para el disparo, se recomienda una batería para tener energía disponible en cualquier momento.

Si la energía requerida para el disparo es pequeña como en los mecanismos de resorte precomprimido, en lugar de la batería se puede usar un condensador de 400 ó 500 microfaradios (disparo por capacitor). Para el cierre también se acostumbra usar un circuito alimentado por una batería ó una fuente de corriente alterna, si se dispone de una que no se desenergiza cuando se abre el interruptor. Los mecanismos de resorte precomprimido y los neumáticos, permiten uno ó más cierres respectivamente después de fallar la alimentación a los motores, que normalmente se conectan a 220 volts de corriente alterna.

Para evitar condensaciones de humedad en el mecanismo de los interruptores de intemperie, éstos generalmente están provistos con resistencias de calefacción las cuales se alimentan a 120 ó 220 volts de corriente al terna.

Una de las ventajas de un interruptor operado electromecánicamente ó electroneumáticamente es la de poderse abrir ó cerrar automáticamente al presentarse ciertas condiciones preestablecidas, por ejemplo sobrecargas de cierto valor, fallas de la tensión en el circuito de alimentación, etc. Una ventaja no siempre debidamente reconocida es la de poder coordinar los interruptores en el lado de baja tensión con el de alta ó éste con los fusibles de respaldo para evitar disparos innecesarios.

En subestaciones grandes conviene pensar en una protección diferencial en la cual tomaría parte el interruptor, pudiendosele equipar con uno de los juegos de transformadores de corriente y con relés diferenciales.

Una solución económica en lugar de un interruptor automático, la ofrecen los interruptores ó desconectores con carga equipados con fusibles. Aunque pueden realizar alguna de las funciones de un interruptor como los descritos anteriormente, tienen serias limitaciones. La mayor de ellas es, que en caso de fundirse un fusible se puede parar toda una fábrica hasta que se le reponga. Una parada prolongada puede costar más que la diferencia entre un interruptor y un desconector con carga equipado con fusibles.

## CAPITULO SEIS

### TRANSFORMADORES

#### Selección de Transformadores.

Un transformador para una subestación se define con las siguientes características:

- a). - Capacidad
- b). - Número de fases
- c). - Medio refrigerante
- d). - Frecuencia
- e). - Tensión en el primario
- f). - Derivaciones
- g). - Tensión en el secundario
- h). - Conexión en el primario y en el secundario.
- i). - Impedancia
- j). - Sobrecalentamiento
- k). - Construcción
- l). - Accesorios especiales
- m). - Condiciones de servicio especial

La capacidad se fija generalmente en base a las necesidades requeridas del sistema en estudio. La tensión primaria y la frecuencia están dadas por el alimentador de la compañía suministradora de energía eléctrica.

Cabe mencionar en este lugar, la conveniencia de establecer qué de rivaciones se deben pedir en el primario del transformador, ya que una de sus funciones es compensar la regulación del alimentador de la compañía - suministradora de energía.

En la actualidad rara vez se utilizan transformadores monofásicos en subestaciones industriales, lo usual son transformadores trifásicos por que normalmente son muy confiables; sin embargo, los monofásicos cuando se disponen en forma tal que se puedan conectar en delta abierta, si hu biere que sacar de servicio a uno de ellos por algún desperfecto, permiten continuar el servicio a capacidad reducida. Si no se puede tolerar la pér di da de capacidad por una falla en alguno de los tres, puede tenerse un cuar to transformador de reserva. En subestaciones unitarias compactas no se utilizan los transformadores monofásicos debido a que el espacio que ocuparían sería considerable en comparación con un transformador trifásico, razón por la cual se utiliza éste último.

El medio refrigerante más usual es el aceite. Para instalaciones - bajo techo ó en aquellas donde un incendio provocado por el aceite tendríaserías consecuencias, el medio refrigerante puede ser un askarel ó sea un aceite sintético no combustible o bien el aire en los transformadores de ti po seco. En México no es obligatorio usar uno de los últimos dos medios - refrigerantes ya que el reglamento de instalaciones eléctricas sólo obliga a la instalación de un transformador en aceite en un cuarto propio con dre naje para evacuar el aceite en caso de derramarse accidentalmente. El - costo tan alto de los transformadores en askarel y aún mayor de los del ti

po seco hace que no gocen de mucha popularidad.

La tensión secundaria a la que trabajará un transformador depende de la necesidad específica de cada sistema.

Debido a que es común querer utilizar en el secundario (cuando es de baja tensión) un sistema de tres fases, cuatro hilos con neutro conectado a tierra, en el primario se usa una conexión delta. Una conexión Y - Y no es recomendable por ocasionar problemas durante la operación.

La impedancia interesa por dos razones:

- El deseo ó la necesidad de trabajar transformadores en paralelo.

Entonces las impedancias deben ser sensiblemente iguales.

- El deseo ó necesidad de limitar las corrientes de corto circuito.

En cualquier caso, pedir una impedancia específica aumenta el precio del transformador y no es económicamente justificable variar una impedancia más allá de ciertos límites.

Analizando la fórmula para calcular la corriente de corto circuito en el secundario de un transformador, se observa que esa corriente es proporcional a la capacidad en KVA del transformador, razón por la cual no conviene instalar un transformador de gran capacidad con baja tensión secundaria.

Es preferible en muchas ocasiones alimentar diferentes áreas con varios transformadores de tamaño mediano en forma independiente, puesto que se ahorra considerablemente en interruptores secundarios y en cobre de los colectores dentro de los tableros.

Según el medio refrigerante, las normas de construcción de transformadores especifican diferentes temperaturas máximas permisibles de sobrecalentamiento. Para los enfriados en aceite se reconocen 55 °C y 65 °C. El límite de 55 °C se había fijado tomando en cuenta aislamientos a base de celulosa como el algodón y el papel kraft, esta temperatura garantiza una vida larga para los transformadores considerando cierto régimen de operación.

