

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

"PROTECCION DE BANCOS DE  
CONDENSADORES EN  
SUBESTACIONES"

TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE  
INGENIERO ELECTRICO CON LA ESPECIALIZACION  
EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA


JOFFRE GABRIEL CHICO BARRAGAN

QUITO, NOVIEMBRE DE 1987



## certificación

Certifico que la presente tesis ha sido desarrollada en su totalidad por el Sr. Joffre Gabriel Chico Barragán.

  
Ing. VICTOR OREJUELA  
Director de Tesis

## **agradecimiento**

Al Ing. Víctor Drejuela por la colaboración prestada en el desarrollo de la presente Tesis.

También, a todas y cada una de las personas que, de forma decidida, ayudaron para la terminación de este trabajo.

# I N D I C E   G E N E R A L

## CAPITULO I: ASPECTOS GENERALES

I.1 INTRODUCCION .....	2
I.2 OBJETIVO Y ALCANCE .....	2
I.2.1 Objetivo .....	2
I.2.2 Alcance .....	3
I.3 GENERALIDADES SOBRE CONDENSADORES DE POTENCIA .....	4
I.3.1 Condensadores de Potencia .....	4
I.3.2 Bancos de Condensadores en Derivación .....	9
I.3.3 Bancos de Condensadores Instalados en Subestaciones .....	10
I.3.3.1 Conexión de Bancos de Condensadores en Subestaciones .....	11

## CAPITULO II: CONDICIONES NORMALES

II.1 FALLAS INTERNAS DE LOS CONDENSADORES .....	16
II.1.1 Voltaje .....	16
II.1.2 Corriente .....	17
II.2 DESBALANCE DE VOLTAJE .....	18
II.2.1 Desbalance de Voltaje por Pérdidas de Unidades .....	18
II.2.2 Desbalance Inherente .....	19
II.3 SOBRECORRIENTES .....	19
II.3.1 Sobrecorriente a Frecuencia Nominal .....	20
II.3.1.1 Sobrecargas .....	20
II.3.1.2 Fallas Mayores .....	20
II.3.2 Sobrecorrientes transitorias de Elevada Frecuencia .....	21
II.3.2.1 Corriente Transitoria de Energización .....	21
II.3.2.2 Corriente de Descarga .....	26
II.4 SOBREVOLTAJES .....	28
II.4.1 Sobrevoltajes por Descargas Atmosféricas .....	28
II.4.2 Sobrevoltajes por Maniobras .....	31
II.4.2.1 Sobrevoltajes Transitorios por Energización .....	31
II.4.2.2 Sobrevoltajes Transitorios por Desenergización .....	32
II.4.2.3 Sobrevoltajes por Maniobras en Otros Elementos del Sistema .....	35

## CAPITULO III: SELECCION DE LA PROTECCION

III.1 FUSIBLES .....	37
III.1.1 Fusibles Interiores .....	38
III.1.2 Fusibles Exteriores .....	38
III.1.2.1 Corriente Nominal de un Fusible .....	38
III.1.2.2 Fusible Individual .....	39
III.1.2.3 Fusibles de Grupo .....	42
III.2 RELES Y DISYUNTORES .....	42
III.2.1 Protección mediante Relés .....	43
III.2.1.1 Protección por Sobrecargas y Fallas Mayores .....	43
III.2.1.2 Protección por Desbalance .....	43
III.2.2 Disyuntores .....	52
III.3 PARARRAYOS .....	53
III.3.1 Requerimientos por Descargas Atmosféricas .....	53
III.3.2 Requerimientos por sobretensiones de Maniobra .....	54
III.4 ELEMENTOS ACCESORIOS .....	56

**CAPITULO IV: EVALUACION ECONOMICA**

IV.1 GENERALIDADES .....	60
IV.2 COSTOS DE EQUIPOS .....	60
IV.3 OTROS COSTOS .....	62

**CAPITULO V: EJEMPLO DE APLICACION**

V.1 GENERALIDADES .....	65
V.1.1 Datos Básicos .....	65
V.2 PROTECCION POR FALLAS .....	67
V.3 PROTECCION POR DESBALANCE .....	68
V.4 PROTECCION POR SOBRECARGAS Y FALLAS MAYORES .....	74
V.5 PROTECCION POR SOBREVOLTAJES TRANSITORIOS .....	78
V.6 EVALUACION ECONOMICA .....	80
V.7 CALCULOS Y GRAFICOS .....	86
V.8 ESPECIFICACIONES DE LOS ELEMENTOS DE PROTECCION .....	102

**CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

VI.1 CONCLUSIONES .....	106
VI.2 RECOMENDACIONES .....	110

**AFENDICES**

**BIBLIOGRAFIA**

## **CAPITULO I:**

### **ASPECTOS GENERALES**

#### **I.1 INTRODUCCION**

#### **I.2 OBJETIVO Y ALCANCE**

##### **I.2.1 Objetivo**

##### **I.2.2 Alcance**

#### **I.3 GENERALIDADES SOBRE CONDENSADORES DE POTENCIA**

##### **I.3.1 Condensadores de Potencia**

##### **I.3.2 Bancos de Condensadores en Derivación**

##### **I.3.3 Bancos de Condensadores Instalados en Sub-estaciones**

###### **I.3.3.1 Conexión de los Bancos de Condensadores**

## I.1 INTRODUCCION

Con la necesidad, cada vez mayor, de transportar grandes bloques de energía eléctrica, manteniendo un adecuado control de voltaje a mejor factor de potencia, se ha incrementado el uso de bancos de condensadores a niveles de voltaje, tanto de transmisión como de distribución.

Entre otros factores, para el máximo aprovechamiento de la utilidad de los bancos de condensadores, se requieren de confiables esquemas de protección; los cuales, frente a condiciones anormales, deben aislar a las unidades capacitivas del banco de condensadores o, en su defecto, al banco mismo del sistema, antes que se produzcan daños graves y, ciertamente, antes que una falla se establezca en el sistema.

Consecuentemente, es necesario reevaluar los métodos de protección para bancos de condensadores, a fin de conseguir las máximas prestaciones de instalaciones ya existentes o implementar nuevas instalaciones acorde con el desarrollo tecnológico actual.

## I.2 OBJETIVO Y ALCANCE

### I.2.1 Objetivo.-

El presente trabajo tiene por objetivo realizar un análisis de los principios en que se fundamenta la protección para bancos de condensadores instalados en subestaciones, para, de esta manera, hacer una evaluación de las ventajas y desventajas técnicas de la protección,

dentro de un adecuado criterio económico y llegar a seleccionar la mejor, que guarde un equilibrio entre estos factores.

### **I.2.2 Alcance.-**

El trabajo se lo ha desarrollado en seis capítulos y los factores, a los que se hace mención en la sección anterior, son abordados como a continuación se describe:

Capítulo 1.- Contiene: Introducción, Objetivo y Alcance, Criterios generales sobre: características físicas y técnicas de construcción de condensadores de potencia, necesidad de mantener un equilibrio de potencia reactiva en el sistema, principales factores que hacen deseable la ubicación de bancos de condensadores en subestaciones y conexiones para los mismos.

En lo referente al estudio para ubicación de un banco de condensadores dentro de un sistema de potencia, criterios para la selección de la configuración y conexión del neutro del mismo, no son abordados por estar fuera del propósito de la presente tesis puesto que han sido temas de estudio de tesis precedentes.

Capítulo 2.- Trata sobre las condiciones anormales que pueden presentarse tanto en los condensadores como en el banco mismo, tales son: fallas internas en los condensadores, desbalance de voltaje, sobrecorrientes y sobrevoltajes en el banco de condensadores. Para cada una de estas condiciones se analiza su efecto



sobre los condensadores y el banco, quedando fuera del alcance de este trabajo los efectos que por fallas en el banco de condensadores pueden presentarse en el sistema.

Capítulo 3. - Este capítulo trata sobre los métodos de protección para cada una de las condiciones anormales mencionadas anteriormente. La protección se basa en la utilización de diferentes elementos como fusibles, relés, disyuntores, pararrayos y diferentes elementos accesorios. No es parte de este análisis la coordinación de las protecciones del banco de condensadores con las diferentes protecciones del sistema.

Capítulo 4. - Se analizan las variables que se consideran para realizar una evaluación económica y determinar su influencia en la selección de la protección.

Capítulo 5. - Abarca un ejemplo de aplicación, tomando como base los datos del banco de condensadores instalados en la subestación La Vicentina, en el que se trata de alcanzar la protección técnico-económica más adecuada.

Capítulo 6. - Se dan conclusiones y recomendaciones en base a la parte teórica y el ejemplo de aplicación.

### 1.3 GENERALIDADES SOBRE CONDENSADORES DE POTENCIA

#### 1.3.1 Condensadores de Potencia

Un condensador de potencia está compuesto por varios ele

mentos capacitivos incorporados en serie/paralelo. La figura I.1 muestra una típica configuración compuesta por cuatro grupos en serie; cada grupo en serie está formado por cinco elementos capacitivos en paralelo. Los diferentes tipos de configuraciones se implementan con la finalidad de conseguir las prestaciones de potencia y voltaje deseados de cada condensador (35).

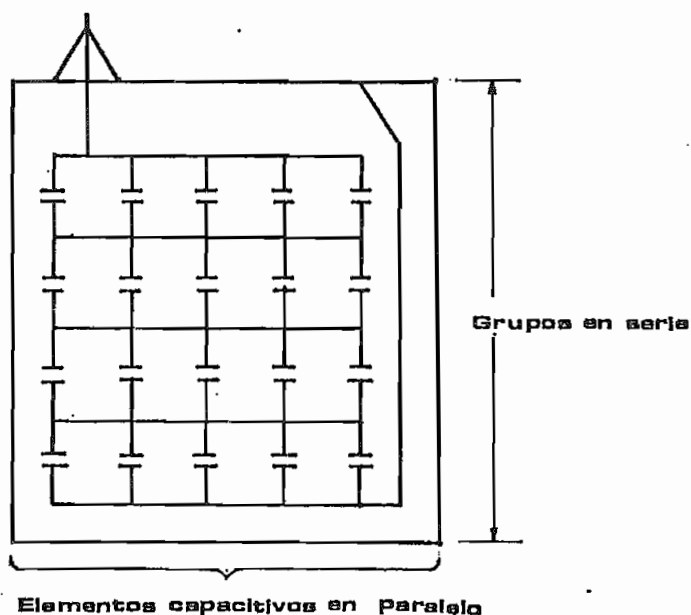


Figura I.1 Esquema de un condensador de Potencia

#### Elementos Capacitivos.-

Un elemento capacitivo está formado por láminas de aluminio como electrodos, entre las cuales existen varias capas de material aislante sólido (40,41).

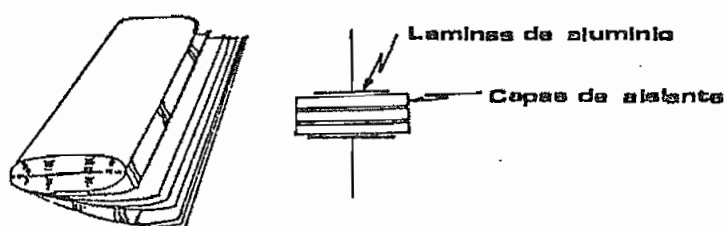


Figura I.2 Elemento capacitivo

### Sistema de Aislamiento.-

El primer material utilizado como aislante sólido fue el papel (condensadores de papel). Con el objeto de conseguir un óptimo rendimiento, el papel era adecuadamente secado e impregnado con líquido aislante tipo aceite mineral. Este sistema de aislamiento experimentó varias mejoras, principalmente en los campos de pérdidas dieléctricas (principal limitante en la obtención de potencia reactiva generada por elemento capacitivo) y resistencia eléctrica del papel.

Paralelamente a las mejoras logradas en los diseños de impregnación con aceite mineral, se desarrollaron otros tipos de líquidos aislantes; tal es el caso de los PBC (bifénilos policlorados). A causa de tener los PBC un índice dieléctrico superior al de los aceites minerales, fue posible aumentar el índice dieléctrico medio del condensador, consecuentemente incrementar la potencia media generada por la unidad.

A mediados de la década de los '60, las películas de polipropileno (plástico), comienzan a ser utilizadas como parte del sistema aislante. Las ventajas que este material presenta, tales como: elevada resistencia eléctrica, bajo factor de pérdidas y bajo costo, permitieron aumentar los regímenes de potencia generada. La utilización de sistemas aislantes formados de película de polipropileno y papel (condensadores de papel-película), se debe, principalmente, a la propiedad rugosa del papel

que facilita la impregnación con el líquido aislante.

La característica nociva de los PBC, ha exigido que se tomen medidas para su utilización, debiendo ser prácticamente reemplazados. Es así que, nuevas opciones de líquidos impregnantes han sido introducidos por los fabricantes (por ejemplo: aceites mejorados, neocaprato de bencilo)(10,25). En general, estos nuevos líquidos impregnantes tienen propiedades superiores ante descargas eléctricas que los PBC, lo que ha permitido en algunos casos mejorar el porcentaje de potencia reactiva.

En todo sistema, las pérdidas tienen un costo por lo que deben ser convenientemente analizadas. En un condensador, el papel produce las mayores pérdidas del sistema aislante, llegando por esta razón a limitar su uso dentro de los mismos. Los nuevos diseños de condensadores se basan en la utilización de sólo películas de polipropileno impregnadas con líquidos aislantes (condensadores de película completa), con lo cual, las pérdidas dieléctricas se han reducido desde 0.4W/KVAR a 0.1W/KVAR (3).

En este tipo de condensadores, las pérdidas dieléctricas ya no constituyen el principal limitante en la obtención de potencia reactiva; mas bien, lo constituyen las sollicitaciones eléctricas impuestas al sistema aislante (3).

#### Partes Constructivas de un Condensador.-

Las principales partes constructivas de un condensador de potencia son (figura I.3):

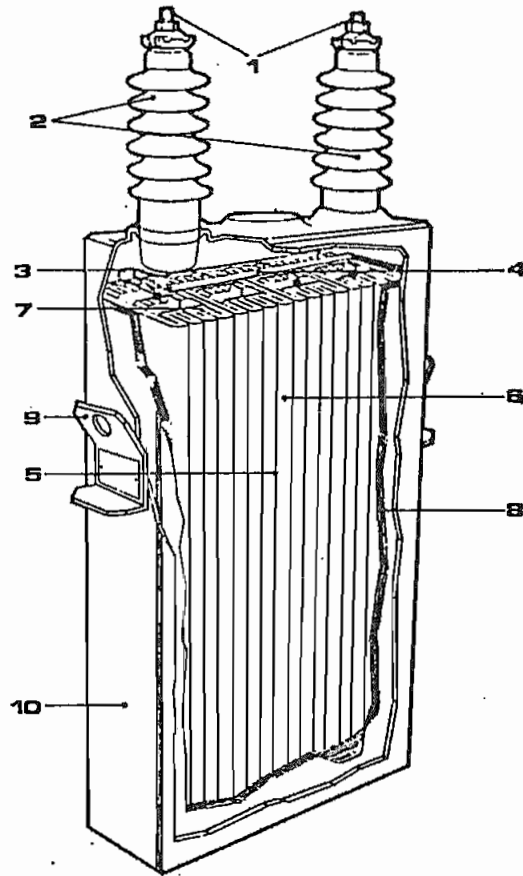


Figura I.3 Condensador de potencia

- 1.- Conectores
- 2.- Aisladores
- 3.- Conductores Internos
- 4.- Resistencia de Descarga
- 5.- Aislante sólido (papel, papel-película de polipropileno, sólo películas de polipropileno).
- 6.- Líquido Aislante
- 7.- Láminas de aluminio (electrodos)
- 8.- Capas de papel (aislan las bobinas capacitivas del envase).
- 9.- Soportes de Montaje
- 10.- Envase del Condensador (tanque).

### I.3.2 Bancos de Condensadores en Derivación

En todo sistema de potencia de corriente alterna, a más de la componente de potencia activa se encuentra presente la componente de potencia reactiva. En la transmisión y distribución de la energía eléctrica es de suma importancia la existencia de potencia reactiva para la transferencia y conversión de potencia activa, pues la necesidad cada vez mayor de transportar grandes bloques de potencia activa trae consigo problemas de inestabilidad y colapso de voltaje del sistema.

Bajo condiciones de funcionamiento en estado estable del sistema, el mantener la frecuencia constante exige conservar un equilibrio entre potencia activa generada y potencia activa de consumo más las pérdidas. De igual forma, es necesario cuidar el equilibrio de potencia reactiva para conseguir adecuadas magnitudes de voltaje en todas las barras del sistema. Las magnitudes de los voltajes están relacionadas con la inyección de potencia reactiva: exceso de reactivos en un área significa elevadas tensiones, mientras que su defecto supone bajas tensiones. El equilibrio de potencia reactiva influye también al minimizar las pérdidas de potencia activa en la red.

El equilibrio de potencia activa se lo obtiene únicamente con la potencia suministrada por los generadores. Por el contrario, el equilibrio de potencia reactiva se consigue con los generadores y diferentes tipos de ele-

mentos reactivos del sistema. Entre los principales elementos suministrantes de reactivos capacitivos están los bancos de condensadores en derivación; los mismos que pueden ser utilizados en circuitos industriales, de distribución, subtransmisión y transmisión para corregir el factor de potencia, maximizar la capacidad de alimentadores primarios, control de voltaje, minimizar las pérdidas en el sistema, entre otras aplicaciones.

### 1.3.3 Bancos de Condensadores Instalados en Subestaciones

Uno de los objetivos básicos perseguidos con la utilización de bancos de condensadores constituye el compensar los reactivos lo más cerca posible de la carga. Con esta finalidad se han implementado bancos de condensadores en alimentadores primarios y demás circuitos de distribución. Como se ha mencionado, los condensadores elevan constantemente el voltaje, siendo crítico especialmente en periodos de carga mínima; en cuyo caso el voltaje puede alcanzar límites no permitidos e inclusive intolerables, razón por la cual los bancos de condensadores deben estar equipados con elementos de desconexión. En este tipo de instalación existe un mayor costo por KVAR instalado (13).