El enemigo número uno del aislamiento de los transformadores sumergidos en aceite, es la humedad procedente del medio ambiente y que se introduce al interior del tanque por no someter al conjunto interior (núcleo y bobinas) y al aceite a un proceso de secado eficiente durante la fabricación, ó cuando el transformador está trabajando con un sellado deficiente. Hay sin embargo, una fuente de humedad muy importante dentro del transformador mismo, ésta es la celulosa que en su composición química contiene radicales dispuestos a formar agua si las condiciones son propicias. Estas condiciones las proporciona un calentamiento excesivo ya que bajo la acción del calor las moléculas de celulosa ceden algunos de sus radicales OH para formar agua ( $H_2O$ ).

Como consecuencia se deteriora la celulosa y por lo tanto el material aislante. Por otro lado la humedad dentro de un transformador también daña aunque en menor escala, a los barnices ó esmaltes cuando la temperatura excede de ciertos límites. Para reducir la formación de agua a temperaturas elevadas se someten los papeles aislantes a un tratamiento, por ejemplo a una cianoetilación. El resultado es un material con una

vida más larga a una temperatura determinada ó que ese material se pueda trabajar a una temperatura más alta con la misma vida especificada para el no tratado. En virtud de que la vida de los transformadores con materiales celulósicos no tratados y clasificados según normas NEMA y ASA de 55 °C de sobreelevación de temperatura ha probado ser satisfactoria en la práctica, a los transformadores con papel tratado se les permite trabajar a una sobreelevación de 65 °C .

Mediante modificaciones en la construcción del tanque, puede fabricarse un transformador para diferentes aplicaciones, una de ellas es la subestación tipo compacta. Se diseña en tal forma que se puedan acoplar directamente al transformador medios de desconexión, medición, interrupción y protección en el lado primario y secundario, encerrados en gabinetes metálicos. También puede preverse el acoplamiento a ductos si así se desea.

Si el usuario desea equipo especial, por ejemplo contactos de alarma, relés de protección. manovacúmetro, etc., debe indicarse oportunamente.

Las normas establecen qué accesorios debe incluir el fabricante sin que el cliente lo tenga que especificar. También establecen cuáles son las condiciones normales de trabajo y cuáles son las especiales. Son condiciones especiales las siguientes:

- Altitud mayor de 1000 metros.
- Polvo excesivo en el ambiente.
- Circulación de aire restringida.

- Temperatura ambiente promedio mayor de 30 °C ó máxima mayor de 40 °C, etc.

Las condiciones especiales deben indicarse al fabricante para ser consideradas en el diseño.

Es importante hacer notar que debe haber compatibilidad entre las normas bajo las cuales estan diseñados y construídos los diferentes aparatos que se instalan en una subestación.

Pruebas a transformadores.

Las pruebas que se realizan a los transformadores tienen como finalidad comprobar que éstos cumplen con los requisitos que señalan las normas de instalaciones eléctricas y se clasifican de la siguiente forma:

Pruebas de prototipo: Son las aplicables a nuevos diseños ó modificaciones de diseños anteriores con el propósito de verificar si el producto cumple con lo especificado.

Las pruebas de prototipo son:

- Características de los componentes.
- Medición de la resistencia óhmica de los devanados.
- Elevación de temperatura de los devanados.
- Impulso.

Pruebas de rutina: son pruebas que deben efectuarse en todos los transformadores de acuerdo con los métodos indicados por las normas para verificar si la calidad del producto se mantiene dentro de las toleran

cias permitidas.

Las pruebas de rutina son:

- Características físicas del conjunto.
- Resistencia de los aislamientos del conjunto.
- Tensión de ruptura dieléctrica del aceite.
- Relación de transformación.
- Polaridad ó secuencia de fases.
- Pérdidas de excitación.
- Corriente de excitación.
- Impedancia y pérdidas debidas a la carga.
- Potencial aplicado.
- Potencial inducido.
- Hermeticidad.
- Operación y calibración de accesorios.
- Factor de potencia del aceite.

Pruebas opcionales: Son las establecidas entre comprador y fabricante con el objeto de verificar características específicas del equipo.

Las pruebas opcionales generalmente son:

- Factor de potencia de los aislamientos del conjunto.
- Pérdidas, corriente de excitación e impedancia a tensiones, cargas ó frecuencias distintas de las nominales.
- Elevación de temperatura de los devanados

a capacidades distintas de las nominales.

- Nivel de ruido.
- Impulso.

Es importante hacer notar que para la aceptación de las pruebas de prototipo, también deben efectuarse satisfactoriamente las pruebas de rutina.

Considerando la importancia que tienen los transformadores en cualquier instalación eléctrica, se proponen a continuación ocho prácticas que consisten en pruebas a los transformadores de la subestación tipo compacta cuyo modelo se describe en el primer capítulo. Estas pruebas se proponen considerando la importancia que reviste cada una de ellas y la posibilidad de ser realizadas por los alumnos haciendo uso del equipo con que cuenta el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería.

Prácticas que se proponen:

## PRACTICA 1

### MEDICION DE LA RESISTENCIA OHMICA DE LOS DEVANADOS.

La medición de la resistencia de los devanados tiene fundamental - importancia por dos razones:

- Para el cálculo de las pérdidas  $I^2R$  de los devanados.
- Para el cálculo de la temperatura de los devanados en la prueba de temperatura.

Método del Punteo: el método del puente es aplicable en todos los - casos de medición de resistencia. Se prefiere generalmente debido a su - exactitud ya que las corrientes pequeñas con que trabaja no alteran el va - lor de resistencia por cambio de temperatura.

Para la determinación de la resistencia de los devanados del trans formador, el método del puente consiste en poner ó conectar un puente de Wheatstone entre las terminales de cada devanado obteniéndose una resis - tencia promedio de los devanados tanto del primario como del secundario.