Con la creciente necesidad de transportar bloques de energía cada vez mayor, con adecuado control de voltaje y mejor factor de potencia, se implementan grandes bancos de condensadores en subestaciones, tanto a niveles

de transmisión como de distribución. Entre los principales factores que hacen deseable la ubicación de bancos de condensadores en subestaciones se tienen:

- Necesidad de operar el banco según las características de la demanda.
- Cargas grandes alimentadas directamente de la subestación.
- Necesidad de controlar la potencia reactiva generada por el banco de condensadores y, en general, toda la potencia reactiva del sistema, que es de suma importancia, no sólo en condiciones normales de operación sino también durante grandes perturbaciones del sistema.
- Mayor posibilidad de instalar bancos de condensadores fijos o desconectables, frente a los mismos tipos de instalaciones en alimentadores primarios, por factores como: adecuado control de voltaje o económico, respectivamente.

#### I.3.3.1 Conexión de Bancos de Condensadores en Subestaciones.

Los condensadores de potencia son fabricados con capacidades de hasta de 400 KVAR y 20 KV (27,38). La tendencia por implementar bancos a niveles de voltaje cada vez mayores, con grandes requerimientos de potencia reactiva, exige que varias unidades sean montadas en serie y paralelo respectivamente (figura I.4).



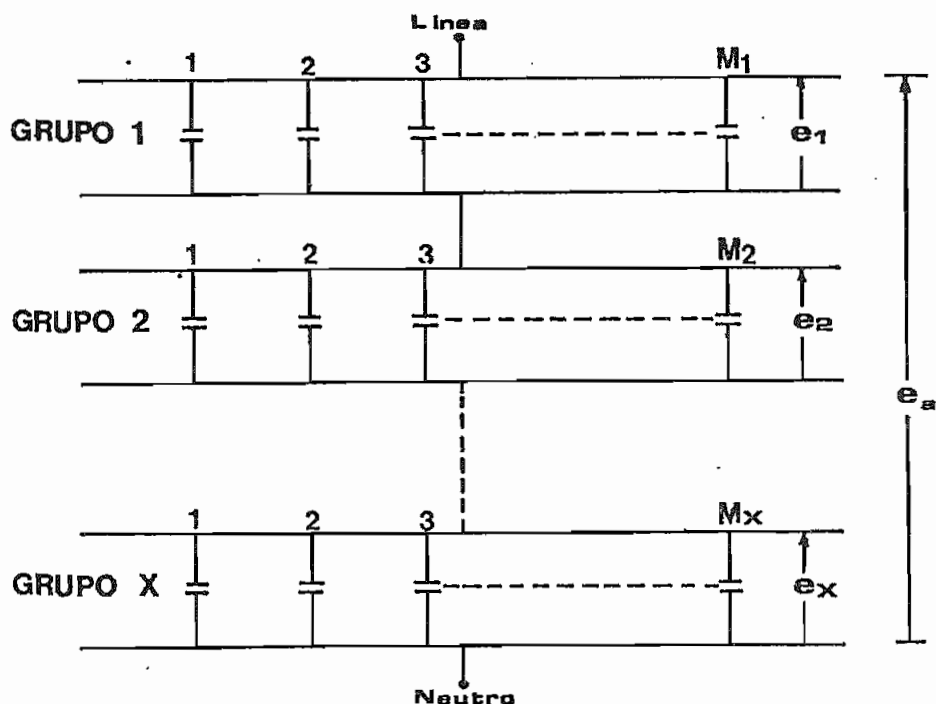


Figura I.4 Disposición de los condensadores dentro de un banco.

X = Número de grupos de condensadores en serie.

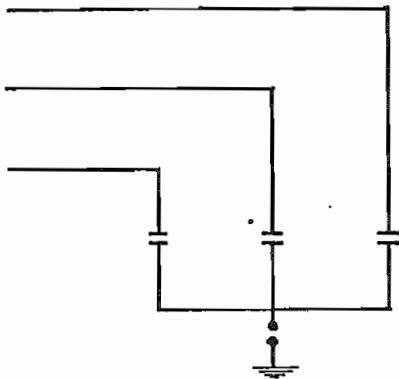
M = Número de condensadores en paralelo por grupo.

$e_1$  = Voltaje a través de los condensadores del grupo 1.

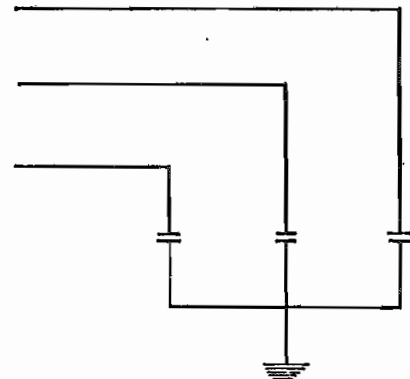
$e_a$  = Voltaje nominal del sistema fase-neutro.

Los bancos de condensadores, a fin de cumplir con las necesidades técnicas y económicas tanto del sistema como del banco mismo, pueden ser conectados de diferentes maneras (figura I.5):

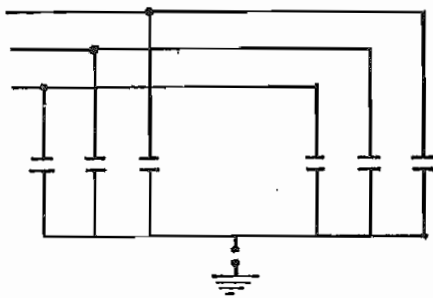
- Conexión Y sin puesta a tierra
- Conexión Y con puesta a tierra
- Conexión en doble Y con neutro aislado de tierra.
- Conexión doble Y con neutro puesto a tierra.
- Conexión delta.



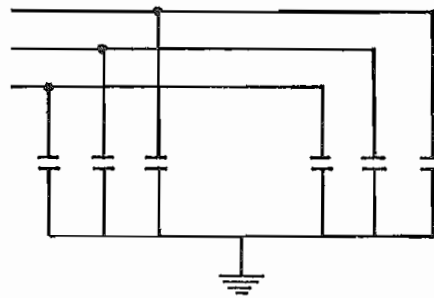
a) Conexión Y sin puesta a tierra



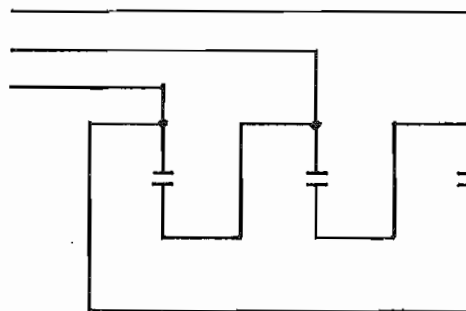
b) Conexión Y con puesta a tierra



c) Conexión doble Y con neutro aislado a tierra



d) Conexión doble Y con puesta a tierra



e) Conexión Delta

Figura I.5 Tipos de conexión de los bancos de condensadores.

De los diferentes tipos de conexiones, generalmente se implementa la conexión Y, en todas sus opciones (35). La conexión o no del neutro a tierra, depende de la puesta a tierra del sistema y requerimientos técnico económico de las protecciones; en una subestación es práctico conectar el neutro del banco a tierra cuando el neutro del transformador es sólidamente puesto a tierra (13). La conexión delta es mayormente implementada en pequeños bancos de condensadores utilizados en circuitos de distribución y sistemas industriales (11,36). En grandes bancos de condensadores la conexión delta puede ser implementada, aunque, desde el punto de vista de voltaje nominal de los condensadores y facilidad de protección, no ofrece ventajas frente a la conexión Y con neutro aislado de tierra.

## **CAPITULO II:**

### **CONDICIONES ANORMALES**

#### **II.1 FALLAS INTERNAS DE LOS CONDENSADORES**

II.1.1 Voltaje

II.1.2 Corriente

#### **II.2 DESBALANCE DE VOLTAJE**

II.2.1 Desbalance de Voltaje por Pérdida de Unidades

II.2.2 Desbalance Inherente

#### **II.3 SOBRECORRIENTES**

II.3.1 Sobrecorrientes a Frecuencia Nominal

II.3.1.1 Sobrecargas

II.3.1.2 Fallas Mayores

II.3.2 Sobrecorrientes Transitorias de Elevada Frecuencia

II.3.2.1 Corriente Transitoria de Energización

II.3.2.2 Corriente Transitoria de Descarga

#### **II.4 SOBREVOLTAJES**

II.4.1 Sobrevoltajes por Descargas Atmosféricas

II.4.2 Sobrevoltajes por Maniobras

II.4.2.1 Sobrevoltajes por Energización

II.4.2.2 Sobrevoltajes por Desenergización

II.4.2.3 Sobrevoltajes por Maniobras en  
Otros Elementos del Sistema

## II.1 FALLAS INTERNAS DE LOS CONDENSADORES

La vida útil de un condensador es una función del diseño y detalles de construcción del mismo. Aún con los modernos adelantos logrados en estos campos, los condensadores están sujetos a fallas internas, que lejos de una adecuada protección pueden provocar la ruptura del tanque del condensador. La falla de un condensador no sólo involucra la pérdida de la unidad, sino también, el daño que puede causar a las demás unidades del banco, al equipo adyacente y la contaminación del medio ambiente.

En operación normal, los condensadores están sujetos a diferentes tipos de sollicitaciones de voltaje, corriente y temperatura que inciden en la vida útil incrementando su probabilidad de fallar.

### II.1.1 Voltaje

Los condensadores son diseñados para operar con esfuerzos considerablemente más bajos que el voltaje de iniciación de descarga del dieléctrico para un amplio rango de temperatura (-40 a 100 grados C.) (10). En general, los condensadores de potencia son autorizados para trabajar en servicio continuo con sobrevoltajes de hasta 1.1 en p.u. del voltaje nominal incluyendo armónicas y hasta una temperatura de hasta 40 grados C. (según norma IEEE Std. 18 / ANSI C55-1). Mayores condiciones provocan sobre esfuerzo en el dieléctrico reduciendo drásticamente la vida útil del condensador (4). Sobrevoltajes transitorios son permitidos únicamente en condiciones de

emergencia, para los que se ha establecido límites recomendables en normas y por fabricantes, dependiendo principalmente de su frecuencia de ocurrencia y tiempo de duración (2,14).

### II.1.2 Corriente

La energía de entrada a un condensador proviene de un amplio rango de condiciones de tiempo-corriente, clasificadas en corrientes moderadamente en exceso a la nominal por periodos de días, semanas o mayores y corrientes altas de corta duración (4).

La formación de arcos en el interior de un condensador, causados por la falla del dieléctrico y como una función de la energía de entrada, genera la producción de gases que dependen del material del dieléctrico (5). A causa de ser el condensador herméticamente sellado, la formación de gases elevan la presión interna a niveles que pueden provocar la ruptura del tanque. Otros modos de falla se han discutido partiendo de la configuración del condensador y material del dieléctrico, así: la presión interna de los gases hinchan las paredes del recipiente, esto causa el descenso del nivel del líquido dieléctrico y posibilita la formación de una descarga entre conductores que quedan por encima del mismo (12). Para el mismo efecto, la falla de un condensador parte con la falla de un elemento capacitivo, la corriente de falla aumenta de forma escalonada, es decir, sucesivamente con el cortocircuito de cada uno de los elementos capa-

citivos: la corriente de cortocircuito del condensador se alcanzará cuando todos o casi todos los elementos capacitivos hayan fallado (25).

## II.2 DESBALANCE DE VOLTAJE

El desbalance de voltaje en un banco de condensadores aparece como consecuencia de la separación de unidades con falla. Además, en condiciones normales de operación del banco, existe un desbalance de voltaje inherente, resultado de las respectivas tolerancias de fabricación de los condensadores y variaciones de voltaje propios del sistema.

### II.2.1 Desbalance de Voltaje por Pérdidas de Unidades

Un condensador que ha fallado debe ser retirado del banco de condensadores lo más rápido posible, previniendo de esta manera la ruptura del tanque y el consecuente agravio que esto causa; facultando al mismo tiempo la continuidad de servicio del resto de condensadores del banco. La separación de una unidad con falla incrementa la impedancia del grupo serie correspondiente (2), con lo cual:

- Aparece un desbalance de voltaje y/o corriente en el banco.
- El voltaje en el resto de condensadores del grupo exhibe un incremento (el mismo que no debe exceder del 1.1 del voltaje nominal).

Dependiendo con el número de unidades con falla que han sido aisladas, las condiciones impuestas al resto de

unidades del banco son más severas.

El apéndice A muestra la manera de cálculo del desbalance por separación de unidades para diferentes tipos de configuraciones.

### II.2.2 Desbalance Inherente

En toda instalación de bancos de condensadores, la señal de voltaje o corriente debido a la separación de unidades es afectada por la presencia del desbalance inherente. El error por desbalance inherente es un fasor con magnitud y ángulo de fase ( $\theta$ ), el cual unas veces puede ser aditivo y otras sustractivo con respecto a dicha señal de desbalance por separación de unidades.

El desbalance inherente para varias configuraciones puede ser estimado con las ecuaciones que se encuentran en la tabla del apéndice B.

### II.3 SOBRECORRIENTES

Un banco de condensadores está sujeto a sobrecorrientes de elevada frecuencia como a sobrecorrientes de frecuencia nominal. Estas corrientes se originan por distintas causas, como son: fallas en los condensadores, fallas en el banco mismo, transitorios de energización, etc. Afectan principalmente a los condensadores del banco (sección II.1.2), así como también, pueden afectar a la continuidad de servicio del banco y del sistema.



### II.3.1 Sobrecorriente a Frecuencia Nominal

En un banco de condensadores, las sobrecorrientes a frecuencia nominal se presentan por dos causas, éstas son:

- Sobrecargas
- Fallas mayores

#### II.3.1.1 Sobrecargas

Los condensadores, ocasionalmente, están sujetos a corrientes de sobrecarga debido al incremento del voltaje a frecuencia fundamental del sistema, exceso de la capacitancia por tolerancia de fabricación y armónicas de voltaje que pueden estar añadidas a la componente fundamental (2). Estas corrientes de sobrecarga provocan elevación de la temperatura de los condensadores del banco, alterando la estabilidad del material aislante con el consecuente acortamiento de la vida útil de los condensadores (5). Según la norma ANSI C55-1, los máximos KVAR que pueden ser obtenidos de un condensador no deben exceder del 135% de su valor nominal.

#### II.3.1.2 Fallas Mayores

Los diferentes tipos de fallas (fase-tierra, 2 fases tierra, 3 fases, etc), que se presentan en un sistema de potencia, pueden también presentarse en toda instalación de bancos de condensadores. Estas fallas conocidas con el nombre de fallas mayores, dependiendo del sitio en el que el banco está ubicado en el sistema, proporcionan elevados niveles de corriente, superiores a los estable-

cidos en las curvas tiempo-corriente para condensadores (11). Presentan, además, mayor gravedad, ya que pueden afectar a la continuidad del servicio del sistema (12).

Otro tipo de fallas, de muy escasa ocurrencia, son aquellas que pueden ser causadas por la presencia de animales u objetos extraños que puenteen los aisladores (19).

### II.3.2 Sobrecorrientes Transitorias de Elevada Frecuencia.

Una sobrecorriente a elevada frecuencia puede presentarse por:

- Transitorios por energización.
- Corrientes por descarga de los condensadores.

#### II.3.2.1 Corriente Transitoria de Energización

Al energizar un banco de condensadores, resulta fluir una corriente de alta magnitud y frecuencia con respecto a la corriente nominal por instantes de aproximadamente menos que 0.01 seg (12).

Esta sobrecorriente es conocida con el nombre de corriente transitoria de energización, cuya magnitud y frecuencia dependen de los siguientes parámetros:

- Capacitancia total del circuito.
- Voltaje en el instante de conexión del banco.
- Inductancia total del circuito.
- Resistencia total del circuito (factor de amortiguamiento que afecta muy poco al transitorio).

Para determinar la corriente de energización, se debe

distinguir entre bancos de condensadores aislados y bancos de condensadores en paralelo.

#### Bancos Aislados.-

Un banco de condensadores es considerado aislado cuando es energizado sin que en su vecindad existan otros bancos ya energizados. La corriente transitoria de energización está limitada por la inductancia de la fuente y la capacitancia del banco.

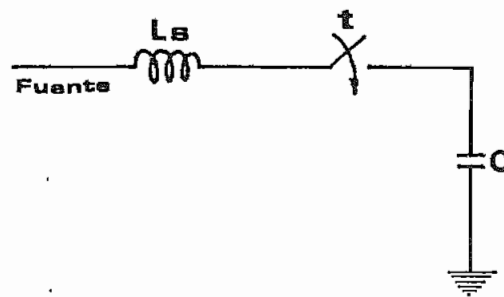


Figura II.1 Energización de un condensador a través de una inductancia.

$L_s$  = Inductancia del circuito.

$C$  = Capacitancia del banco.

La frecuencia y el valor pico de la corriente se calculan con las siguientes ecuaciones (14):

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{F.1}$$

$$I_{pmax} = V_{LL} \sqrt{\frac{2C}{3L}} \quad \text{F.2}$$

Expresando en términos de corriente nominal del banco de condensadores y corriente de cortocircuito del sistema:

$$f = f_s \sqrt{\frac{I_{cs}}{I_1}} \quad \text{F.3}$$

$$I_{pmax} = \sqrt{2 I_{cs} * I_1} \quad \text{F.4}$$

Donde:  $f$  = Frecuencia transitoria de energización

$f_s$  = Frecuencia del sistema

$I_{cs}$  = Corriente de cortocircuito del sistema

$I_1$  = Corriente nominal del banco

$I_{pmax}$  = Corriente de energización

$C$  = Capacitancia del banco

$L$  = Inductancia total del sistema

$V_{LL}$  = Voltaje entre líneas del sistema

En las ecuaciones anteriores se ha despreciado el efecto de la resistencia dando por lo tanto una expresión simple y más conservativa; se asume también, que la carga residual del banco es cero y el voltaje en el instante de conexión es el máximo e igual a  $\sqrt{2} * V_{rms}$ .

Generalmente, la corriente transitoria de energización para bancos de condensadores aislados es algo menor que la corriente de cortocircuito del sistema (13).

#### Bancos de Condensadores en Paralelo.-

Cuando un banco de condensadores es energizado en presencia de otros bancos ya energizados en la misma barra es llamado banco de condensadores en paralelo. El circuito de la figura II.2 representa la energización de los bancos en paralelo, con iguales restricciones que en

el caso anterior; la frecuencia y la magnitud de la corriente transitoria de energización se determinan con las siguientes expresiones (14):

$$f = \frac{1}{2 \pi \sqrt{L_{eq} * C_{eq}}} \quad \text{F.5}$$

$$I_{pmax} = V_{LL} \sqrt{\frac{2 C_{eq}}{3 L_{eq}}} \quad \text{F.6}$$

expresando en términos de corriente:

$$f = 9.5 \sqrt{\frac{f_s * V_{LL} (I_1 + I_2)}{L_{eq} (I_1 * I_2)}} \quad \text{F.7}$$

$$I_{pmax} = 1747 \sqrt{\frac{V_{LL} (I_1 * I_2)}{L_{eq} (I_1 + I_2)}} \quad \text{F.8}$$

Donde:  $f$ ,  $f_s$ ,  $V_{LL}$ ,  $I_{pmax}$ ,  $I_1$  igual que en el caso anterior

$I_2$  = Corriente nominal del banco 2

$C_{eq}$  = Capacitancia equivalente de los bancos =  $\frac{C_1 * C_2}{C_1 + C_2}$

$L_{eq}$  = Inductancia equivalente del circuito formado entre los bancos =  $L_{c1} + L_1 + L_b + L_2 + L_{c2}$

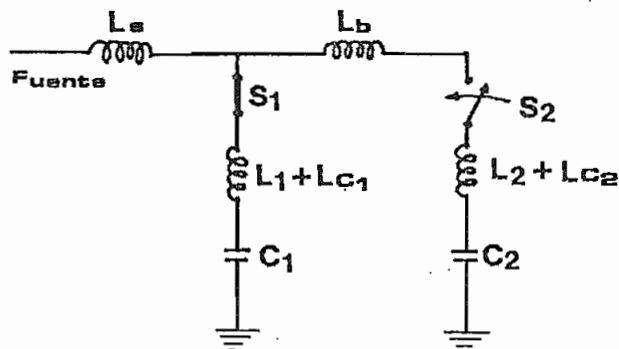


Figura II.2 Energización de dos bancos en paralelo.

Siendo:

$L_s$  = Inductancia del circuito de alimentación

$C_1$  = Capacitancia del banco 1

$C_2$  = Capacitancia del banco 2

$L_1$  = Inductancia entre el banco 1 y el disyuntor 1

$L_2$  = Inductancia entre el banco 2 y el disyuntor 2

$L_b$  = Inductancia de la barra entre disyuntores

$L_{c1}$  = Inductancia propia del banco 1

$L_{c2}$  = Inductancia propia del banco 2

$S_1$  = Disyuntor 1

$S_2$  = Disyuntor 2

La inductancia equivalente entre los bancos ( $L_{eq} = L_1 + L_{c1} + L_b + L_{c2} + L_2$ ) es muy pequeña comparada con la inductancia de fuente  $L_s$ . En la mayoría de los casos la inductancia equivalente entre bancos es menor al 1% de la inductancia de la fuente (14); por lo que, la corriente transitoria que proviene de la fuente, en comparación con la corriente que proviene de los bancos energizados, es de baja frecuencia y magnitud, tanto que puede ser despreciada.

Tanto para bancos en paralelo como para aislados, al incluir el efecto de las tolerancias de fabricación en la capacitancia de los condensadores, armónicas y variaciones de voltaje del sistema, la corriente de los bancos ( $I_1, I_2$ ) deben ser multiplicadas por un factor de 1.25 ó 1.35 dependiendo del tipo de banco de condensadores (este factor se discutirá en mayor detalle en la

sección III.1.2.1). Así también, para incluir el amortiguamiento debido a resistencias en el circuito, se debe tomar un 90% de la corriente  $I_{pmax}$  (14).

Un valor característico, útil en la protección, es el  $I^2t$  producido por la corriente transitoria de energización, el mismo que puede ser obtenido con la siguiente expresión (12):

$$I^2t = \frac{7.5 * V^2 \sqrt{C_{eq}^3}}{\sqrt{L_{eq}}} \quad \text{F.9}$$

Donde:  $V$  = Valor pico del voltaje

$C_{eq}$  = Capacitancia equivalente del circuito

$L_{eq}$  = Inductancia equivalente del circuito

7.5 = Factor que considera un 90% de amortiguamiento

### II.3.2.2 Corriente de Descarga

La figura II.3 muestra el circuito resultante cuando un condensador falla dentro de un banco.

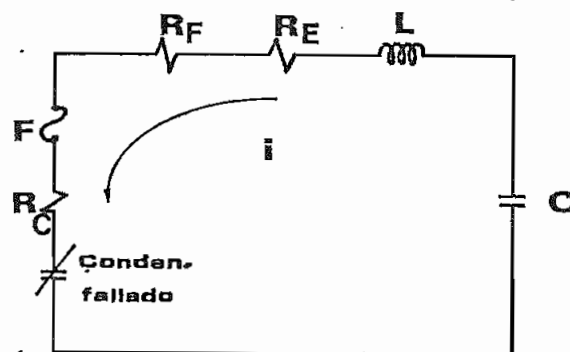


Figura II.3 Corriente de descarga sobre un condensador con falla

Siendo:

$C$  = Capacitancia total de los condensadores buenos.

$L$  = Inductancia equivalente de los condensadores y la barra.

$R_E$  = Resistencia equivalente de los condensadores buenos.

$R_C$  = Resistencia de falla del condensador fallado.

$R_F$  = Resistencia propia del fusible

La corriente de descarga al fallar el condensador viene expresado por:

$$i = \frac{V}{L \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}} e^{-\frac{R}{2L}t} \operatorname{Sen} \left( t \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \right) \quad \text{F.10}$$

Donde:  $i$  = Corriente de descarga.

$V$  = Voltaje al cual el condensador está cargado

$L$  = Inductancia del circuito

$R$  = Resistencia del circuito =  $R_E + R_C + R_F$

$C$  = Capacitancia equivalente

Para bancos de condensadores de gran tamaño  $1/LC$  es mucho mayor que  $R^2/4L^2$ , por lo que la expresión anterior se reduce a:

$$i = V \sqrt{\frac{L}{C}} e^{-\frac{R}{2L}t} \operatorname{Sen} \left( t \sqrt{\frac{1}{LC}} \right) \quad \text{F.11}$$



La corriente tiene una expresión sinusoidal amortiguada cuya frecuencia es:

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad \text{F.12}$$

Si  $V$  es el voltaje en el instante que falla el condensador, la energía almacenada  $J$  por los condensadores buenos, se expresa por:

$$J = \frac{1}{2} V^2 C \quad \text{F.13}$$

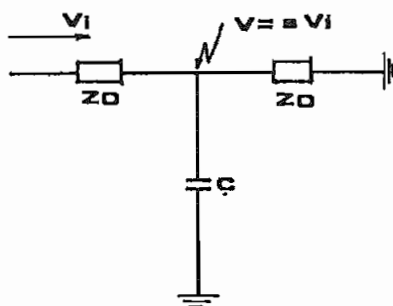
#### II.4 SOBREVOLTAJES

Los sobrevoltajes transitorios en un banco de condensadores se presentan como una consecuencia de descargas atmosféricas o por maniobras realizadas tanto en el banco como en otros elementos del sistema.

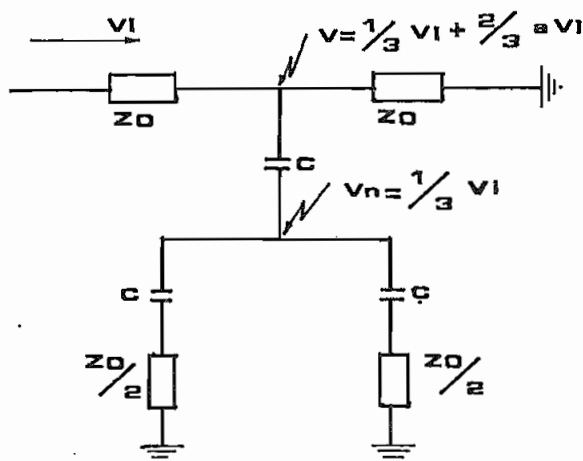
##### II.4.1 Sobrevoltajes por Descargas Atmosféricas

La figura II.4 muestra el circuito equivalente para bancos en Y puestos a tierra y para bancos en Y sin puesta a tierra ante sobretensiones debido a ondas viajeras. Los condensadores de la fase en la que incide la onda viajera están sujetos a mayores esfuerzos cuando el banco es puesto a tierra que cuando el banco es sin puesta a tierra, ya que, en el caso de los últimos, la sobretensión se distribuye a través de las tres fases y, la fase en la que incide la onda viajera, está sujeta a  $2/3$  de la sobretensión que vería esta fase en el caso de que el banco fuese puesto a tierra. En bancos sin puesta a

tierra también su neutro está sujeto a una sobretensión de  $1/3$  de la sobretensión de la onda que incide en la fase de dicho banco (38).



a) Banco de condensadores con puesta a tierra



b) Banco de condensadores sin puesta a tierra

Figura II.4 Comportamiento de un banco de condensadores ante ondas viajeras.

$Z_0$  = Impedancia característica de la línea

$C$  = Capacitancia por fase

$V_i$  = Onda incidente

$V$  = Onda transmitida

$a$  = Coeficiente de transmisión

$V_n$  = Sobrevoltaje de neutro

Ante este tipo de sobretensiones, un banco de condensadores se presenta como un elemento de baja impedancia,

el cual responde amortiguando la pendiente de frente de onda y reduciendo la magnitud de la sobretensión aplicada (15.16).

Las sobrecorrientes por descargas atmosféricas, a menudo son definidas en términos de KA (kiloamperios) y velocidad inicial de crecimiento; sin embargo, cuando se trata de evaluar el voltaje resultante en un condensador o la energía disipada por un pararrayo, la carga  $Q$  de la descarga es más significativa.

La tabla 1 muestra una estimación de la carga y duración para la primera descarga negativa (15).

TABLA 1

Parámetros para la primera descarga negativa

Parámetros de la descarga	Casos que exceden los siguientes valores tabulados			
	95%	50%	5%	Max
Carga (cuolombs)	1.1	5.2	24	52
Tiempo medio (useg)	30	75	200	230

Las descargas que inciden en un conductor de fase muy cerca del banco de condensadores pueden exhibir valores de carga altos que muestra la tabla anterior. Bancos de condensadores que son efectivamente apantallados, verán sólo sobretensiones por descargas atmosféricas que inciden en la línea en una localización remota (15,33). Estos niveles de sobretensión, no mayores que el nivel

básico de aislamiento de la línea (BIL), pueden viajar hacia el banco de condensadores limitando su magnitud de sobrecorriente a (15):

$$I = \frac{BIL}{Z_0} \quad F.14$$

La carga contenida puede ser evaluada con la siguiente expresión (15):

$$Q = I T/2 \quad F.15$$

Donde: I = Sobrecorriente

$Z_0$  = Impedancia característica

T = Tiempo (seg)

Q = Carga (colombos)

#### II.4.2 Sobrevoltajes por Maniobras

Los sobrevoltajes transitorios en un banco de condensadores como resultado de diferentes tipos de operación de conexión son:

- Sobrevoltajes transitorios por energización.
- Sobrevoltajes transitorios por desenergización.
- Sobrevoltajes por maniobras en otros elementos.

##### II.4.2.1 Sobrevoltajes Transitorios por Energización

La energización de un banco de condensadores aislados en Y puesto a tierra, desde una fuente predominantemente inductiva (Fig.II.1), puede dar como resultado un sobrevoltaje transitorio de aproximadamente de 2.0 p.u con una frecuencia natural expresada por la ecuación F.1 (15,37).

En un banco Y sin puesta a tierra, puede aparecer un alto voltaje transitorio por causa del desigual cierre de los contactos del disyuntor (16). En general, los sobrevoltajes asociados con un normal cierre de los contactos son semejantes a los que se producen en bancos Y puestas a tierra (15).

Significativamente altos sobrevoltajes transitorios pueden aparecer tanto en el punto de localización del banco como en localizaciones remotas por causa del preencendido del disyuntor al energizar el banco de condensadores. Esto ocurre cuando un disyuntor es capaz de despejar la corriente en uno de los polos de la corriente de alta frecuencia asociada con la energización del banco de condensadores. En tal caso, aparecen ondas viajeras en líneas y cables alimentados por la misma barra en la que se encuentra ubicado el banco (16,17).

Un mal funcionamiento mecánico del disyuntor puede causar falla en el cierre de los contactos, resultando un contacto eléctrico temporal (similar a un preencendido) seguido por subsiguientes reencendidos del disyuntor así como la apertura del mismo. Esto puede dar como resultado un excesivo voltaje atrapado en aquella fase de un banco puesta a tierra. En un banco Y sin puesta a tierra también las otras dos fases podrán exhibir algo de sobrevoltaje atrapado (15).

#### II.4.2.2 Sobrevoltajes Transitorios por Desenergización

En la desenergización normal de un banco en Y puesto a

tierra, el voltaje inicial a través de los contactos del disyuntor al interrumpir la corriente capacitiva es prácticamente cero, pues, el banco de condensadores mantiene el voltaje pico del sistema e inmediatamente el disyuntor interrumpe la corriente (corriente defasada 90 grados respecto al voltaje). Sin embargo, medio ciclo más tarde, el voltaje de alimentación cambia de polaridad, consecuentemente, entre los contactos del disyuntor se presenta un voltaje de aproximadamente el doble del nominal línea neutro del sistema. En el caso de que el disyuntor no haya alcanzado suficiente aislamiento entre sus contactos, puede producirse un reencendido con una corriente de elevada frecuencia (11). El voltaje transitorio en tal caso se aproxima a 3 veces el voltaje nominal (16).

En lo que se refiere a bancos de condensadores en Y sin puesta a tierra, los contactos del disyuntor puede estar sujetos a voltajes de recuperación aún más altos que aquellos que se presentan en bancos con puesta a tierra (37):

- 2.5 p.u en la primera fase abierta cuando las dos fases abren en el próximo cero la corriente.
- 3.0 p.u en la primera fase abierta cuando las otras dos fases retardan su apertura.
- 4.1 p.u en la primera fase abierta cuando una de las otras dos fases retardan la apertura.

Si un reencendido ocurre en la primera fase abierta a

2.5 p.u, un voltaje de recuperación de 6.4 p.u puede ocurrir en una de las otras fases. Este alto voltaje de recuperación en otra fase puede causar un segundo reencendido (37).

También, para bancos sin puesta a tierra, el neutro está sujeto a sobrevoltajes transitorios como consecuencia de energización o desenergización del banco. Para el caso de energización, en el neutro puede aparecer un transitorio de 1.0 p.u del voltaje de fase de alimentación; en la desenergización, dependiendo de la sincronización del disyuntor en la apertura, puede aparecer un sobrevoltaje transitorio en el neutro del banco de aproximadamente 2.0 p.u del voltaje de fase. Si el disyuntor produce reencendidos o preencendidos, el neutro del banco puede estar sujeto a un sobrevoltaje de 3.8 p.u (34).

#### Bancos de Condensadores en Paralelo.-

Para bancos de condensadores en paralelo (fig. II.2), si un reencendido ocurre en el banco de condensadores  $C_2$ , mientras el banco  $C_1$  está en servicio, el transitorio está compuesto de:

- Una componente transitoria determinada por los dos bancos de condensadores y la inductancia entre ellos.
- Una componente transitoria determinada por los dos bancos y la inductancia de alimentación.

La componente transitoria, debida a los bancos y la inductancia entre ellos, provoca un sobrevoltaje transi-

torio que es significativamente más alto sobre los bancos de condensadores que en la barra de alimentación. Su magnitud puede ser determinada a partir del circuito formado entre los bancos de condensadores y la corriente transitoria de energización (15).

#### II.4.2.3 Sobrevoltajes por Maniobras en Otros Elementos del Sistema

En un banco de condensadores pueden presentarse sobrevoltajes originados en la energización de bancos de condensadores remotos, líneas de transmisión u otros elementos del sistema (16). Se determinan a partir de la configuración del sistema y son de especial atención para bancos de condensadores en circuitos de distribución (15).



## **CAPITULO III:**

### **SELECCION DE LA PROTECCION**

#### **III.1 FUSIBLES**

##### **III.1.1 Fusibles Interiores**

##### **III.1.2 Fusibles Exteriores**

###### **III.1.2.1 Corriente Nominal del Fusible**

###### **III.1.2.2 Fusible Individual**

###### **III.1.2.3 Fusible de Grupo**

#### **III.2 RELES Y DISYUNTORES**

##### **III.2.1 Protección Mediante Relés**

###### **III.2.1.1 Protección por Sobrecargas y Fallas Mayores**

###### **III.2.1.2 Protección de Desbalance**

##### **III.2.2 Disyuntores**

#### **III.3 PARARRAYOS**

##### **III.3.1 Requerimientos por Descargas Atmosféricas**

##### **III.3.2 Requerimientos por Sobretensiones de Ma- niobra**

#### **III.4 ELEMENTOS ACCESORIOS**

### III.1 FUSIBLES

La protección mediante fusibles representa el método más económico de protección del banco, y constituye la primera línea de acción ante una falla interna de los condensadores. Los mayores propósitos perseguidos con esta protección son:

- Mantener la continuidad de servicio.
- Prevenir la ruptura del tanque del condensador fallado evitando daños al equipo, resto de condensador y demás componentes a su alrededor.
- Proveer una indicación visual de que un condensador ha fallado.

En este hecho, dependiendo del tipo de condensador, el fusible puede ser montado de dos maneras diferentes, (26): externamente al condensador constituyendo la protección mediante fusibles exteriores e interiormente al condensador constituyendo la protección mediante fusibles interiores.