## PRACTICA 2

### RESISTENCIA DE LOS AISLAMIENTOS

#### DEL CONJUNTO.

Esta prueba es un índice del estado de los aislamientos de los devanados en cuanto a secamiento y contaminación.

El procedimiento consiste en conectar en corto circuito con un conductor desnudo las terminales de los devanados de una misma tensión nominal. El devanado cuya resistencia se desea medir se conecta a la punta de línea del ohmetro y los demás devanados y el tanque se conectan a la terminal de tierra del ohmetro. Se aplica la tensión de operación del equipo y se obtienen las lecturas requeridas.

## PRACTICA 3

### RELACION DE TRANSFORMACION.

La relación de vueltas debe determinarse para todas las derivaciones, así como para todas las posibles conexiones de los devanados del transformador. Esta prueba debe hacerse a tensión nominal ó menor a frecuencia nominal ó mayor y sin carga.

Para la realización de esta práctica se proponen dos métodos:

- Relación de transformación por el método de los dos voltmetros.
- Relación de transformación por el método del transformador patrón.

El método de relación de transformación por el método de los dos voltmetros consiste en utilizar dos voltmetros, uno para medir la tensión del devanado de alta tensión y el otro para la del devanado de baja tensión. Se deben leer los dos voltmetros simultáneamente. Para compensar los errores de los instrumentos, se debe tomar un segundo grupo de lecturas con los voltmetros intercambiados. La relación de transformación se determina con el promedio de las lecturas.

Se deben hacer cuando menos cuatro series de pruebas con tensiones distintas que difieran aproximadamente en un 10 % .

Si las relaciones calculadas con los valores anteriores no difieren en más del 1%, el promedio de ellas es la relación de transformación; en caso contrario, las pruebas deben repetirse con otros instrumentos.

El método de la relación de transformación por el método del transformador patrón es el más conveniente para medir con precisión la rela--ción de un transformador.

El transformador que se va a probar, se excita en paralelo con un transformador patrón de la misma relación nominal y los otros dos devanados se conectan en paralelo intercalandose un voltmetro entre dos terminales de igual polaridad.

## PRACTICA 4

### POLARIDAD Y SECUENCIA DE FASES.

#### Prueba de Polaridad.

La prueba de polaridad se requiere principalmente para poder efectuar la conexión adecuada de bancos de transformadores.

Se proponen dos métodos para determinar la polaridad:

Método de Impulso Inductivo con C.D.

La polaridad del transformador se determina conectando una fuente de corriente directa de potencial adecuado para no exceder la corriente nominal del embobinado y al mismo tiempo se intercala un voltmetro de manera que se observe claramente la deflexión de la aguja.

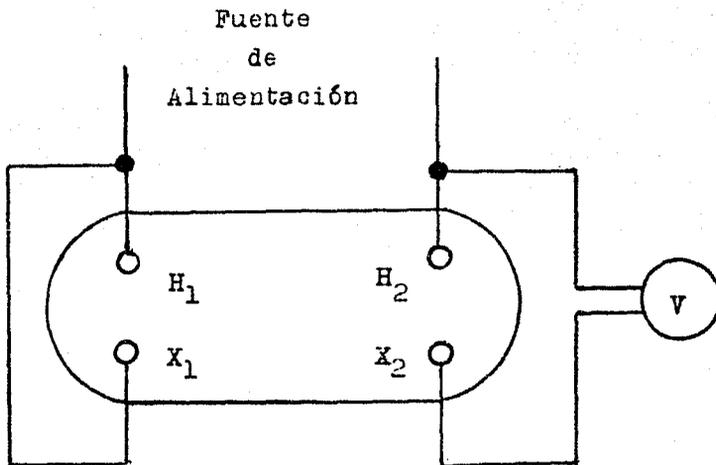
Las terminales del voltmetro se transfieren a las terminales de baja tensión sin desconectar la fuente de corriente directa, teniendo cuidado de conservar a la izquierda la terminal que estaba en esta misma posición en alta tensión y a la derecha igualmente.

Se desconecta rápidamente la fuente de C.D. del devanado de alta tensión y se observa la deflexión de la aguja del voltmetro causada por la descarga inductiva.

Si la aguja se deflexiona en el mismo sentido que en el devanado de alta tensión, la polaridad es aditiva y si se deflexiona en sentido contrario, la polaridad es sustractiva.

### Método con tensión alterna

En este método se conectan dos terminales adyacentes de alta y baja tensión y entre las otras dos terminales adyacentes se conecta un voltmetro, como se indica en la siguiente figura.



Se aplica una tensión alterna conveniente de valor conocido en el devanado de alta tensión y se lee la indicación del voltmetro.

Si la lectura del voltmetro es mayor que la tensión aplicada, la polaridad es aditiva, y si es menor, la polaridad es sustractiva.

### Prueba de secuencia de fases

Esta prueba puede efectuarse usando un indicador de secuencia de fases el cuál puede incluir un motor de inducción trifásico ó un circuito de fase dividida. La prueba de secuencia de fases en un transformador trifá-

sico se debe efectuar como sigue:

1. - Se debe conectar el indicador de secuencia de fases a las terminales de alta tensión del transformador, el cuál debe excitarse en las tres fases a una tensión trifásica apropiada para el indicador y anotandose la dirección de rotación ó la indicación del instrumento.

2. - Se transfiere el indicador al lado de baja tensión del transformador, conectando en  $X_1$ ,  $X_2$  y  $X_3$  las terminales que estaban conectadas a las terminales  $H_1$ ,  $H_2$  y  $H_3$  respectivamente.

3. - El transformador se excita de nuevo con una tensión adecuada anotando otra vez la dirección de rotación ó la indicación del instrumento.

4. - Si la indicación del instrumento es la misma en ambos casos, - la secuencia de fases del transformador es la normal.

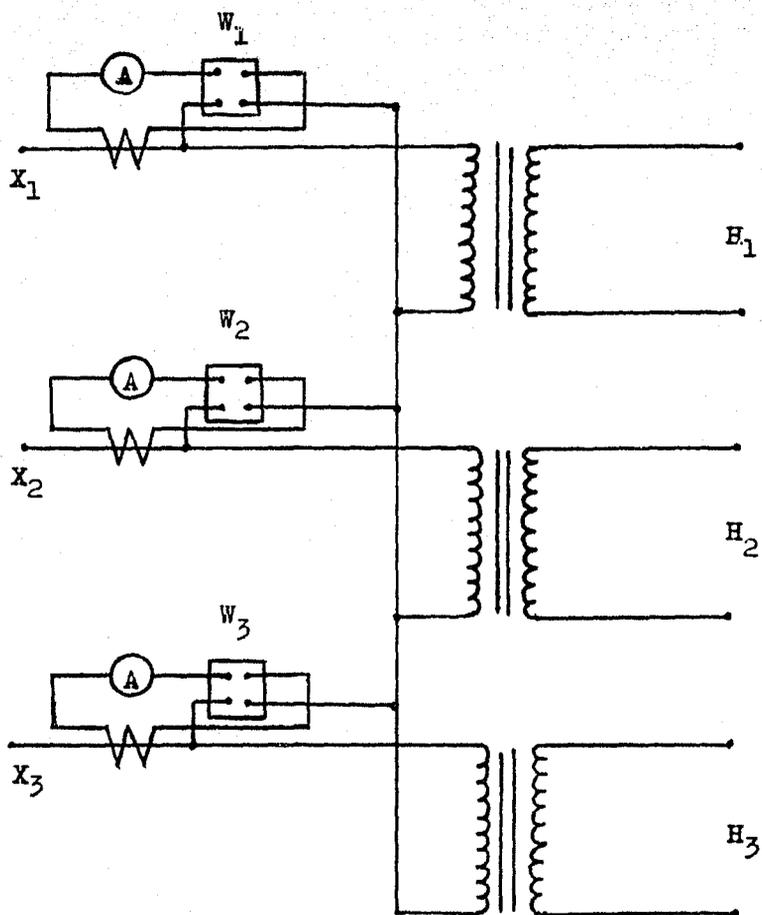
## PRACTICA 5

### PERDIDAS MAGNETICAS O DE EXCITACION.

Las pérdidas de excitación de un transformador las constituyen las pérdidas del núcleo, las cuales son una función de la magnitud, frecuencia y forma de onda de la tensión aplicada. La determinación de las pérdidas de excitación debe estar basada en una tensión de onda senoidal a menos que se especifique una forma de onda diferente.

Para la realización de esta práctica ó prueba se deberán seguir los siguientes pasos:

1. - Se deberá ajustar la tensión aplicada al transformador por el lado de baja tensión hasta igualar la nominal de placa.
2. - La frecuencia utilizada deberá ser la de placa.
3. - Se conecta un wattmetro por fase como se muestra en la figura.
4. - Se deberán tomar lecturas a los tres wattmetros teniendo el lado de alta tensión del transformador abierto durante toda la prueba. La suma de los tres valores indicados en los wattmetros serán las pérdidas magnéticas ó de excitación.



## PRACTICA 6

### MEDICION DE LA CORRIENTE DE EXCITACION.

El diagrama de conexiones para medir la corriente de excitación - es el mismo que el empleado para conocer las pérdidas de excitación, con la modificación de que en éste diagrama se deberá intercalar un ampermetro por cada fase a través de un transformador de corriente.

La medición de la corriente de excitación normalmente se hace con ampermetros de valores eficaces ya que este método de medición es razonablemente exacto cuando la forma de onda de la tensión aplicada es prácticamente senoidal.

Para conocer el valor de la corriente de excitación se suman los valores obtenidos de los tres ampermetros y se divide este valor obtenido entre tres para obtener el valor promedio, constituyendo éste valor la corriente de excitación.

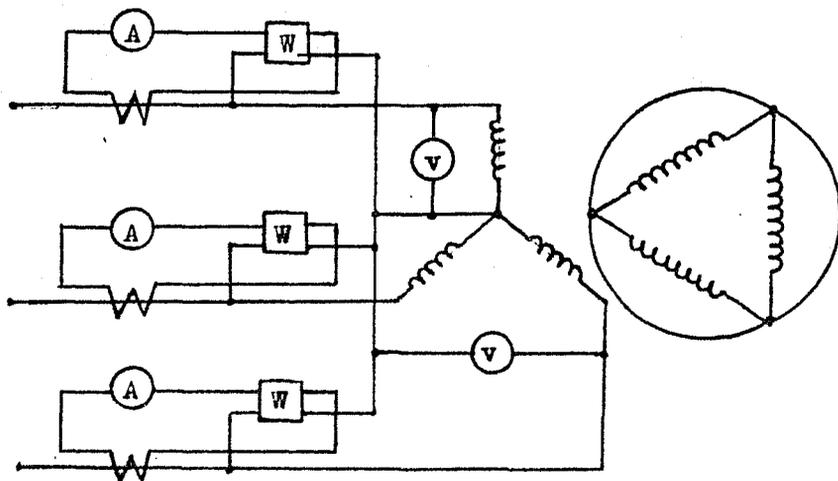
## PRACTICA 7

## PERDIDAS ELECTRICAS Y

## PORCIENTO DE IMPEDANCIA

Pérdidas Eléctricas y porcentaje de impedancia utilizando alimentación trifásica.

En este caso se ponen en corto circuito las terminales de alta tensión del transformador y en las terminales de baja tensión se aplica una tensión trifásica a frecuencia nominal de un valor tal que haga circular la corriente nominal en los devanados de baja tensión como se muestra en la figura.



La tensión de impedancia del transformador trifásico es el promedio de las tres tensiones medidas. Para obtener el valor de porcentaje de impedancia ( $\%Z$ ), se divide este valor entre el voltaje nominal del lado

donde se tomen las lecturas y se multiplica por 100.