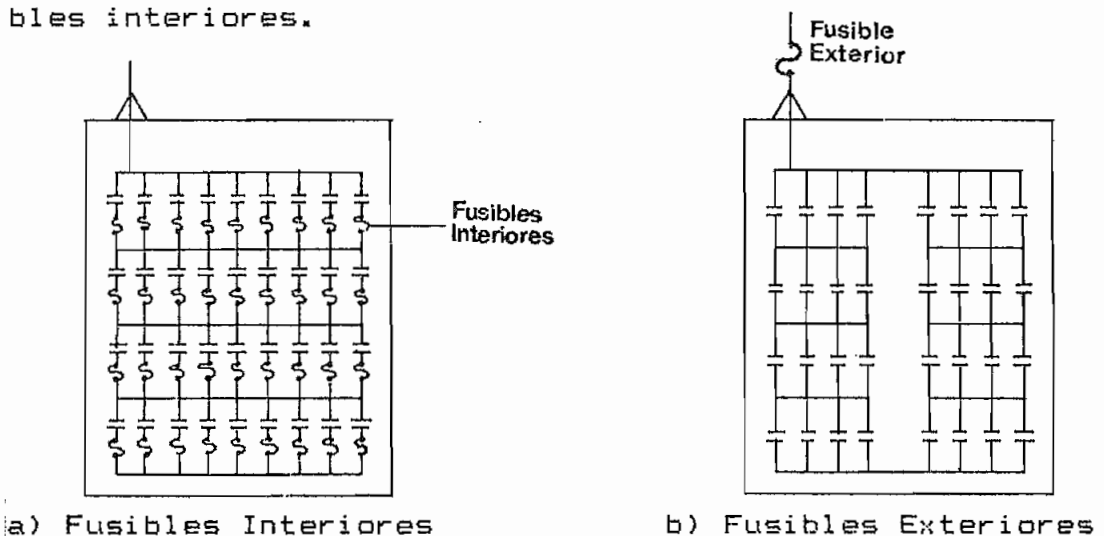


Figura III.1 Protección para condensadores de potencia mediante fusibles.

### III.1.1 Fusibles Interiores

La protección con fusibles interiores consiste en conectar un fusible con cada elemento del condensador. De esta manera, un elemento que ha fallado es aislado, reduciendo así su efecto. El condensador cuyo elemento ha sido aislado puede seguir prestando servicio con una mínima pérdida de potencia reactiva.

Desde el punto de vista de confiabilidad, el sistema de protección con fusibles interiores es superior, puesto que, cada elemento del condensador está individualmente protegido (27).

De cualquier manera, la protección con fusibles internos al condensador está limitada únicamente al diseño mismo de la unidad.

### III.1.2 Fusibles Exteriores

Consiste en proteger el condensador completo, ante fallas internas, mediante un fusible externo a la unidad. Para este método, el fusible tiene dos formas de implementación:

- Fusible Individual
- Fusible de Grupo

#### III.1.2.1 Corriente Nominal de un Fusible

Para dar una adecuada protección, el fusible necesita operar en o cerca de su corriente nominal. Resulta entonces que la corriente en estado estable del banco de condensadores y la de cada unidad deben ser exactamente

conocidas. Esta corriente es la división de los KVAR para los KV nominales respectivamente. Sin embargo, debido a las variaciones de voltaje, armónicas y tolerancias de fabricación en la capacitancia, la corriente en estado estable deberá ser modificada. La tabla II muestra factores de modificación para la corriente como consecuencia de cada uno de estos parámetros (19).

TABLA II

Variaciones para la Corriente en Estado Estable

Parámetro	Factor
Tolerancia de fabricación en la capacitancia	1.15
Variación de Voltaje	1.10
Armónicas	1.10

La norma ANSI C 75.0731-1.973, para la corriente calculada bajo condiciones normales (KVAR y KV nominales), recomienda utilizar un factor de multiplicación de:

1.35 Para bancos con puesta a tierra

1.25 Para bancos sin puesta a tierra

### III.1.2.2 Fusible Individual

En grandes bancos de condensadores, implementados en subestaciones, es común utilizar un fusible protector para cada condensador. El fusible aislará la unidad fallada, permitiendo mantenerse en servicio al resto de unidades de grupo. Además de las condiciones referidas a

la corriente nominal del fusible, se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- El fusible deberá tener una característica de máximo tiempo de despeje ubicada por debajo de la característica de probabilidad de ruptura del condensador al cual protege. Existen cuatro zonas características de probabilidad de ruptura que presentan varios grados de seguridad para el condensador (ANSI C 55.1). La selección del fusible adecuado depende del grado de riesgo de ruptura elegido (20).
- Un método alternativo, al método de coordinación con las características de probabilidad de ruptura del condensador, es utilizar las curvas  $I^2t$  específicas de cada tipo de condensador (19). La selección de fusible óptimo requiere que el máximo  $I^2t$  permitido por el fusible deberá ser siempre menor al mínimo  $I^2t$  de ruptura del condensador (14):
- El fusible debe soportar los requerimientos de la corriente transitoria de energización. Normalmente, esta corriente no produce valores  $I^2t$  que fundan al fusible seleccionado con las consideraciones anteriores cuando el banco es energizado de manera aislada. Si el banco en energización está en paralelo, el disyuntor produce reencendido o preencendidos; la corriente transitoria de energización es elevada, en cuyo caso, es conveniente utilizar pequeños reactores en serie con el banco de condensadores (19, 25). El valor

$I^2t$  liberado en la energización se estima con la ecuación F.9; En el caso de reencendidos el valor  $I^2t$  se estima con la misma ecuación reemplazando E por 2E (12). De modo conservativo, el valor  $I^2t$  para fusibles tipo expulsión a frecuencia de la corriente transitoria de energización es considerado como el 25% del valor  $I^2t$  a frecuencia de 60 Hz calculado con la máxima corriente de coordinación al mínimo tiempo (0.01 seg.) de las curvas de mínimo tiempo de fusión para fusibles (12, 22).

- El fusible protector debe ser capaz de evitar la ruptura del condensador fallado ante la descarga proveniente del resto de condensadores del grupo. Debido a los elevados niveles de energía contenidos en las descargas, los fusibles expulsión proveen una adecuada protección cuando el valor de la energía no excede de 10 kilojoules (38); para mayores niveles de energía, es conveniente utilizar fusibles limitadores de corriente, los mismos que tienen disponibilidades mayores a 50 kilojoules (19,24).
- En la protección individual de los condensadores, cumpliendo con los requerimientos de la corriente transitoria de energización y la energización de descarga, los fusibles tipo T son mayormente recomendados (4,14) La aplicación de estos fusibles está limitada a sistemas que tienen una corriente de falla menor que (38):

7.0 KA con unidades de 300 KVAR o 400 KVAR

6.0 KA con unidades de 200 KVAR o 150 KVAR

5.0 KA con unidades de 100 KVAR

4.0 KA con unidades de 25 y 50 KVAR

Para sistemas con mayores corrientes de cortocircuito que los valores anteriores, se debe considerar la utilización de fusibles limitadores de corriente (14,4,11).

### III.1.2.3 Fusibles de Grupo

Es la práctica de utilizar un fusible para proteger grupos de condensadores o una fase completa del banco. Este método es más utilizado para protección de pequeños bancos de condensadores montados en sistemas de distribución (12,19). La protección con fusibles de grupo es considerada como un caso especial de la protección con fusible individual, por lo que, los criterios anteriores son aplicables (11).

En este tipo de protección, la rápida operación ante bajas y altas corrientes del fusible tipo k es recomendado (4,22).

## III.2 RELES Y DISYUNTORES

En adición a la protección de cada unidad capacitiva mediante fusibles, los relés y disyuntores desempeñan una función importante, pues dan protección al banco de condensadores salvaguardándolo de contingencias anormales, principalmente, sobrecorrientes y desbalance de voltajes.

### III.2.1 Protección mediante Relés

Las condiciones de operación dentro de sus normas establecidas, tanto del banco de condensadores como del sistema de potencia, exigen dos tipos básicos de protección utilizando relés; así:

- Protección por sobrecargas y fallas mayores
- Protección por desbalance

#### III.2.1.1 Protección por Sobrecargas y Fallas Mayores

Los relés de sobrecorrientes dan señal de mando para sacar de servicio al banco de condensadores ante sobrecargas y eventuales fallas mayores, evitando, de esta manera, disturbios que perjudican a los condensadores o al sistema (23).

El relé debe ser escogido de tal forma que con la elevada magnitud de la corriente de energización no dispare al disyuntor tan pronto como el banco ha sido energizado; además, si un condensador falla, el relé deberá retardar su operación hasta que su fusible haya despejado. No son muy recomendables relés de sobrecorriente instantáneos. Los relés de sobrecorriente que tienen características tiempo-corriente inversas son empleados, preferentemente, para cumplir con las condiciones anteriores y obtener una adecuada coordinación con el resto de elementos del sistema de protección (11).

#### III.2.1.2 Protección por Desbalance

El banco de condensadores debe ser protegido contra las condiciones de desbalance impuestos al sacar de opera-



ción una o varias unidades con falla. En esto, son útiles los relés de voltaje o corriente y elementos accesorios (dispositivos de bloqueo, transformadores de corriente o voltaje, dispositivos de alarma, etc.), que en suma conforman los diferentes esquemas de protección por desbalance. En general, la protección por desbalance se debe (7):

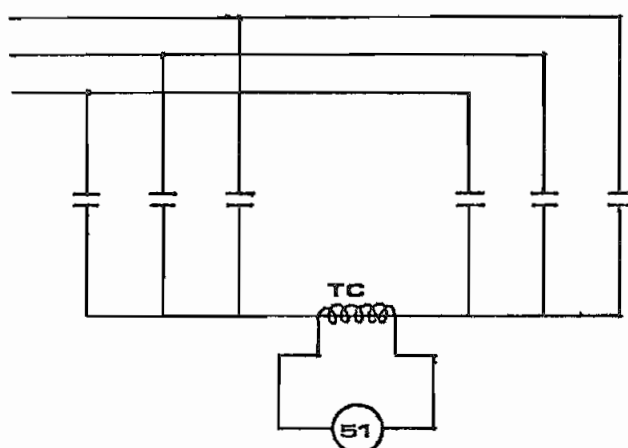
- Coordinar con los fusibles para que estos últimos den una conveniente indicación visual de unidades defectuosas.
- Ser lo suficientemente sensitiva para dar una señal de alarma por pérdida de una unidad y disparar en caso de pérdida de mayor número de unidades que provoquen un sobrevoltaje mayor al 10% permitido en el resto de unidades de grupo.
- Tener un retardo de tiempo para evitar falsas operaciones ante transitorios de energización, fallas mayores y descargas atmosféricas.
- Ser protegida contra transitorios que se presentan en los circuitos de control.
- Incluir un filtro para minimizar el efecto de las armónicas.
- Tener un dispositivo de bloqueo que impida el cierre automático del banco después de haberse detectado una falla.
- Proveer de un medio de compensación para evitar el efecto del desbalance inherente.

### Esquema de Protección por Desbalance

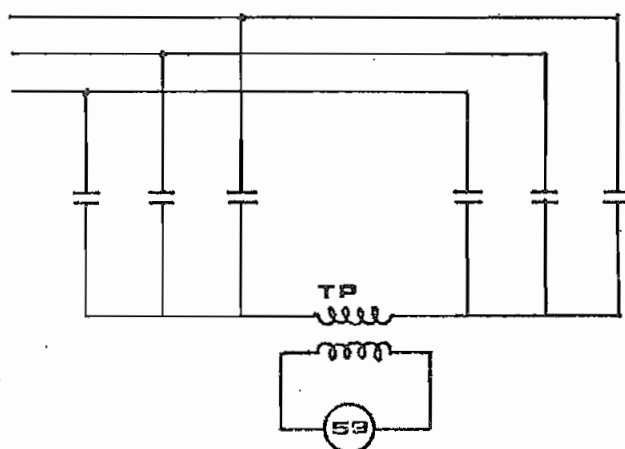
Para cada conexión de bancos de condensadores, existen diversos métodos de protección por desbalance (13,23,24). La selección de un método dependerá de las ventajas y desventajas dentro de una adecuada premisa económica.

#### Bancos de Condensadores Doble Y.-

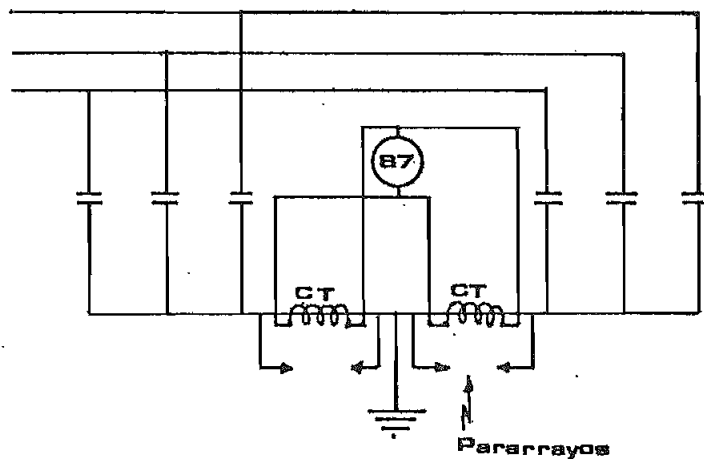
Cuatro métodos de protección por desbalance, para este tipo de bancos, muestra la figura III.2.



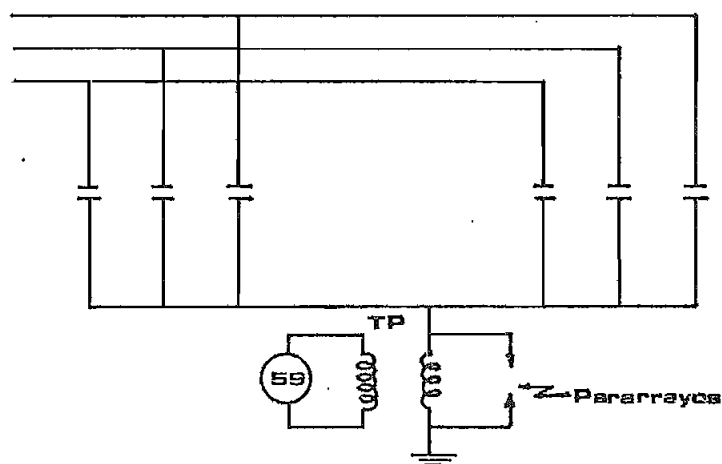
a) Protección de desbalance por corriente de neutro



b) Protección de desbalance por voltaje entre neutros



c) Protección de desbalance por diferenciación de corriente de neutro.



d) Protección de desbalance por voltaje neutro

Figura III.2 Métodos de protección por desbalance para bancos conectados en doble Y

Los métodos indicados en las figuras III.2 (a) y (b) son útiles para bancos de doble Y sin conexión a tierra; utilizan un transformador de corriente o potencial con relé de sobrecorrientes o sobrevoltajes respectivamente. Estos dos métodos de protección no son afectados por transitorios de maniobra, sobrevoltajes de origen atmos-

férico, corrientes o voltajes de tercera armónica ni variaciones de voltaje del sistema.

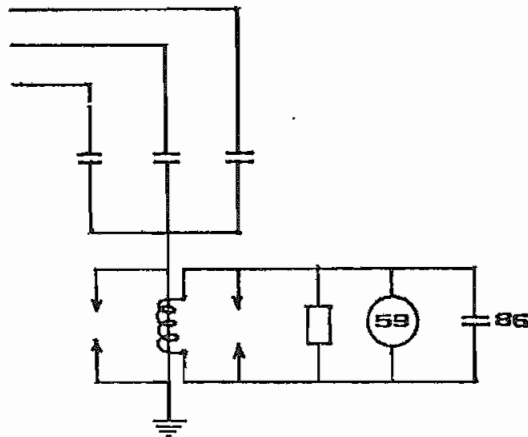
En el esquema de la figura III.2(c), los neutros de las dos secciones del banco son puestos a tierra en un punto común, a través de dos transformadores de corriente. Los secundarios de los transformadores de corriente son conectados a través de un relé diferencial, de tal manera que las condiciones del sistema que se presentan en las dos secciones del banco por igual, no afectan a la sensibilidad del relé. Este no requiere de filtro para armónicas. Los transformadores de corriente están sometidos a corrientes transitorias de maniobra, por lo que necesitan de protección con pararrayos.

En la figura III.2(d), los neutros de las dos secciones del banco están unidos entre sí y aislados de tierra. Para la protección es necesario un transformador de potencial y un relé de voltaje que mida el voltaje entre el neutro y tierra. El relé debe incluir un filtro para armónicas.

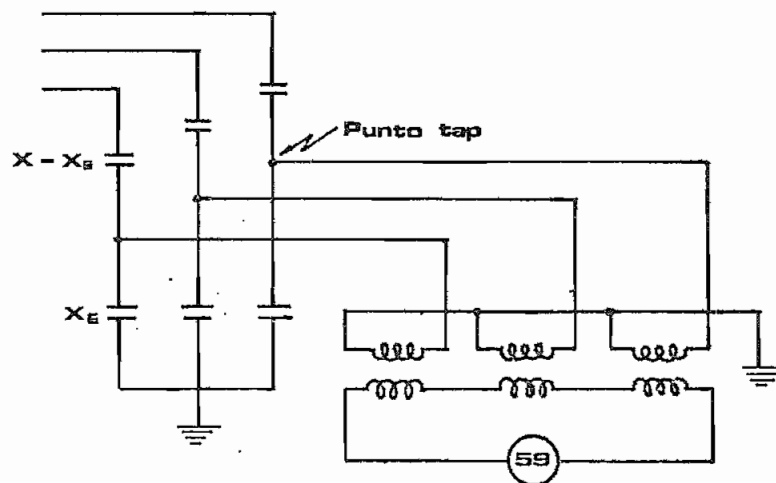
#### Bancos de Condensadores en Y Puestos a Tierra.-

La figura III.3 muestra tres métodos de protección por desbalance para bancos en Y puestos a tierra.

Un desbalance en el banco de condensadores provoca un flujo de corriente entre el neutro del banco y tierra (fig.III.3(a)). Este método de protección, utiliza un transformador de corriente, un relé de sobrevoltajes con



a) Protección de desbalance mediante corriente de neutro.



Si  $X$  es un número par, entonces

$$X - X_G = X_G = X/2$$

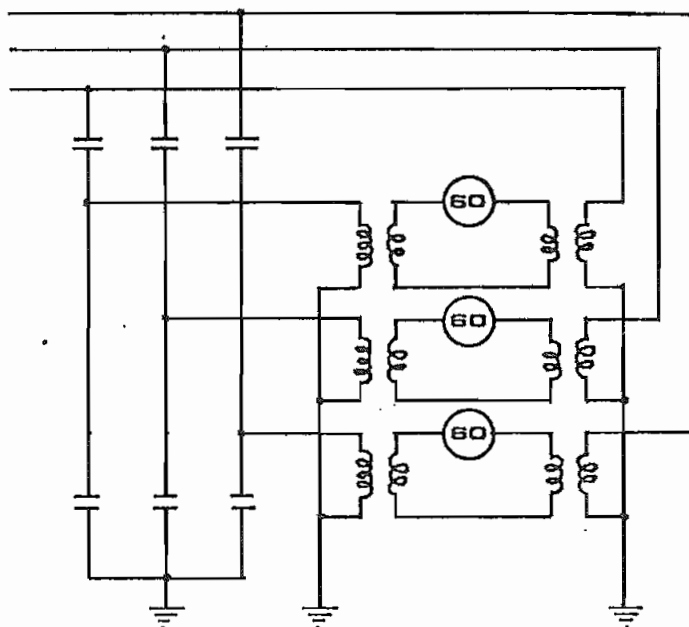
Si  $X$  es un número impar, entonces

$$X_G = \frac{X - 1}{2} ; X - X_G = \frac{X + 1}{2}$$

En las ecuaciones:  $X$  = número de grupos serie.

$X_G$  = número de grupos serie desde una toma intermedia (tap) a tierra.

b) Protección de desbalance mediante la suma de los voltajes de tap de cada fase del banco.



c) Protección de desbalance por diferencia de voltajes.

Figura III.3 Método de protección por desbalance para bancos en Y puestos a tierra.

---  
retardo de tiempo y un filtro de armónicas. El relé de sobrevoltaje opera con un relé de bloqueo para promover la apertura del disyuntor y bloquear la reconexión del banco.

La figura III.3(b) muestra una manera para detectar el desbalance en el banco mediante la desviación de cero de la suma de los voltajes en los puntos tap de las tres fases. Este método necesita de tres transformadores de voltaje con los primarios conectados desde el tap de cada fase del banco a tierra y los secundarios conectados en delta abierta, un relé de sobrevoltaje con retardo de tiempo y un filtro de armónicas.

El método mostrado en la figura III.3(c), utiliza un re-

lé por cada fase para determinar la diferencia entre el voltaje del punto tap del banco y el voltaje de alimentación. Asumiendo todas las unidades en correcto funcionamiento, el desbalance inherente debe ser compensado y las señales tanto de alimentación como del punto tap deben ser ajustadas al mismo valor.

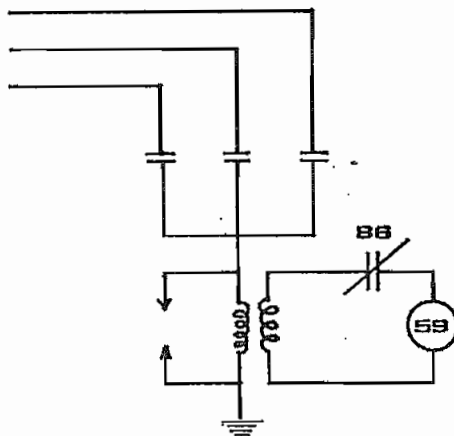
#### Bancos de Condensadores en Y sin Puesta a Tierra.-

Para bancos de condensadores en Y sin puesta a tierra, la protección por desbalance consiste en detectar el desplazamiento del neutro del banco con respecto a tierra debido a la separación de unidades con falla; para lo cual, básicamente se emplea un transformador de voltaje (elemento de alta impedancia) conectado desde el neutro del banco a tierra. La figura III.4 muestra dos métodos de protección para este tipo de conexión.

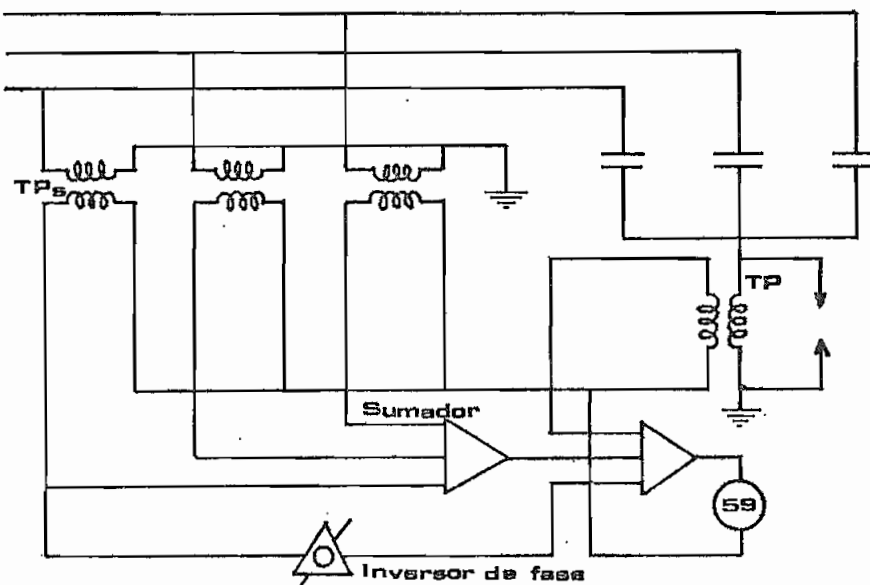
En la figura III.4(a), el desbalance en el banco de condensadores provoca un desplazamiento del punto neutro con respecto a tierra. Este desplazamiento es detectado por un transformador de voltaje; en el secundario del transformador está conectado un relé de sobrevoltaje con retardo de tiempo, un relé de bloqueo y un filtro de armónicas.

El método mostrado en la figura III.4(b), indica una manera de protección por compensación del desbalance inherente. Este método hace uso de la componente de secuencia cero que aparece en el punto neutro del banco como consecuencia de la variación del voltaje del sistema.

Los transformadores de potencial conectados en la línea proporcionan un componente de secuencia cero para compensar la componente de secuencia cero presente en el neutro; el elemento inversor de fase proporciona la compensación por la tolerancia de fabricación en la capacitancia del condensador.



a) Protección de desbalance mediante el desplazamiento del neutro.



b) Protección de desbalance mediante compensación del desbalance inherente

Figura III.4 Método de protección por desbalance para bancos de condensadores en Y sin conexión a tierra.



### III.2.2 Disyuntores

El disyuntor de un banco de condensadores merece especial atención; pues, constituye el instrumento que conecta o desconecta el banco del sistema ante cualquier tipo de maniobra, ya sean estas planificadas o de emergencia. Las maniobras realizadas en el banco, involucran dos fenómenos que imponen severos esfuerzos al disyuntor y provocan su deterioro prematuro; a saber:

- Al interrumpir la corriente capacitiva en un cero de la misma, el voltaje de recuperación entre los contactos del disyuntor llega a ser aproximadamente el doble del voltaje de pico del sistema; lo cual, posibilita la concurrencia de reencendidos.
- La segunda particularidad constituye la elevada frecuencia y magnitud de la corriente transitoria que fluye cuando el banco es energizado o cuando ocurre un reencendido durante la apertura.

Si bien es cierto, la ocurrencia de reencendidos provocan altos sobrevoltajes transitorios en el sistema de potencia (29), su efecto es más perjudicial en el disyuntor mismo (23,31). En grandes bancos, a mayores niveles de voltaje, el problema encierra mayor dificultad; por lo que, dependiendo del tipo de disyuntor, es necesario incluir resistencias de preinserción que limiten la magnitud de las sobretensiones. Las resistencias de preinserción limitan también la magnitud de la corriente transitoria de energización (32).

Un disyuntor para operar un banco de condensadores puede ser seleccionado en base a los criterios de las normas ANSI C37.073.

### III.3 PARARRAYOS

Un banco de condensadores debe ser protegido por diferentes tipos de sobrevoltaje, como son:

- Variaciones del voltaje del sistema
- Armónicas
- Sobrevoltaje por descargas atmosféricas
- Sobrevoltaje por maniobras

Los dos primeros tipos de sobrevoltaje deben ser limitados vía diseño del sistema y esquemas de control. Las solicitaciones impuestas al banco, tanto por descargas atmosféricas como por cualquier tipo de maniobra, encuentran su adecuada protección con el empleo de pararrayos.

#### III.3.1 Requerimientos por Descargas Atmosféricas

Una descarga atmosférica, dependiendo de la carga contenida en la misma, puede cargar al banco de condensadores a un voltaje mayor al de sus límites permitidos (23,33). Descargas atmosféricas percibidas en un punto remoto del banco de condensadores o indirectas no contienen suficiente carga como para sobrepasar los niveles de protección de los pararrayos; sin embargo, descargas atmosféricas directas o muy cercanas contienen elevados niveles de carga que superan los límites de protección de los mismos (15,39); en tal caso, el apantallamiento debe ser

adecuadamente dimensionado, tal como sucede para transformadores u otro equipo de la subestación, cuyo valor económico lo justifica.

El escogimiento entre un pararrayo para protección de un banco o puesta a tierra o un pararrayo para protección de un banco sin puesta a tierra, debe estar en concordancia con lo establecido por los fabricantes; además, el voltaje nominal del pararrayo está relacionado con la puesta a tierra del sistema, en el punto de ubicación del mismo, y no está relacionado, únicamente, con la puesta a tierra o carencia de ella del banco mismo (11).

En bancos de condensadores puestos a tierra, por su habilidad para recortar el frente de onda y reducir la magnitud de la sobretensión aplicada, muchas veces son considerados como autoprotegidos (23). No obstante, esta característica es meramente fortuita y no es un justificativo para omitir los pararrayos, pues, el nivel de sobretensión depende de factores como: magnitud y forma de onda de la sobretensión, origen de la misma con respecto al banco, tamaño del banco y factor de atenuación de la sobretensión (35).

Los valores nominales de los pararrayos se pueden seleccionar siguiendo los pasos indicados en las referencias 23 y 28.

### III.3.2 Requerimientos por Sobretensiones de Maniobra

En general, una operación normal del disyuntor en bancos

sin puesta a tierra no genera sobretensiones riesgosas, tanto para el sistema como para el banco de condensadores. Sin embargo, altas sobretensiones transitorias están asociadas con la ocurrencia de preencendidos o reencendidos del disyuntor. En tales casos, los pararrayos son necesarios para limitar las sobretensiones y el voltaje de recuperación del disyuntor (29).

Los requerimientos energéticos de los pararrayos, al energizar un banco de condensadores desde una fuente predominantemente inductiva, pueden ser calculados de manera conservativa en términos de: capacitancia de los condensadores, inductancia de la fuente, voltaje del sistema y nivel de protección del pararrayo (ver apéndice C). Si, frente a un reencendido, este análisis conservativo indica que las solicitaciones impuestas al pararrayo son severas, se deberá analizar la inclusión de resistencias de preinserción como medio de amortiguamiento (15).

Las sobretensiones transitorias en el banco de condensadores y el voltaje de recuperación del disyuntor, debido a reencendidos, pueden ser reducidos con mayor eficacia (en bancos sin conexión a tierra) conectando el pararrayo juntamente al disyuntor en el lado del banco de condensadores (15). En bancos puestos a tierra, los pararrayos deberán soportar la descarga de los condensadores, lo cual podría ocasionar un posible daño a los mismos (11).

En bancos de condensadores sin puesta a tierra los pararrayos conectados fase-neutro limitan las sobretensiones a niveles menores que los pararrayos conectados fase-tierra, de esta manera se minimiza la posibilidad de múltiples reencendidos. Esta conexión de los pararrayos no limita los sobrevoltajes que se presentan en el punto neutro por consecuencia de los reencendidos (34); por esto, un cuarto pararrayo conectado neutro-tierra puede ser necesario.

Para bancos conectados en paralelo, las elevadas sobretensiones en los terminales de los bancos, requieren que los pararrayos sean ubicados lo más cerca posible de cada banco. De esta manera se limitan las sobretensiones a niveles permisibles para los condensadores (15).

### III.4 ELEMENTOS ACCESORIOS

Conseguir una óptima protección del banco de condensadores requiere de diferentes tipos de elementos adicionales, de entre los cuales se mencionan los más importantes:

#### Transformador de Potencial.-

En determinadas prácticas de protección por desbalance, los transformadores de potencial transmiten al relé la señal de separación de condensadores que han fallado; además, proveen un camino para descargar la energía almacenada en los condensadores, por lo que descargan al banco en menos tiempo que las resistencias internas de cada condensador (23). El utilizar transformadores de

potencial como un camino para descargar a los condensadores, será efectiva únicamente si los transformadores tienen suficiente capacidad térmica para soportar la corriente asociada con la energía almacenada en el banco.

#### Reactores.-

Con la finalidad de reducir los efectos causados por la corriente transitoria de energización en fusibles, disyuntores, condensadores, etc. Es útil emplear un pequeño reactor en serie con el banco que está siendo energizado. Esto es efectivo, particularmente, para bancos de condensadores en paralelo.

#### Transformadores de Corriente.-

Como se ha mencionado, la energización del banco genera una corriente transitoria de elevada frecuencia; esta corriente transitoria puede inducir altos voltajes en los secundarios de los transformadores de corriente que han sido utilizados para la protección de sobrecorriente. Por lo cual, es necesario proteger los secundarios de los transformadores contra estas sobretensiones para prevenir así daños en los relés o en el transformador mismo, especialmente en bancos de condensadores en paralelo.

#### Transformador de Distribución.-

En los bancos de condensadores en Y con el neutro aislado de tierra, como un elemento alterno para detectar la separación de unidades, puede ser empleado un pequeño

transformador de distribución. Para alcanzar una adecuada sensibilidad se requiere que el transformador tenga baja relación de transformación, de esta manera, se puede obtener una apropiada señal de voltaje debido a una pequeña variación de la capacitancia de una fase.

Sobrevoltajes transitorios por descargas atmosféricas o por maniobras, pueden someterse a elevadas sobretensiones a estos transformadores, llevándolos a trabajar en la región de saturación y provocando elevadas sobrecorrientes en su primario. Por esta razón, es necesario que sean protegidos con pararrayos (35).

#### Elementos de Potencial Resistivos.-

Los dispositivos de potencial resistivos ofrecen una solución alterna al uso de transformadores para detectar el desbalance de un banco (7). Se dispone de un sistema completo para el propósito expreso de censar el desbalance del neutro y activar la apertura del disyuntor ante un desbalance significativo del banco de condensadores (37). Este elemento consiste de un resistor de alto voltaje inmerso en aceite. Su función de transferencia es lineal, con lo cual no existe problema de saturación. Estos elementos se fabrican con voltajes nominales desde 23KV hasta 230KV (34).

#### Nota:

Como un alcance a los criterios para la selección de elementos accesorios para la protección, ver referencia 46

## **CAPITULO IV**

### **EVALUACION ECONOMICA**

- IV.1 GENERALIDADES
- IV.2 COSTOS DE EQUIPOS
- IV.3 OTROS COSTOS



#### IV.1 GENERALIDADES

Las diferentes opciones de protección, técnicamente factibles, deben ser evaluadas de manera racional, a fin de que dicha evaluación se pueda obtener la opción más económica que brinde el servicio técnico deseado a menor costo.

La selección de una opción, se basará en la determinación del valor actual de los costos de la vida útil de cada uno de los equipos y demás elementos utilizados en la protección. La opción más económica será aquella que presente el menor valor actual.

#### IV.2 COSTOS DE EQUIPOS

Cada una de las opciones incluyen varios tipos de costos, tales como:

- 1.- Costos de instalación
- 2.- Costos de operación y mantenimiento

Con la información necesaria y los cálculos pertinentes al respecto, se realizará un análisis para determinar cual opción es mejor desde el punto de costos.

##### Costos de Instalación (CI)

Los costos de instalación pueden ser calculados con exactitud en base al precio del equipo, condiciones comerciales y datos de instalación, éstos son:

- a) Costos de adquisición de los equipos. (CAE)
- b) Costos por equipos auxiliares y partes de repuesto para bodega.

- c) Costos por supervisión y montaje .
- d) Costos por administración e ingeniería.

Costos de Operación y Mantenimiento.- (COM)

Los costos por operación y mantenimiento, pueden ser calculados con relativa exactitud en base a dos factores:

- Recomendaciones para operación y mantenimiento de los fabricantes .
- Experiencias propias de las empresas.

Entre los costos considerados como operación y mantenimiento se tienen :

- a) Cálculo a valor actual de un costo por operación y mantenimiento anual programado.
- b) Costos por reemplazo de partes en los equipos.
- c) Costos de pérdidas provocados por los equipos en el sistema, que en tal caso, pueden ser estimadas con ayuda de la ecuación  $I^2R$ .

Estos costos son calculados para la vida completa de los equipos y su incidencia puede ser estimada con las expresiones:

$$VA = \frac{C_n}{(1 + r)^n} \quad F.16$$

Para el caso de incluir la devaluación monetaria:

$$V_n = \frac{V_n^r}{(1 + d)^n} \quad F.17$$

En las ecuaciones anteriores:

$C_n$  = Costo por operación y mantenimiento para el año  $n$

$VA$  = Valor actual de  $C_n$

$V_n'$  = Valor corriente del año  $n$

$V_n$  = Valor constante o real del año  $n$  referido al presente año

$d$  = Tasa de inflación anual.

$r$  = Tasa de actualización

$n$  = Número de años.

#### IV.3 OTROS COSTOS

Existen otros costos de muy difícil estimación, que también deben ser considerados para la evaluación, éstos se basan más bien en las estadísticas recopiladas a través de las experiencias de las empresas. Entre los principales tenemos:

- a) Costo que genera cualquier tipo de falla debido al mantenimiento no programado.
- b) Costo adicional por funcionamiento de los equipos bajo condiciones anormales.
- c) Pérdidas de ingresos debido a interrupciones.