Para la medición de las pérdidas eléctricas se puede usar el sistema de dos ó tres wattmetros tal como se describe en la práctica 5.

**Pérdidas eléctricas y porcentaje de impedancia utilizando alimentación monofásica.**

Dentro de este método podemos utilizar dos formas de realizar los cálculos; uno que consiste en conectar un devanado en delta y otro que se utiliza para cualquiera que sea la forma de conexión. Este último es el más recomendable debido a que se puede efectuar una prueba en la que no se usan las terminales de neutro, ni es necesario abrir la delta como es el caso del primero.

Para la realización de la prueba usando alimentación monofásica para cualquier forma de conexión las tres terminales de línea de un devanado se conectan en corto circuito. Se aplica una tensión monofásica a frecuencia nominal a dos de las terminales del otro devanado y se hace el ajuste necesario para que circule la corriente nominal de línea.

Se toman tres lecturas sucesivas sobre tres pares de terminales, por ejemplo  $H_1 - H_2$ ;  $H_2 - H_3$ ;  $H_1 - H_3$  y se aplican las siguientes ecuaciones:

$$\text{Pérdidas de carga} = \frac{1.5 ( P_{12} + P_{23} + P_{13} )}{3}$$

$$\text{Tensión de Impedancia} = \frac{0.866 ( E_{12} + E_{23} + E_{13} )}{3}$$

En donde P y E, son las lecturas individuales de pérdidas y tensiones de impedancia medidas.

La componente de pérdidas por corrientes parásitas de las pérdidas de carga, se obtiene restando a éstas últimas las pérdidas  $I^2R$  del transformador.

La componente de pérdidas  $I^2R$  de un transformador trifásico se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$I^2R \text{ (totales)} = 1.5 ( I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 ) \text{ WATTS.}$$

En donde:

$R_1$ : promedio de las resistencias medidas entre fases del devanado de alta tensión.

$R_2$ : promedio de las resistencias medidas entre fases del devanado de baja tensión.

$I_1$ : corriente de línea de alta tensión.

$I_2$ : corriente de línea de baja tensión.

## PRACTICA 8

### INTERCONEXION DE TRANSFORMADORES EN PARALELO Y OPERACION DE LA SUBESTACION TIPO COMPACTA

Objetivo. - Que el alumno aprenda a conectar los transformadores en paralelo y ponga en funcionamiento la subestación tipo compacta.

Para la realización de ésta práctica, el alumno deberá haber realizado las prácticas que le permitan determinar:

- Que los transformadores tienen igual relación de transformación.
- Que los transformadores tienen sensiblemente iguales sus porcentajes de impedancia.
- Que tienen la misma polaridad.
- Que tienen igual secuencia de fases.

Pasos a seguir para la realización de esta práctica:

1. - Verificar que todos los interruptores se encuentren abiertos (con esto se cumple que los dos transformadores están desconectados entre sí).

2. - Energizar la alimentación a la subestación tipo compacta por medio del interruptor que se localiza en el tablero del laboratorio.

3. - Cerrar las cuchillas desconectoras ubicadas en la parte de alta tensión de la subestación tipo compacta y verificar que ésta ha sido energizada en sus tres fases a través del voltmetro ubicado en esta misma sección.

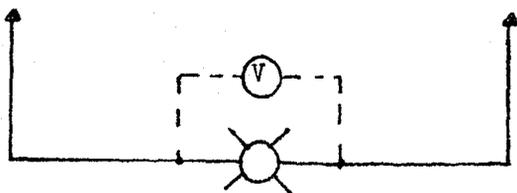
4. - Cerrar el interruptor general de alta tensión.

5. - Cerrar las cuchillas que unen a los transformadores por el lado de alta tensión (en este punto ya se encuentran energizadas las terminales de prueba de los transformadores).

6. - Conectar los transformadores en paralelo realizando primero lo siguiente:

a). - Los neutros de los transformadores se conectan entre sí uniendo a través de un cable las "terminales de prueba" marcadas como neutros.

b). - Se arma el circuito como se muestra en la figura para verificar que no existe potencial entre las terminales respectivas.



7. - Verificado el punto anterior, se cierran las cuchillas que unen a los transformadores por el lado de baja tensión quedando éstos conectados en paralelo.

8. - Se cierra el interruptor general de baja tensión quedando energizado el tablero de baja tensión quedando en disposición de dar carga a la subestación.

## CAPITULO SIETE

### RED DE TIERRA

Uno de los aspectos principales para la protección contra sobretensiones en las subestaciones es la de disponer de una red de tierra adecuada a la cual se conectan los neutros de los aparatos, los apartarrayos, las estructuras metálicas, los tanques de los aparatos y todas aquellas otras partes metálicas que deben estar a potencial de tierra.

La necesidad de contar con una red de tierra en las subestaciones es la de cumplir con las siguientes funciones:

a). - Proporcionar un circuito de muy baja impedancia para la circulación de las corrientes de tierra, ya sean debidas a una falla de aislamiento ó a la operación de un apartarrayos.

b). - Evitar que durante la circulación de estas corrientes de tierra, puedan producirse diferencias de potencial entre distintos puntos de la subestación que puedan ser peligrosas para el personal.

c). - Facilitar mediante sistemas de relevadores la eliminación de las fallas a tierra en los sistemas eléctricos.

d). - Dar mayor confiabilidad y continuidad al servicio eléctrico.

Límites de corrientes tolerables por el cuerpo humano.