#### Evaluación.-

La evaluación se basará en la comparación de los costos totales de cada opción, los mismos que se componen de:

- a) Costos de instalación (CI)
- b) Valor actual de los costos por operación y mantenimiento.

Considerando uniformes los costos por operación y mantenimiento para la vida útil del equipo, pueden ser estimados con:

$$VA_{COM} = \sum_{i=1}^n \frac{COM_i}{(1+r)^i} \quad F.18$$

$$VA_{COM} = COM \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} \quad F.19$$

Donde:

$VA_{COM}$  = Valor actual de los costos por operación y mantenimiento

$COM_i$  = Costo del mantenimiento para el año  $i$

$r$  = Tasa de actualización

$n$  = Número de años

$$COSTO\ TOTAL = CI + VA_{COM}$$

## **CAPITULO V:**

### **EJEMPLO DE APLICACION**

V.1 GENERALIDADES

V.2 PROTECCION POR FALLAS INTERNAS DE LOS CONDENSADORES

V.3 PROTECCION POR DESBALANCE

V.4 PROTECCION POR SOBRECARGAS Y FALLAS MAYORES

V.5 PROTECCION POR SOBREVOLTAJES TRANSITORIOS

V.6 EVALUACION ECONOMICA

V.7 CALCULOS Y GRAFICOS

V.8 ESPECIFICACIONES DE LOS ELEMENTOS DE PROTECCION

## V.1 GENERALIDADES

El banco de condensadores, seleccionado para la realización del presente ejemplo, se encuentra suministrando reactivos al Sistema Nacional Interconectado (SNI) desde el terciario de uno de los transformadores de la subestación La Vicentina, a un nivel de voltaje de 13.8 KV y una potencia total de 6.000 KVAR (en la subestación La Vicentina, existen dos bancos de condensadores que suministran un total de 12.000 KVAR, por simetría para el ejemplo se ha escogido un solo banco). Para efectos del ejemplo y desde el punto de vista de protección, el banco de condensadores será analizado en las conexiones Y sin puesta a tierra y doble Y sin puesta a tierra, pues, el sistema visto desde el terciario del transformador (conectado en delta), es un sistema aislado de tierra, dado que se cumple:  $X_0/X_1 \rightarrow \infty$

El objetivo, de manera ilustrativa, es seleccionar un método de protección técnico-económico más adecuado para este banco.

### V.1.1 Datos Básicos

Tanto el sistema al que se encuentra conectado el banco y el banco mismo tienen las siguientes características (fig V.1):

Del Sistema.-

- Transformador: 138 KV (H)/46KV (X)/13.8 KV (Y)
- $Z_H = j 12.25\%$  en base de 100 MVA
- $Z_Y = -j 0.88\%$  en base de 100 MVA

$Z_Y = j 37.00\%$  en base de 100 MVA

- Corriente de cortocircuito en la barra de 138 KV:

$$\begin{aligned} \text{Trifásica} &= 8.568 \angle 83.22^\circ \text{ KA} \\ \text{fase-tierra} &= 8.197 \angle 82.60^\circ \text{ KA} \end{aligned}$$

Del Banco de Condensadores.-

- Condensadores: Voltaje nominal = 7.96 KV

Potencial nominal = 200 KVAR

BIL = 95

Fabricante = McGRAW - EDISON

- Números de grupos de condensadores en serie:

$X = 1$  grupo por fase

- Número de condensadores en paralelo por grupo:

$M = 10$  condensadores

- Potencia nominal del banco:

6.000 KVAR

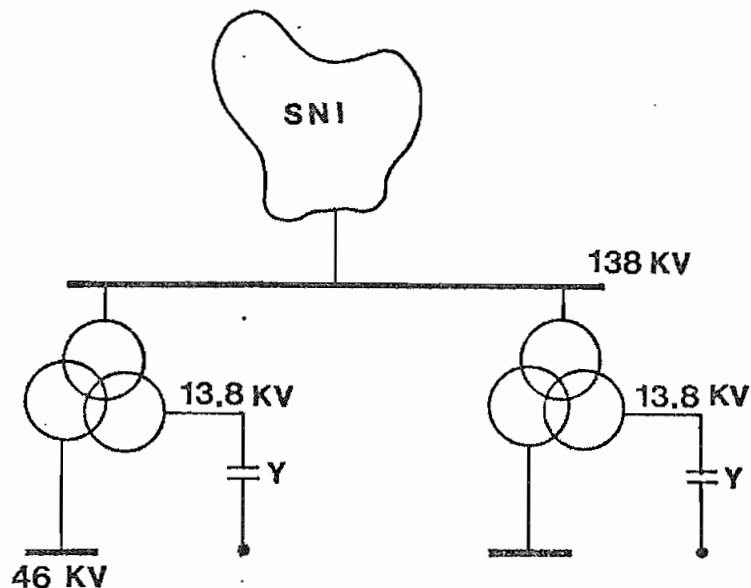


Figura V.1 Diagrama unifilar para el transformador y el banco de condensadores

## V.2 PROTECCION POR FALLAS INTERNAS DE LOS CONDENSADORES

La máxima corriente en estado estable del banco de condensadores es de 313.78 A (cantidades: ver cálculos en la sección V.7). Al ser el banco sin puesta a tierra, la máxima corriente que fluye por un condensador al cortocircuitarse es 941.38 A (tres veces la corriente máxima en estado estable del banco de condensadores); con este valor de corriente, el condensador tiene un 10% de probabilidad de destruirse en un tiempo aproximado de 0.5 seg (curvas de probabilidad de ruptura para condensadores de 200 KVAR). Consecuentemente, es necesario utilizar un método de protección que saque de servicio al condensador cortocircuitado antes que se produzca la ruptura o destrucción de su tanque.

Para cumplir este objetivo se utilizarán fusibles expulsión tipo T (sección III.1.2.2), los mismos que deberán ser instalados individualmente (un fusible por cada condensador) y tendrán una disponibilidad de corriente continua de por lo menos 31.38 A.

CUADRO V.1

Fusible	Corriente Nominal A	$I^2t$ A <sup>2</sup> seg	Energía de Descarga Joules
20T	30	8100	10000
25T	37.5	11025	10000
30T	45	19600	10000

El cuadro anterior muestra los requerimientos de co-



corriente nominal,  $I^2 t$  de energización y energía de descarga para fusibles 20T, 25T y 30T.

Al energizar el banco de condensadores, sobre cada uno de los condensadores se produce un valor  $I^2 t$  de 533  $A^2$  seg, según esto, el fusible 25T es recomendado ya que cumple también con el requerimiento exigido por la energía de descarga, pues, los condensadores cuando están sujetos al máximo voltaje de  $1.1\sqrt{2} V$  contienen una energía de 6419.37 Joules, menor que 10000 joules garantizados para fusibles tipo expulsión (38).

En el caso de producirse reencendidos en el disyuntor, el valor  $I^2 t$  liberado es 2132  $A^2$  seg, del cuadro anterior, el fusible 25 T soporta esta circunstancia sin riesgo de sufrir daño alguno.

De las curvas de máximo tiempo de despeje del fusible 25 T y probabilidad de ruptura para condensadores de 200 KVAR (gráfico V.A), se observa que el fusible interrumpe el circuito en aproximadamente 0.09 seg para la máxima corriente de cortocircuito de un condensador, tiempo que es menor que el tiempo del 10% de probabilidad de ruptura para el condensador (0.5 seg).

### V.3 PROTECCION POR DESBALANCE

El banco de condensadores, desde el punto de vista de protección por desbalance, puede ser implementado con la conexión Y sin puesta a tierra o ser dividido en dos etapas semejantes en Y sin puesta a tierra; la conexión

en Y con puesta a tierra no presenta ventajas puesto que en este punto el sistema es aislado de tierra ( $X_0/X_1 \rightarrow \infty$ ). En el ejemplo de aplicación se analizan las ventajas y desventajas que presenta un esquema de protección para cada una de estas dos conexiones posibles.

#### Conexión del Banco de Condensadores en Y sin Puesta a Tierra.-

Para el banco de condensadores implementado con esta conexión, el esquema de protección por desbalance, básicamente, es el mostrado en la siguiente figura.

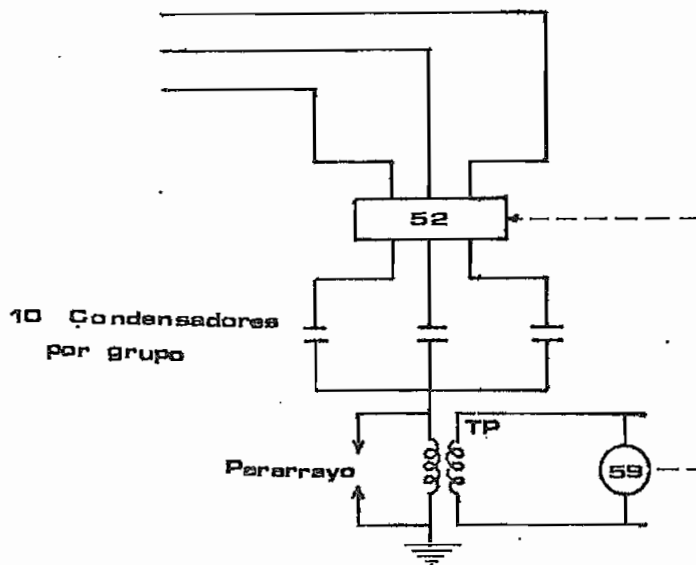


Figura V.2 Protección por desbalance para el banco conectado en Y sin puesta a tierra

#### Ajuste.-

El sobrevoltaje en el resto de condensadores del grupo serie ( $\Delta V_x$ ), así como también, el desplazamiento del voltaje de neutro ( $V_{GN}$ ) causados por el aislamiento de condensadores con falla (N) son calculados con referencia al apéndice A, y se muestran a continuación:

CUADRO V. II

N	$\Delta V_x$ (%)	$V_{GN}$ (V)
1	3.5	275
2	7.1	569
3	11.1	885

En el presente ejemplo, el análisis se realiza utilizando un transformador de potencial cuya relación de transformación será  $RT = 7620/120 = 63.5$ , con lo cual se obtiene una suficiente señal del desplazamiento del voltaje de neutro provocado por la separación de condensadores con falla. Para cumplir con esta protección, existen bloques compactos que constan, principalmente, de dos relés de sobrevoltaje y dispositivos para alarma (43) (relés de sobrevoltaje: CV-8 Westinghouse con voltaje nominal de 57 V, voltaje de pick-up igual a 5.36 V y burden de 30 VA al factor de potencia de 0.342 (44)). Frente a la separación de los condensadores con falla, se presentan las siguientes condiciones:

CUADRO V. III

N	$V_{GNS}$ V	% del voltaje de pick-up
1	4.33	--
2	8.96	167.18
3	13.94	260.00

$V_{GNS}$  = Voltaje de  $V_{GN}$  en el secundario del transformador

El esquema de protección debe dar una señal de alarma frente al segundo condensador fallado. Así como también, dará la señal de apertura al disyuntor frente a la separación del tercer condensador fallado. Para la corriente de cortocircuito de un condensador, el fusible aísla al condensador en un tiempo aproximado de 0.09 seg, considerando que el relé debe operar en un tiempo mayor a éste, es seleccionada la curva de tiempo para operación del relé igual a 1; que para un voltaje de 260% del voltaje de pick-up, el relé da la orden de apertura en un tiempo aproximado de 0.9 seg (gráfico V.A y V.B).

El neutro del banco de condensadores está sujeto a sobrevoltajes transitorios debido a maniobras o descargas atmosféricas (sección II.4), por lo que es necesario proteger al transformador de potencial con pararrayos, cuyo voltaje nominal será igual al voltaje fase-neutro del sistema (15).

#### Conexión del Banco de Condensadores en Doble Y sin Puesta a Tierra.-

Para este caso, el banco de condensadores es dividido en dos etapas semejantes, dando por tanto la posibilidad de implementar un método de protección utilizando las características que presentan sus neutros. En el presente ejemplo, el esquema de protección por desbalance, básicamente, es el mostrado en la siguiente figura:

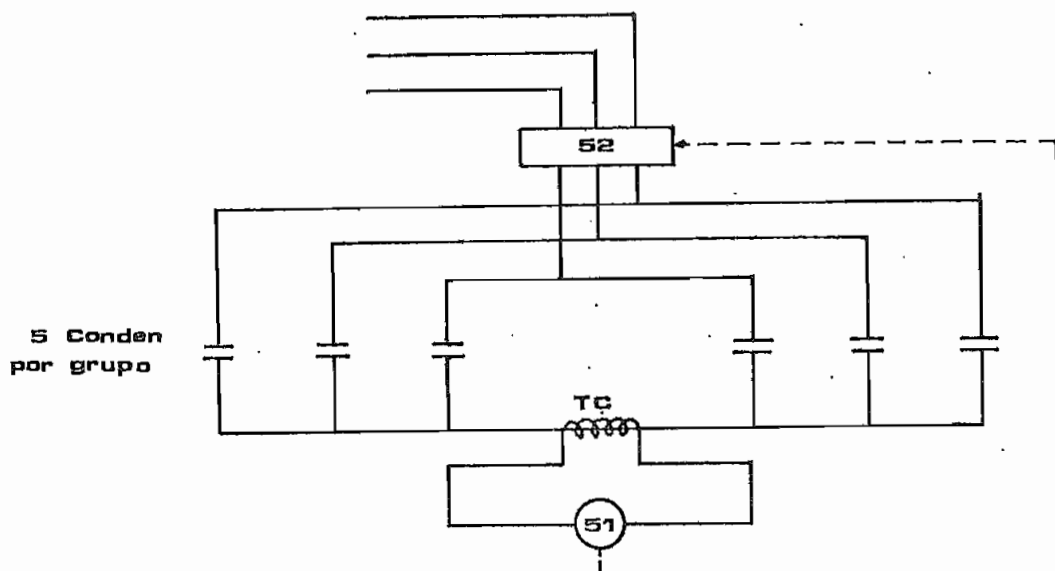


Figura V.3 Protección por desbalance para conexión del banco en doble Y sin puesta a tierra.

#### Ajuste.-

El sobrevoltaje en el resto de condensadores del grupo serie ( $\Delta V_x$ ), así como también, la corriente que circula por los neutros de las dos etapas ( $I_n$ ) causados por el aislamiento de un condensador con falla (N) son calculados por referencia al apéndice A y se muestran a continuación:

CUADRO V. IV

N	$\Delta V_x$ (%)	$I_n$ (A)
1	3.45	25.97
2	7.14	53.79
3	11.11	83.67

El transformador de corriente es seleccionado con relación de transformación de  $RT = 75/5 = 15$ . En este caso, el bloque de protección consta, principalmente, de dos relés de sobrecorriente y dispositivos para alarma (43) (relés de sobrecorriente: Co-11 Westinghouse con curvas extremadamente inversas (45)) con referencia a la corriente de 53.79 A el tap seleccionado es 3.5. El relé, para éste valor de TAP, presenta un burden de 0.88 voltamperios con factor de potencia de 0.9572 ( $Z=0.0718\Omega$ ).

De igual manera que en el caso anterior, el esquema de protección debe dar una señal de alarma frente a la separación del segundo condensador fallado, así como también, dará la orden de apertura al disyuntor frente a la separación del tercer condensador fallado. Al cortocircuitarse un condensador, su fusible lo aísla en el tiempo de 0.09 seg; el relé debe retardar su actuación hasta que el fusible haya despejado, con lo cual se escoje el DIAL 2 (gráficos V.A, V.C), que para la corriente de cortocircuito del condensador ó 9 veces el valor de la corriente de TAP, éste dará la orden de apertura en un tiempo aproximado de 0.2 seg. Para la corriente de  $I_n = 83.67$  (tercer condensador fallado), 1.6 veces el valor de la corriente de TAP, el relé dará la señal de apertura en el tiempo de 8 seg.

En este tipo de conexión del banco de condensadores, el esquema de protección no es afectado por transitorios de maniobra, transitorios por descargas atmosféricas, y en

general, por contingencia que afectan a las dos secciones del banco de condensadores por igual forma.

#### V.4 PROTECCION POR SOBRECARGAS Y FALLAS MAYORES

El banco de condensadores debe ser protegido, para que en el caso de producirse sobrecargas o fallas mayores en el mismo, éstas no generen daños a los condensadores o alteren el normal funcionamiento del sistema. Básicamente, esta protección la realizan tres relés de sobrecorriente conectados a los secundarios de tres transformadores de corriente.

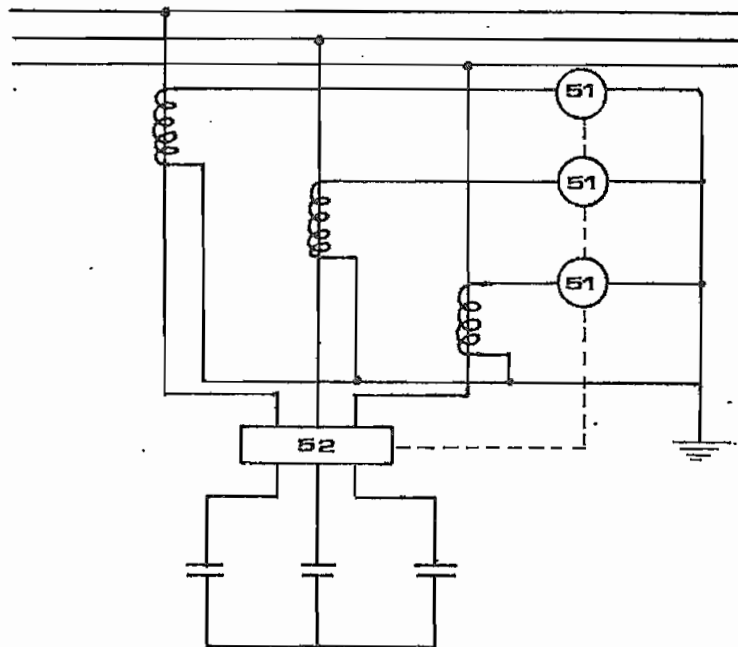


Figura V.4 Protección del banco de condensadores por sobrecorrientes.

#### Ajuste.-

La corriente nominal del banco de condensadores es 313.78 A. Los transformadores de corriente se escogen con relación de  $RT = 400/5 = 80$ . De aquí, la corriente nominal en el secundario de los transformadores de co-

corriente es 3.925 A.

Los relés de sobrecorriente seleccionados para este propósito son los CO-11 Westinghouse con curvas tiempo-corriente extremadamente inversas; con la corriente de 3.925 A se selecciona el TAP 4. El burden del relé (a frecuencia de 60 Hz) al valor de la corriente TAP es de 0.94 voltiamperios ( $Z = 0.05875 \Omega$ ).

Considerando que esta protección debe actuar como protección de respaldo a las anteriores frente al cortocircuito de un condensador, es seleccionada la curva de tiempo para actuación del relé DIAL = 1/2; que para la corriente de 3 veces la corriente nominal da la orden de apertura al disyuntor en aproximadamente 0.28 seg (gráfico V.F).

La corriente de cortocircuito trifásico del sistema es de 7733.16 A, en el secundario del transformador es 96.66 A ó 24.2 veces la corriente nominal del TAP. Ante esta situación, los relés dan la orden de apertura al disyuntor en un tiempo aproximado de 0.025 seg.

El máximo pico de la corriente transitoria de energización es de 2465.34 A o 7.7 veces el valor del transformador de corriente es de 30.82 A ó 7.7 veces el valor de la corriente de TAP. Esta corriente transitoria, como es de esperarse para este tipo de bancos, es menor que la corriente de cortocircuito del sistema y, según la teoría al respecto, se extingue en un tiempo menor a 0.01



seg. El disyuntor del banco de condensadores no debe operar frente a esta corriente transitoria de energización, con la curva de tiempo seleccionada de 1/2 se cumple este requisito.

#### Protección por Fallas Fase-tierra

En la parte anterior se ha tratado la protección por fallas mayores que involucran sobrecorrientes; en el caso de una falla fase-tierra, por ser el sistema sin puesta a tierra, no presenta sobrecorriente de falla. La protección para esta circunstancia es implementada con un relé de sobrevoltaje, el cual comanda a un circuito cuya respuesta puede ser audible o visual. El relé de sobrevoltaje recoge la señal desde tres transformadores de potencial cuyos secundarios están conectados en delta abierta.

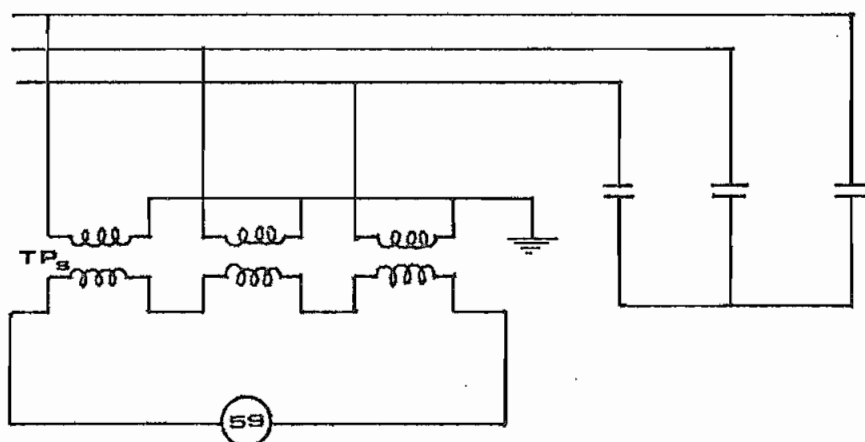


Figura V.5 Protección del banco de condensadores por contacto de una fase a tierra

Debido a las condiciones impuestas por este tipo de fallas, esta protección dará una señal de alarma en el caso de producirse un contacto a tierra de una fase del banco de condensadores.

#### Ajuste.-

En condiciones normales de operación, el neutro del banco de condensadores presenta un voltaje de cero voltios; al producirse un contacto a tierra de una fase, el voltaje de neutro sufre un desplazamiento de 7967 voltios, con lo cual, las fases sin falla presentan un voltaje de 13800 voltios con respecto a tierra ( $X_0/X_1 \rightarrow \infty$ ). Los transformadores de voltaje, por la conexión fase-tierra de sus primarios, al presentarse la falla están sujetos al voltaje fase-fase del sistema (13.8 KV); por lo que estos son seleccionados con relación de transformación de  $RT = 14400/120 = 120$

El relé de sobrevoltaje escogido para este propósito es el CV-8 Westinghouse con voltaje de pick-up de 15.92 V. El burden del relé es 30 voltamperios con factor de potencia de 0.342.

En condiciones de falla fase-tierra, el relé "ve" un voltaje de 115 voltios ó 722.4 % del voltaje de pick-up. Para dar la señal de alarma, el tiempo adecuado es 2 seg (46), de aquí escogemos el DIAL de 4 para actuación del relé (gráfico V.E).

## V.5 PROTECCION POR SOBREVOLTAJES TRANSITORIOS

El banco de condensadores está sujeto a sobretensiones debido a descargas atmosféricas o maniobras, por lo que, los requerimientos de los pararrayos serán analizados desde estos dos puntos de vista.

### Requerimientos por Descargas Atmosféricas

En el banco de condensadores de 6 MVAR con capacitancia de 83.57 microfaradios por fase y nivel básico de aislamiento (BIL) de los condensadores de 95 KV, la carga requerida para llevar a los condensadores a un voltaje igual a su nivel básico de aislamiento es de 7.94 cuolombs. De la Tabla I, descargas atmosféricas directas o muy cercanas al banco de condensadores llevan a éste a un voltaje mayor a su BIL (una descarga que contiene 24 cuolombs lleva al banco de condensadores a un sobrevoltaje de 287 KV), este tipo de descargas superan también la capacidad de disipación de energía de los pararrayos (15,39), razón por la cual, el banco de condensadores debe estar bajo el apantallamiento de la subestación.

El terciario del transformador está sujeto a sobrevoltajes transitorios debido a ondas viajeras originadas en descargas atmosféricas percibidas, tanto en el primario como en el secundario del transformador. Ante este tipo de circunstancia, el banco de condensadores debe ser protegido con pararrayos, pues, un sobrevoltaje limitado por el nivel de protección del pararrayo en el primario y transmitido al terciario somete a los condensadores a

un sobrevoltaje transitorio de 7.35 p.u. del voltaje nominal que es mayor al permitido en la norma ANSI C55.1 de 5.0 p.u. El sistema visto desde el terciario del transformador es un sistema con neutro aislado de tierra ( $X_0/X \rightarrow \infty$ ), por lo que los pararrayos serán de valor nominal igual al voltaje nominal fase-fase del sistema. Para este caso la energía que dispara el pararrayo es  $KJ/KV_{\text{nominal}} = 1.151$ .

#### Requerimientos por Maniobras

Las operaciones de conexión o desconexión del banco de condensadores provocan sobrevoltajes transitorios, como se ha mencionado, en el disyuntor y en el sistema mismo. Ante esta circunstancia existen dos opciones de protección:

- 1.- Tener un disyuntor libre de cualquier tipo de reencendidos.
- 2.- Tener un disyuntor el cual puede provocar reencendidos.

En la primera opción, al ser el disyuntor de un correcto funcionamiento mecánico y completamente libre de reencendidos o preencendidos, los condensadores no están sujetos a graves sobrevoltajes transitorios, puesto que: en la energización del banco se tendrán sobrevoltajes transitorios de aproximadamente 2.0 p.u y en la desenergización, en el peor caso, se tendrá sobrevoltajes transitorios de aproximadamente 3.1 p.u (secciones II.4.2.1 y II.4.2.2). Para este caso, según la norma ANSI C55.1,

la protección con pararrayos no es indispensable.

Para la segunda opción, los reencendidos en el disyuntor imponen a los condensadores elevados sobrevoltajes transitorios por lo que es necesario que sean protegidos con pararrayos. Igual que en el caso anterior, los pararrayos serán conectados fase-tierra y serán de voltaje nominal igual al voltaje fase-fase del sistema. En este caso la energía que disipará el pararrayo ante un reencendido es:  $KJ/KV_{nominal} = 0.0102$

Para sobrevoltajes transitorios por maniobras en otros elementos del sistema, se considera un sobrevoltaje de 2.5 p.u (normas de proyecto para líneas de 138KV INECEL), para el cual, los condensadores pueden soportar una frecuencia de ocurrencia de 4000 por año (ANSI C55.1); consecuentemente la protección con pararrayos para esta condición no es necesaria.

#### V.6 EVALUACION ECONOMICA

Los métodos de protección técnicamente factibles deben ser comparados económicamente, a fin de que de dicha comparación se pueda seleccionar aquel método que por ser más económico, es el más adecuado y cumple con los aspectos técnicos.

Para realizar la evaluación económica de este ejemplo, se asumen las siguientes condiciones:

- Se considera los costos grabados a los equipos empleados en la protección del banco de condensadores, con-

siderándolo al mismo como una parte separada del sistema. De otra manera, la alternativa más económica debiera ser analizada para establecer si es o no una inversión adecuada, desde el punto de vista de los requerimientos económicos del sistema.

- Los costos por instalación b,c,d (sección IV.2) son tomados como un porcentaje de los costos de adquisición de los equipos igual al 35% (41)
- Los costos por operación y mantenimiento anuales, son tomados como un porcentaje de los costos de instalación (10%) y son estimados para la vida útil de los equipos (normalmente 30 años) para una tasa de actualización del 8% (41)

#### Evaluación

1.- Protección por Fallas Internas de los Condensadores. Considerando que los fusibles son la primera línea de acción ante una falla interna de los condensadores, éstos, necesariamente, deben ser proveídos. Esta protección económicamente asciende a:

CUADRO V.V

Equipo	CAE	CI	VA <sub>COM</sub>	TOTAL
Porta-fusible	38.00	51.30	57.75	109.05
Hilo-fusible	2.25	3.04	3.42	6.46

Nota: costos considerados en dólares (US\$) (42)

El costo total por la protección con fusibles es 115.51 dólares.

## 2.- Protección por Desbalance.-

Técnicamente se han implementado dos opciones de protección por desbalance, los elementos involucrados y sus costos, básicamente, son los siguientes:

CUADRO V.VI (Opción 1)

Equipo	CAE	CI	VA <sub>COM</sub>	TOTAL
Transformador de potencial	830	1120.5	1261.68	2382.18
Transformador de distribución	650	877.5	988.07	1865.57
Esquema de protección (*)	7708	10405.8	11716.93	22122.73

(\*) precio incluye pararrayos

CUADRO V.VII (Opción 2)

Equipo	CAE	CI	VA <sub>COM</sub>	TOTAL
Transformador de corriente	700	945.0	1064.07	2009.07
Esquema de protección	4488	6058.8	6822.21	12881.01

Para la primera opción se tiene la posibilidad de usar un transformador de potencial o un pequeño transformador de distribución con los costos totales de: US\$ 24505.00 ó US\$ 23983.3, respectivamente. La segunda opción tiene un costo total de US\$ 14890.08.

Se desprende que el método de protección por desbalance implementando un banco de condensadores en doble Y sin

puesta a tierra es recomendado económicamente.

### 3.- Protección por Sobrecargas y Fallas Mayores

Los costos representativos de los equipos involucrados en esta protección son:

CUADRO V.VIII

Equipo	CAE	CI	VA <sub>COM</sub>	TOTAL
Transformador de corriente	700	1039.50	1170.47	2209.98
Relé de sobre-corriente	298	402.30	452.99	855.29
Transformador de potencial	830	1120.50	1261.68	2382.18
Relé de sobre-voltaje	337	450.95	507.83	958.78

El costo total de la protección por sobrecargas y fallas mayores es: US\$ 17301.13.

### 4.- Protección por Sobrevoltajes

Ante sobrevoltajes transitorios por maniobras, el banco de condensadores tiene dos métodos de protección cuyos costos son los siguientes:

CUADRO V.IX (Opción 1)

Equipo	CAE	CI	VA <sub>COM</sub>	TOTAL
Disyuntor li- bre de reencen- didos	32876	44382.6	49974.81	94357.41



CUADRO V.X (Opción 2)

Equipo	CAE	CI	VA <sub>COM</sub>	TOTAL
Disyuntor no libre de recendidos	22176	29937.6	33709.74	63647.34
Pararrayos	540	729.0	820.85	1549.85

Ante sobretensiones de origen atmosférico, técnicamente la protección con pararrayos es necesaria, por lo que debería ser seleccionada la segunda opción, que resulta ser la más económica pues su costo total es US\$ 65197.19. El inconveniente es encontrar en el mercado actual un disyuntor que cumpla con estas características.

#### Comparación con las Protecciones Existentes

Al momento, el banco de condensadores de la Subestación La Vicentina está protegido de fallas internas de los condensadores y desbalances de voltaje. Del presente ejemplo se deduce que deberían ser implementadas las protecciones de fallas mayores y sobretensiones transitorias.



## V.7 CALCULOS Y GRAFICOS

### A.- Parámetros Básicos

#### A.1 Reactancia de un condensador

$$X_c = \frac{KV^2}{MVA} \quad \begin{array}{l} KV = 7.96 \\ MVA = 0.2 \end{array}$$

$$X_c = -j 316.81 \text{ ohm}$$

#### A.2 Capacitancia de un condensador

$$C = \frac{1}{2 \pi f X_c}$$

$$C = 8.373 \text{ uF}$$

#### A.3 Reactancia equivalente por grupo (fase)

$$X_{ceq} = \frac{X_c}{M} \quad M = 10$$

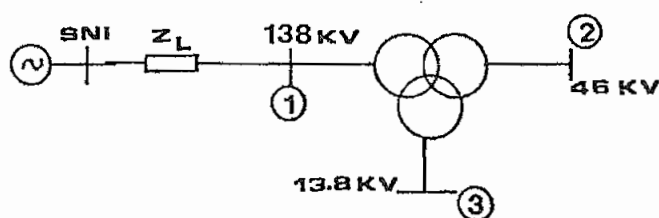
$$X_{ceq} = -j 31.68 \text{ ohm}$$

#### A.4 Capacitancia equivalente por grupo

$$C_{eq} = \frac{1}{2 \pi f X_{ceq}}$$

$$C_{eq} = 83.73 \text{ uF}$$

#### A.5 Inductancia equivalente



Corriente de cortocircuito trifásica en (1) =  $I_{cc} \text{ (1)}$

$$I_{cc} \text{ (1)} = 8568 \angle -83.22^\circ \text{ A}$$

$$I_B = \frac{MVA_B}{\sqrt{3} * KV_B} \quad MVA_B = 100$$

$$KV_B = 138$$

$$I_B = 418.37 \text{ A}$$

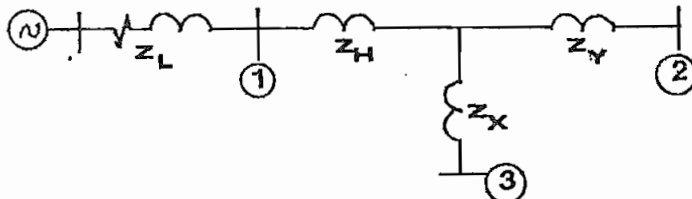
$$I_{cc} \textcircled{1} = 20.48 \angle -83.22^\circ \text{ p.u}$$

$$Z_L = \frac{1}{I_{cc} \text{ p.u}}$$

$$Z_L = 0.04883 \angle 83.22^\circ \text{ p.u}$$

$$Z_L = 0.005765 + j 0.04849 \text{ p.u}$$

Del diagrama anterior :



Reactancia equivalente en  $\textcircled{3}$  =  $X_{Leq} = j0.54099 \text{ p.u}$

$$Z_B = \frac{KV_B^2}{MVA_B} ; \quad KV_B = 13.8 ; \quad Z_B = 1.9044$$

$$X_{leq} = -j 0.54099 * 1.9044 = 1.0303 \text{ ohm}$$

$$\text{Inductancia equivalente : } Leq = \frac{X_{leq}}{2\pi f}$$

$$Leq = 2.733 \text{ mH}$$

## B.- Protección por fallas internas de los condensadores

### B.1 Corriente nominal del banco de condensadores

$$I_N = \frac{KVAR}{\sqrt{3} * KV} \quad KVAR = 6000$$

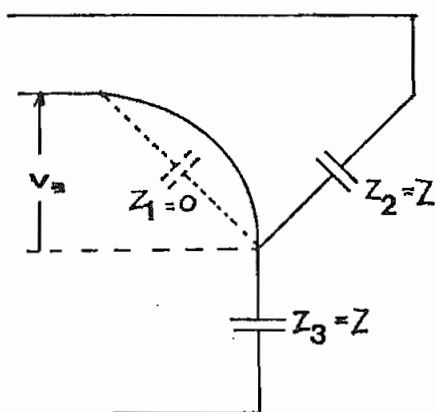
$$KV = 13.8$$

$$I = 251.02 \text{ A}$$

$$I_N * 1.25 = 313.78 \text{ A}$$

1.25, factor de modificación para la corriente nominal en bancos sin puesta a tierra (sección III.1)

## B.2 Corriente al cortocircuitarse un condensador



$$Z_1 = 0, \quad Z_2 = Z_3 = Z = X_{ceq}$$

$$V_a^{012} = Z^{012} I_a^{120}$$

$$I_a^0 = 0, \quad V_a^0 = 0$$

$$\begin{bmatrix} V_a^1 \\ V_a^2 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z^0 & Z^2 \\ Z^1 & Z^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix}$$

$$Z^0 = 1/3 (Z_1 + Z_2 + Z_3) = 2/3 Z$$

$$Z^1 = 1/3 (Z_1 + a^2 Z_2 + a Z_3) = -1/3 Z$$

$$Z^2 = 1/3 (Z_1 + a Z_2 + a^2 Z_3) = -1/3 Z$$

$$\begin{bmatrix} V_a^1 \\ 0 \end{bmatrix} = (Z/3) \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix}$$

$$I_a^1 = (1/Z) (2V_a^1), \quad I_a^2 = (1/Z) (V_a^1)$$

$$I_a = I_a^1 + I_a^2 = (1/Z) (3V_a^1)$$

$$I_N = V_a^1 / Z$$

$$I_a / I_N = 3, \quad I_a = 3 I_N$$

$$I_a = 313.78 * 3 = 941.38 \text{ A}$$

### B.3 Corriente nominal de cada condensador

$$I_{nc} = I_N / M$$

$$I_{nc} = 31.38 \text{ A}$$

### B.4 Requerimiento por transitorios de maniobra

sin reencendido:

$$I^2t = \frac{7.5 * V^2 * \sqrt{C^3}}{\sqrt{L}} \quad \begin{array}{l} C = 8.373 \text{ uF} \\ L = 2.733 \text{ mH} \\ V = 1.1 * \sqrt{2} * 7.96 \text{ kV} \end{array}$$

$$I^2t = 532.97 \text{ A}^2\text{seg}$$

Con reencendido: en la ecuación anterior con:

$$V = 2 * 1.1 * \sqrt{2} * 7.96 \text{ kV}$$

$$I^2t = 2131.89 \text{ A}^2\text{seg}$$

### B.5 Requerimiento por corriente de descarga

$$J = 1/2 * V^2 * C \quad V = 1.1 * \sqrt{2} * 7.96 \text{ kV}$$

$$J = 6419.37 \text{ joules}$$

## C.- Protección por Desbalance

C.1 Cálculo del porcentaje del voltaje de pick-up frente a la separación del tercer condensador fallado

$$RT = 7620/120 = 63.5$$

Voltaje de neutro frente al tercer condensador fallado referido al secundario del transformador de potencial ( $V_{033}$ )

$$V_{033} = 885/63.5 = 13.94$$

Refiriendo  $V_{033} = 13.94$  al voltaje de pick-up del relé (voltaje de pick-up del relé = 5.36) se tiene:  $13.94/5.36 = 2.6$  ó el voltaje  $V_{033}$  es igual al 260% del voltaje de pick-up.