La conducción de altas corrientes a tierra en instalaciones eléctricas debidas a disturbios atmosféricos ó a fallas del equipo, obliga a tomar precauciones para que los gradientes eléctricos ó las tensiones resultan -

tes no ofrezcan peligro a los operadores ó en general al personal que labora en el recinto. Intensidades del orden de miles de amperes producen gradientes de potencial elevados en la vecindad del punto ó puntos de contacto a tierra y sí además, se da la circunstancia de que algún ser viviente se apoye en dos puntos entre los cuales existe una diferencia de potencial debida al gradiente arriba indicado, puede sufrir una descarga de tal magnitud que sobrepase el límite de su engarrotamiento muscular. En tal situación la corriente que circula por su cuerpo aumenta, y sí por desgracia és ta pasa por algún órgano vital como el corazón, puede resultar en fibrilación ventricular y sobrevenir la muerte.

El umbral de percepción en el ser humano se acepta generalmente como de aproximadamente 1 miliampere. Si el camino de la corriente incluye la mano y el antebrazo, las contracciones musculares, el malestar y el dolor aumentan al crecer la corriente y bastan intensidades de unos cuantos miliamperes para evitar que el sujeto pueda soltar el electródo que es la condición de engarrotamiento antes mencionada.

Se pueden tolerar intensidades de corriente superiores sin producir fibrilación, sí la duración es muy corta. La ecuación que liga los parámetros de la intensidad de corriente tolerable y el tiempo que puede tolerarla un organismo es:

$$I_k^2 \times t = 0.027$$

De donde resulta que:

$$I_k = \frac{0.165}{t}$$

Donde:

$I_k$  : valor efectivo de la corriente que circula por el cuerpo en amperes.

$t$  : tiempo de duración del choque eléctrico en segundos.

0.027 : constante de energía derivada empíricamente.

Es necesario para una buena comprensión tomar en cuenta los diversos casos que pueden presentarse al hacer contacto con superficies a diferente potencial. Las diferencias de potencial tolerables se determinan de acuerdo con los conceptos:

- Tensión de paso.
- Tensión de contacto.
- Tensión de transferencia.

La distancia de contacto entre los pies se supone de un metro.

Disposiciones básicas de las redes de tierra.

Para las redes de tierra se han considerado básicamente tres sistemas:

- Sistema radial
- Sistema de anillo
- Sistema de red

El sistema radial es el más barato pero el menos satisfactorio ya que al producirse una falla en un aparato se generan grandes diferencias de potencial.

Este sistema consiste en uno ó varios electrodos a los cuales se conectan las derivaciones de todos los aparatos.

El sistema de anillo se obtiene colocando en forma de anillo un cable de cobre de suficiente calibre (aprox. 1000 MCM) alrededor de la superficie ocupada por el equipo de la subestación y conectando derivaciones a cada aparato usando cable más delgado (500 MCM ó 4/0 AWG). Es un sistema económico y eficiente y en él se eliminan las grandes distancias de descarga a tierra del sistema radial. Los potenciales peligrosos son disminuidos al disiparse la corriente de falla por varios caminos en paralelo.

El sistema de red es el más usado actualmente en nuestro sistema eléctrico y consiste como su nombre lo indica en una malla formada por cable de cobre (aprox. 4/0 AWG) conectado a través de electrodos de varilla de copperweld a partes más profundas para buscar zonas de menor resistividad. Este sistema es el más eficiente pero también el más caro de los tres tipos.

Elementos de la red de tierra.

Conductores. - Los conductores utilizados en sistemas de tierra son de cable de cobre de calibres arriba de 4/0 AWG dependiendo del sistema que se utilice. Se ha escogido el calibre mínimo de 4/0 AWG en cobre por razones mecánicas, ya que eléctricamente pueden usarse cables de cobre hasta del número 2 AWG. Para sistema de anillo se ha usado cable de cobre de 1000 MCM y en cambio para el sistema de malla se usa en la actualidad cable de cobre de 4/0 AWG.

Se utiliza el cobre por su mejor conductividad, tanto eléctrica como térmica y sobre todo por ser resistente a la corrosión debido a que es catódico respecto a otros materiales que pudieran estar enterrados cerca de él.

**Electrodos.** - Son las varillas que se clavan en terrenos más o menos blandos y que sirven para encontrar zonas más húmedas y por lo tanto con menor resistividad eléctrica. Son especialmente importantes en terrenos desprotegidos de vegetación y cuya superficie al quedar expuesta a los rayos del sol está completamente seca.

Los electrodos pueden ser fabricados de tubos ó varillas de fierro galvanizado ó bien de varillas de "copperweld".

En el caso del fierro galvanizado, se puede usar en terrenos en que su constitución química no ataque a dicho material.

En terrenos cuyas componentes son más corrosivas, se utiliza el "copperweld" que consiste en una varilla de fierro a la cuál se adhiere una lámina de cobre. Este cobre está soldado sólidamente y en forma continua a la varilla de fierro. Este material combina las ventajas del cobre con la alta resistencia del fierro. Tiene buena conductividad, excelente resistencia a la corrosión, buena resistencia mecánica para ser clavado en el terreno y se puede conectar a los cables de tierra a través de conectores.

**Conectores y accesorios.** - Son aquellos elementos que nos sirven para unir a la red de tierra, los electrodos profundos, las estructuras, los neutros de los bancos de transformadores, etc. Los conectores utilizados en los sistemas de tierra son:

- Conectores atornillados
- Conectores a presión
- Conectores soldados.

Todos los tipos de conectores deben poder soportar la corriente de la red de tierras en forma continua.

Los conectores atornillados se fabrican en bronce con un alto contenido de cobre, formando dos piezas que se unen por medio de tornillos cuyo material está formado por bronce al silicio que les da alta resistencia mecánica y a la corrosión.

La utilización del bronce, que es un material no magnético, proporciona una conducción segura para las descargas atmosféricas que son de alta frecuencia.

Los conectores a presión son más económicos que los atornillados y dan mayor garantía de buen contacto.

Los conectores soldados sólo se usan en la actualidad para la conexión a tierra de los rieles de los transformadores.

Los conectores para sistemas de tierra, difieren de los usados en barras colectoras en que se fabrican para unir los electrodos de tierra al cable de la malla de tierra, al cable de las estructuras, etc. En general se utilizan en los siguientes tipos de conexiones atornilladas:

- a). - Del electrodo al cable de cobre de la malla, tomando en cuenta si el cable es paralelo ó perpendicular al electrodo.
- b). - Del electrodo a dos cables verticales.
- c). - Del electrodo a tres cables verticales.

- d). - De un cable a un tubo ó columna.
- e). - De dos cables a un tubo perpendicular a ellos.
- f). - Zapata para conexión a diferentes equipos.
- g). - Conector T de cable a cable.
- h). - De un cable a placa.
- i). - De dos cables a placa.
- j). - De tres cables a placa.
- k). - De varilla a placa.

Características del terreno. - Para determinar las características del suelo, normalmente se obtienen muestras hasta una profundidad razonable que pueda permitir juzgar de la homogeneidad y condiciones de humedad ó nivel de aguas freáticas. Para determinar la resistividad eléctrica es conveniente hacer mediciones con métodos y aparatos aceptados para estos fines. Las mediciones deben incluir datos sobre temperatura y condiciones de humedad en el momento de efectuarlas, tipo de terreno, profundidad de la medición y concentraciones de sales en el suelo.

El contenido de sales, ácidos ó álcalis afecta en forma muy apreciable la resistividad abatiéndola. La resistividad depende fuertemente del contenido de humedad.

Cuando ésta se reduce abajo del 22 % por peso, la resistividad crece bruscamente. En este caso se impone el uso de varillas verticales de suficiente longitud para llegar a las capas de mayor humedad y a instalar las mallas del sistema de tierras a mayores profundidades a efecto de que queden en contacto con la tierra húmeda.

La grava ó roca triturada colocada en la superficie ayuda tanto a evitar la evaporación del agua como a reducir la magnitud de los choques eléctricos dada su alta resistividad.

La temperatura también ejerce una influencia apreciable sobre la resistividad del terreno. A menos de  $0^{\circ}\text{C}$  la resistividad crece bruscamente y a mayores temperaturas ésta decrece, excepto al llegar al punto de ebullición del agua que rodea al electrodo por el cual pase una corriente muy intensa, resultando entonces resistividades elevadas debido a la evaporación de la humedad.

Factor de seguridad por el crecimiento del sistema.

Resulta prudente tomar un margen adecuado para estimar los aumentos futuros de las corrientes de falla por aumento de la capacidad del sistema eléctrico ó por interconexiones posteriores, pues las modificaciones posteriores a la red de tierras resultan costosas y generalmente se omiten dando motivo a introducir inseguridad en el sistema.

Este efecto puede tomarse en cuenta disminuyendo la impedancia del sistema ó aplicando un factor de seguridad al valor calculado de la corriente de falla.

Efecto de la resistencia del sistema de tierras.

En la mayoría de los casos, basta con calcular la corriente de falla a tierra despreciando las resistencias. Sin embargo, pueden presentarse casos en donde la resistencia predicha del sistema de tierras sea muy -

alta comparada con la reactancia del sistema que obligue a tomarlas en cuenta. Esto implica un problema, pues mientras no esté diseñado el sistema no puede conocerse su resistencia. Este círculo vicioso se puede romper, ya que una vez determinada la resistividad del terreno, la resistencia depende del área del sistema de tierra que normalmente es conocida. La resistencia puede estimarse por:

$$R = \frac{\rho}{4r}$$

O con mayor precisión por:

$$R = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L}$$

Donde:

R: resistencia del sistema de tierras en ohms.

$\rho$ : resistividad media del terreno en ohms-metro.

r: radio del círculo que tenga la misma área que la ocupada por el sistema de tierras en metros.

L: longitud total de los conductores del sistema de tierras en metros.

Cálculo del calibre del conductor de la red de tierra.

Cada uno de los elementos del sistema de tierra, incluyendo los conductores de la propia malla, las conexiones y los electrodos, deberán ser diseñados de tal manera que:

a). - Las uniones eléctricas no se fundan ó deterioren en las condiciones más desfavorables de magnitud y duración de la corriente de falla a que queden expuestos.

b). - Los elementos sean mecánicamente resistentes en alto grado, especialmente en aquellos lugares en que quedan expuestos a un daño físico.

c). - Tengan suficiente conductividad para que no contribuyan apreciablemente a producir diferencias de potencial locales.

La ecuación de Onderdonk permite seleccionar el conductor de cobre y la unión adecuados para evitar la fusión. Esta ecuación es la siguiente:

$$I = A \frac{\log_{10} \frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1}{33 S}$$

Donde:

I : corriente en amperes.

A : sección del cobre en circular mils.

S : tiempo durante el cual circula la corriente en segundos.

$T_m$  : temperatura máxima permisible en grados centígrados.

$T_a$  : temperatura ambiente en grados centígrados.

Pueden suponerse normalmente los siguientes valores:

$$T_a = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$T_m = 1083 \text{ } ^\circ\text{C}$ , temperatura de fusión del cobre.

$T_m = 450 \text{ } ^\circ\text{C}$ , temperatura permisible para la soldadura del latón.

$T_m = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ , temperatura permisible para las uniones  
con conectores.

Cálculo de los potenciales de paso, de contacto y de malla de la red de tierra.

Como paso previo para determinar la longitud adecuada del conductor que forma la malla, se hace uso de la ecuación que limita la tensión de contacto, ya que las tensiones de paso que se obtienen en instalaciones - - apropiadas son generalmente menores y además las resistencias en serie con los pies limitan la corriente a través del cuerpo y éste tolera corrientes de magnitud superior a través de las extremidades inferiores.

Las tensiones de transferencia son más difíciles de limitar y generalmente obligan a aislar las partes ó a tratar en forma especial el problema.

Se escogen generalmente las tensiones de contacto a estructuras conectadas a tierra al centro del rectángulo de una malla en vez de las tensiones de contacto de puntos a un metro de distancia horizontal al conductor, ya que existen muchas posibilidades de que el objeto tocado a distancias superiores a un metro esté conectado directa o indirectamente a la malla. Este caso especial de tensión de contacto se llamará "tensión de malla". Generalmente es de un valor superior al de las tensiones de contacto a un metro del conductor de la malla.

Para instalaciones con tamaños de conductores, profundidad de enterramiento y espaciamiento dentro de los límites usuales, los valores de -

las diferentes tensiones son de las siguientes magnitudes:

$$E_{\text{paso}} = (0.1 \text{ a } 0.15) \rho i$$

$$E_{\text{contacto}} = (0.6 \text{ a } 0.8) \rho i$$

$$E_{\text{malla}} = \rho i$$

Donde:

$E_{\text{paso}}$  : tensión de un paso, de una distancia horizontal de un metro en volts.

$E_{\text{contacto}}$  : tensión de contacto a una distancia horizontal de un metro del conductor de la malla de tierra en volts.

$E_{\text{malla}}$  : diferencia de potencial entre el conductor de la malla y la superficie del terreno, al centro del rectángulo de la malla.

$\rho$  : resistividad eléctrica en ohms-metro.

$i$  : corriente que fluye a tierra en amperes por cada metro de conductor enterrado.

## CONCLUSIONES

1. - La realización del proyecto de una subestación tipo compacta - para prácticas de laboratorio como la propuesta en el primer capítulo, es factible según la opinión de fabricantes, únicamente que las modificaciones que se proponen al gabinete del tipo convencional encarecen el costo de su fabricación. El criterio a seguir en este caso es el beneficio que traería - consigo el hecho de que el Laboratorio de Máquinas Eléctricas cuente con un modelo de este tipo y no el criterio económico que se sigue comúnmente para la selección de una subestación del tipo convencional.

2. - Una subestación con capacidad de 5 KVA es suficiente para cum - plir con el objetivo que se persigue, pero se recomienda la utilización de - 2 transformadores de 15 KVA ya que las dimensiones de éstos son apropia - das para el fin didáctico y de esta manera se tendría una capacidad de 30 - KVA. Si se calcula la corriente nominal primaria considerando esta capa - cidad y el voltaje de alimentación (6 KV), esta corriente será de 2.88 am - peres, por lo que la utilización de transformadores de corriente no es jus - tificable debido a la función para la que se destinan, pero dada la finalidad que se persigue se recomienda la utilización de éstos ya que el ingeniero - se encontrará contfnuamente con este tipo de aparatos en subestaciones - compactas.

Con respecto al equipo indicador, bastará contar con 2 wattmetros, 3 ampermetros y 1 voltmetro con selector de fase ya que es el equipo más común que se utiliza en subestaciones de tipo compacto.

3. - Considerando que el tipo de barra colectora más utilizada en su bestaciones tipo compactas es la solera de cobre, la subestación modelo - deberá contar con éste tipo de barra, ya que las ventajas descritas en el - capítulo tres superan a los otros tipos de barra para la capacidad que se - propone.

4. - Dadas las características del sistema eléctrico del Laboratorio de Máquinas Eléctricas, los apartarrayos en la subestación que se propo - ne no aportarían una protección que fuese económicamente recomendable, pero volviendo a repetir que el objetivo que se persigue es con fines didá - cticos, se justifica su instalación.

5. - El interruptor en aire en el rango de capacidades interruptivas intermedias es de fácil mantenimiento, por lo que se recomienda este para su utilización como interruptor general en alta tensión en la subestación - propuesta, cumpliendo además con el fin que se persigue, ya que en este - caso lo importante es que el alumno más que visualizar el medio en que in - terrumpe valore la función que éste desempeña.

6. - En la industria, las pruebas a los transformadores generalmen - te no se efectúan, dejando esto al fabricante de los mismos. Las pruebas - propuestas en el capítulo seis tienen en sí dos finalidades: una es de que el alumno conozca las pruebas más comunes que se practican a los transfor - madores y la otra es de que al realizar éstas pruebas en la subestación el alumno tenga contacto con la misma y se familiarice con un equipo que hoy en día es tan usual en la industria.

7. - La red de tierra para la instalación de la subestación que se propone, no requiere de cálculos para su selección, ya que se utilizaría la red de tierra propia del Laboratorio, previa verificación del factor de seguridad por crecimiento de dicha red.

## BIBLIOGRAFIA

- MANUAL DE SELECCION DE SUBESTACIONES  
Compañía de Luz.
- NORMA DE GABINETES PARA EQUIPOS ELECTRICOS  
DE CONTROL Y DISTRIBUCION.  
Comité Consultivo Nacional de Normalización  
de la Industria Eléctrica.
- METODOS DE PRUEBA A TRANSFORMADORES  
DE DISTRIBUCION Y POTENCIA  
Comité Consultivo Nacional de Normalización  
de la Industria Eléctrica.
- METODOS DE PRUEBA  
A GABINETES DE EQUIPO ELECTRICO  
Comité Consultivo Nacional de Normalización  
de la Industria Eléctrica.
- FUNDAMENTOS DE TEORIA Y SELECCION  
DE TRANSFORMADORES PARA MEDICION  
Artículo Balteau, Ing. Antonio Cárdenas Loeza.
- REDES ELECTRICAS TOMOS I Y II.  
Jacinto Viqueira Landa.
- FOLLETOS SOBRE SUBESTACIONES TIPO COMPACTAS  
Siemens, General Electric, Mesa y Square D.
- INDUSTRIAL ELECTRICITY  
Naudin and Gelmine, E.D. Van Nostrand.
- TRANSFORMERS, PRINCIPLES AND PRACTICE  
Gibbs, Mc Graw Hill.
- CURSO DE TRANSFORMADORES Y MOTORES  
TRIFASICOS DE INDUCCION  
Gilberto Enriquez Harper.