## C.2 Burden del transformador del potencial

Relé (30*2)	60 voltamperios
Alambrado (30m de conductor #14 AWG)	6.5 voltamperios (46)
<hr/>	
Total	66.5 voltamperios

## C.3 Selección del TAP para el relé de sobrecorriente

$$RT = 75/5 = 15$$

$I_{n2} = 53.79$  A (corriente de neutro para el segundo condensador fallado, apéndice A)

$I_{n2}$  en el secundario del transformador  $I_{n2s}$ :

$$I_{n2s} = 53.79/15 = 3.586$$
 A

Con lo cual el TAP seleccionado es 3.5

## C.4 Corriente de neutro cuando 3 condensadores han sido separados del banco

$$I_{n3} = 83.67$$
 A (apéndice A)

En el secundario del transformador de corriente  $I_{n3s}$ :

$$I_{n3s} = 83.67/15 = 5.578$$
 A

Refiriendo al TAP del relé se tiene  $5.578/3.5 = 1.59$  ó

$I_{n3}$  es igual a 1.6 veces el valor de la corriente de TAP

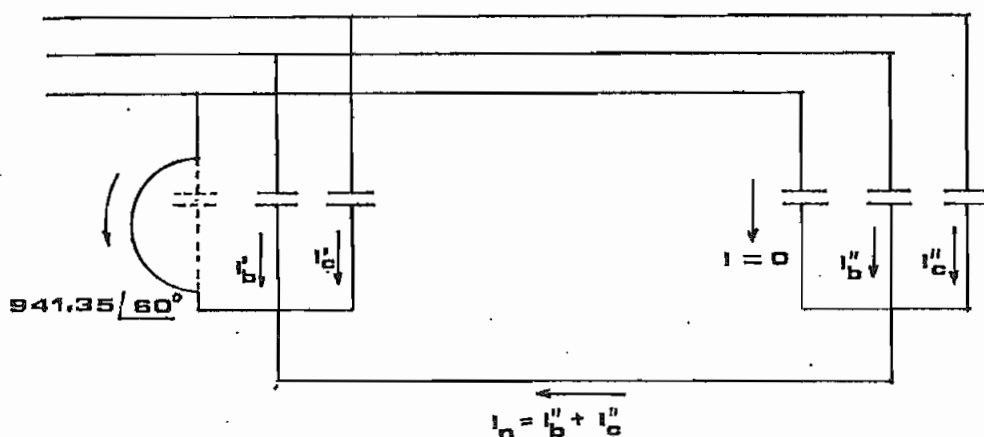
## C.5 Corriente durante el cortocircuito de un condensador para el banco conectado en doble Y.

Utilizando las ecuaciones de A.2:

$$I_a = 941.35 \angle 60^\circ \text{ A} = \text{corriente de cortocircuito}$$

$$I_b = 543.48 \angle -90^\circ \text{ A}$$

$$I_c = 543.48 \angle -150^\circ \text{ A}$$



$$I_b' = I_b'' = I_b/2$$

$$I_c' = I_c'' = I_c/2$$

$$I_n = I_b' + I_c'' = 470.67 \text{ / } 120^\circ \text{ A}$$

Corriente  $I_n = 470.67 \text{ A}$  reflejada al secundario del transformador de corriente es:

$$I_{ns} = I_n/15 = 31.58 \text{ A}$$

La corriente  $I_{ns}$  referida a la corriente de TAP del relé se tiene  $31.38/3.5 = 8.97$  ó 9 veces el valor de la corriente de TAP .

#### C.6 Burden del transformador de corriente

Relé (0.0718 * 2)	0.1436	ohm
Alambrado (30m conductor AWG#10)	0.11	ohm(46)
Otros	0.3	ohm(46)
-----	-----	-----
Total	0.5536	ohm



## D.- Protección por Sobrecargas y Fallas Mayores

### D.1 Corriente de Cortocircuito Trifásica en la barra de

13.8KV:  $I_{cc} \textcircled{3}$  :

$$I_{cc} = 8568 \angle -83.22^\circ \text{ (A) en la barra de 138KV, MUAB=100}$$

$$X_{eq} = j 0.54097 \text{ p.u (punto A.5 cálculos)}$$

$$I_{cc} \textcircled{3} = 1/X_{eq}$$

$$I_{cc} \textcircled{3} = 1.8484 \text{ p.u}$$

$$I_B = 4183.7$$

$$I_{cc} \textcircled{3} = 7733.15 \text{ A}$$

$I_{cc} \textcircled{3}$  en el secundario del transformador de corriente es:

$I_{cc} \textcircled{3} / 80 = 96.66 \text{ A}$ ; refiriendo al TAP del Relé se tiene  $96.66/4 = 24.17$  ó  $96.66 \text{ A}$  es igual a  $24.17$  veces el valor de la corriente de TAP del relé.

### D.2 Corriente transitoria de energización

$$I_{pmax} = V_{LL} \sqrt{\frac{2 C_{eq}}{3 L_{eq}}}$$

$$C_{eq} = 83.73 \text{ uF}$$

$$L_{eq} = 2.73284 \text{ mH}$$

$$V_{LL} = 13800 \text{ V}$$

$$I_{pmax} = 1972.3 \text{ A}$$

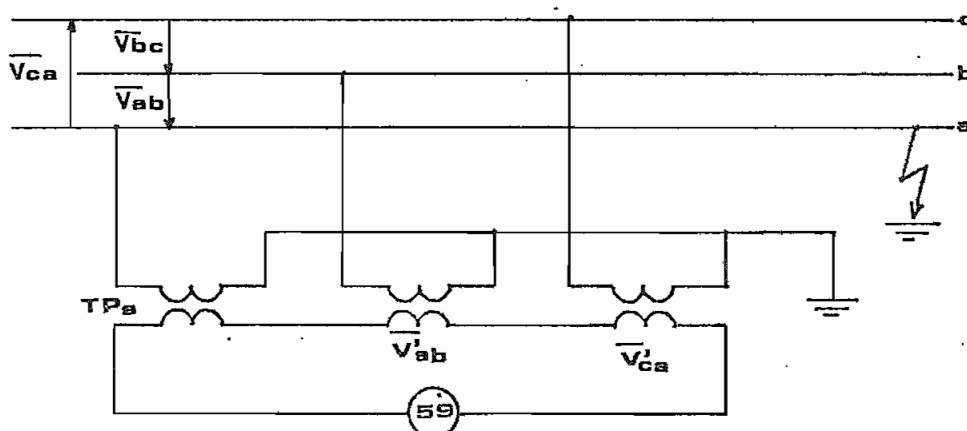
$$I_{pmax} * 1.25 = 2465.34 \text{ A}$$

En el secundario del transformador de corriente  $I_{pmax}$  es:  $I_{pmax}/80 = 30.82 \text{ A}$ ; refiriendo al TAP del relé se tiene  $30.82/4 = 7.7$  ó  $30.82 \text{ A}$  es igual a  $7.7$  veces el valor de la corriente de TAP del relé.

## D.3 Burden para los transformadores de corriente

Relé	0.05875	ohm	
Alambrado (30m de conductor AWG # 10)	0.11	ohm	(46)
Otros	0.3	ohm	(46)
-----			
Total	0.46875	ohm	

## D.4 Sobrevoltajes por fallas fase-tierra



$$\bar{V}'_{ca} = \bar{V}_{ca} / 120 = 115 \quad |120^\circ \quad \text{V}$$

$$\bar{V}'_{ab} = \bar{V}_{bc} / 120 = 115 \quad |-0^\circ \quad \text{V}$$

$$\bar{V}'_{ca} + \bar{V}'_{ab} = 115 \quad |60^\circ$$

$$|\bar{V}'_{ca} + \bar{V}'_{ab}| = 115 \quad \text{V}$$

115 V referido al voltaje de pick-up del relé

$115/15.92 = 7.2235$  ó 722.4% del voltaje de pick-up

## D.5 Burden para los transformadores de potencial

Relé	10	voltamperios	
Alambrado (30m de conductor AWG # 10)	6.5	voltamperios	(46)
-----			
Total	16.5	voltamperios	

## E.- Protección por Sobrevoltajes

E.1 Carga requerida para llevar a los condensadores a un voltaje igual a su BIL:

$$Q = C * BIL \quad BIL = 95 \text{ KV}$$

$$Q = 83.57 * 95 * 10 \text{ (cuolombs)} \quad C = 83.57 \text{ uF}$$

$$Q = 7.94 \text{ (cuolombs)}$$

E.2 Requerimiento de pararrayos debido a las ondas viajeras percibidas en el primario del transportador.

El sobrevoltaje transmitido del primario al terciario, cuando en este último se tiene un condensador, es (40):

$$E_3 = \sqrt{3} * M * E_1$$

Donde:  $E_3$  = máximo sobrevoltaje en el terciario

$E_1$  = nivel de protección del pararrayos en el primario

$$N = \text{relación de transformación} = 13.8/138 = 0.1$$

El pararrayos del primario es ASEA clase 10KA, 120KV nominal, 338 KV pico para ondas de 8/20 seg a 10KA.

$$E_3 = \sqrt{3} * 0.1 * 338 = 58.54 \text{ KV}$$

Refiriendo al voltaje nominal de los condensadores :

$$58.54/7.96 = 7.35$$

7.35 veces el valor del voltaje nominal es mayor que el factor de 5.0 permitido para 4 sobrevoltajes por año (ANSI 55.1), por lo que es necesaria la protección con pararrayos.

E.3 Energía disipada por el pararrayo ante sobretensiones por descargas atmosféricas (apéndice C).

$$I = \frac{E_3}{Z_c} \quad Z_c = X_{ceq}$$

$$I = \frac{58.54 \text{ KV}}{31.74 \Omega} = 1844.46 \text{ A}$$

$$Q = \frac{IT}{2}$$

$$(*) \quad Q = 1/2 * 1844.46 * 400 * 10^{-6}$$

$$Q = 0.3689 \text{ cuoulombs}$$

$$J = V_{10} * Q$$

$$KV_{10} / KV_{nominal} = 47.7 / 15.3 = 3.12$$

$$KJ = 3.12 * KV_{nominal} * 0.3689$$

$$\frac{KJ}{KV_{nominal}} = 1.151$$

(\*) El tiempo de  $T = 400$  (useg), de la tabla I, se desprende conservativo para este cálculo

$V_{10}$  = Voltaje del pararrayo para una descarga de 10 KA

Energía disipada por el pararrayos para una carga de 24 cuoulombs.

$$\frac{KJ}{KV_{nominal}} = 3.12 * 24 = 74.88$$

E.4 Energía disipada por el pararrayos ante sobretensiones por maniobras. (apéndice C)

$$I_m = \frac{[(V_{L-L} - V_c)^2 - (2V_p - V_{L-L})^2]^{1/2}}{(2\sqrt{L_s/C})} \quad A$$

$$t = \frac{2 * L_s * I_m}{2 V_p - V_{L-L}} \quad \text{seg} \quad \begin{array}{l} L_s = L_{eq} \\ C = C_{eq} \end{array}$$

$$J = 1/2 * I_m * t * V_p \quad \text{joules}$$

-  $V_p$  = nivel de protección del pararrayos para sobretensiones por maniobras = 32.8 KV (para pararrayos de 15 KVnominal)

-  $V_c = -2.37 * 2 * 7960 = -26679.42 \text{ V}$  (para el primer reencendido)

$$I_m = 280.73 \text{ A}$$

$$t = 3.3297 * 10^{-5} \text{ seg}$$

$$J = 153.298 \text{ joules}$$

$$\frac{\text{KJ}}{\text{KVnominal}} = \frac{0.1533}{15} = 0.0102$$

#### F.- Evaluación Económica

Considerando uniformes los costos por operación y mantenimiento, para la vida útil del equipo, se tiene:

$$VA_{COM} = \sum_{i=1}^n \frac{COM^i}{(1+r)^i}$$

$$VA_{COM} = COM * \frac{(1+r)^n - 1}{r (1+r)^n}$$

$$f = \frac{(1+r)^n - 1}{r (1+r)^n} = 11.26 \text{ para } r = 8\%$$

$$CI = 1.35 * CAE$$

$$COM = 0.1 * CI$$

$$TOTAL = CI + VA_{COM}$$

CAE = costo de adquisición de los equipos

CI = costo de instalación

COM = costo por operación y mantenimiento

$VA_{COM}$  = valor actual del COM

TIEMPO EN SEGUNDOS

100

10

1

1

10

mínimo tiempo de despeje

0

25T

10% 50%

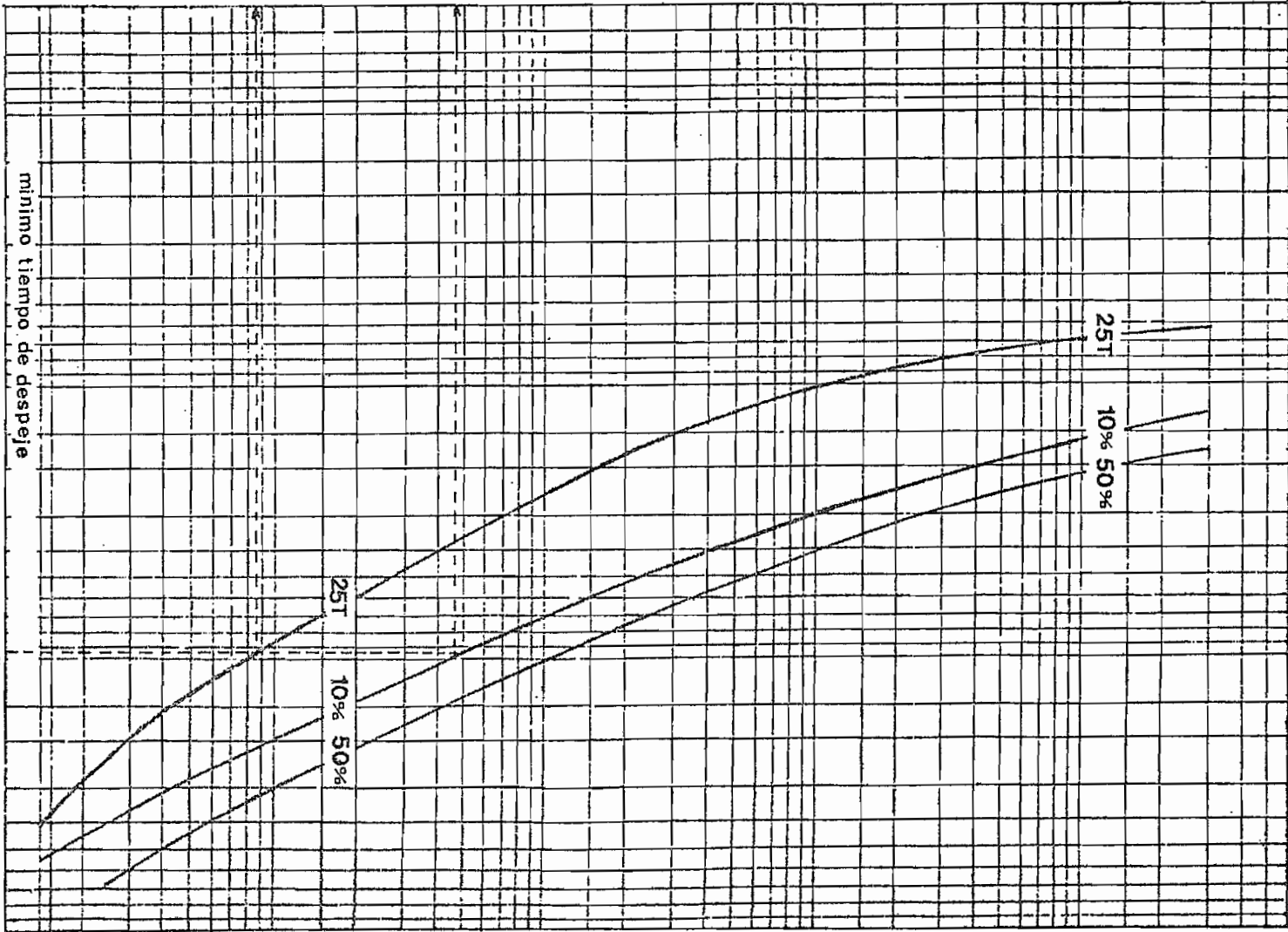
25T

10% 50%

1000

CORRIENTE EN AMPERIOS

GRAFICO V.A



CURVAS TÍPICAS  
PARA EL RÉLE  
CV-8

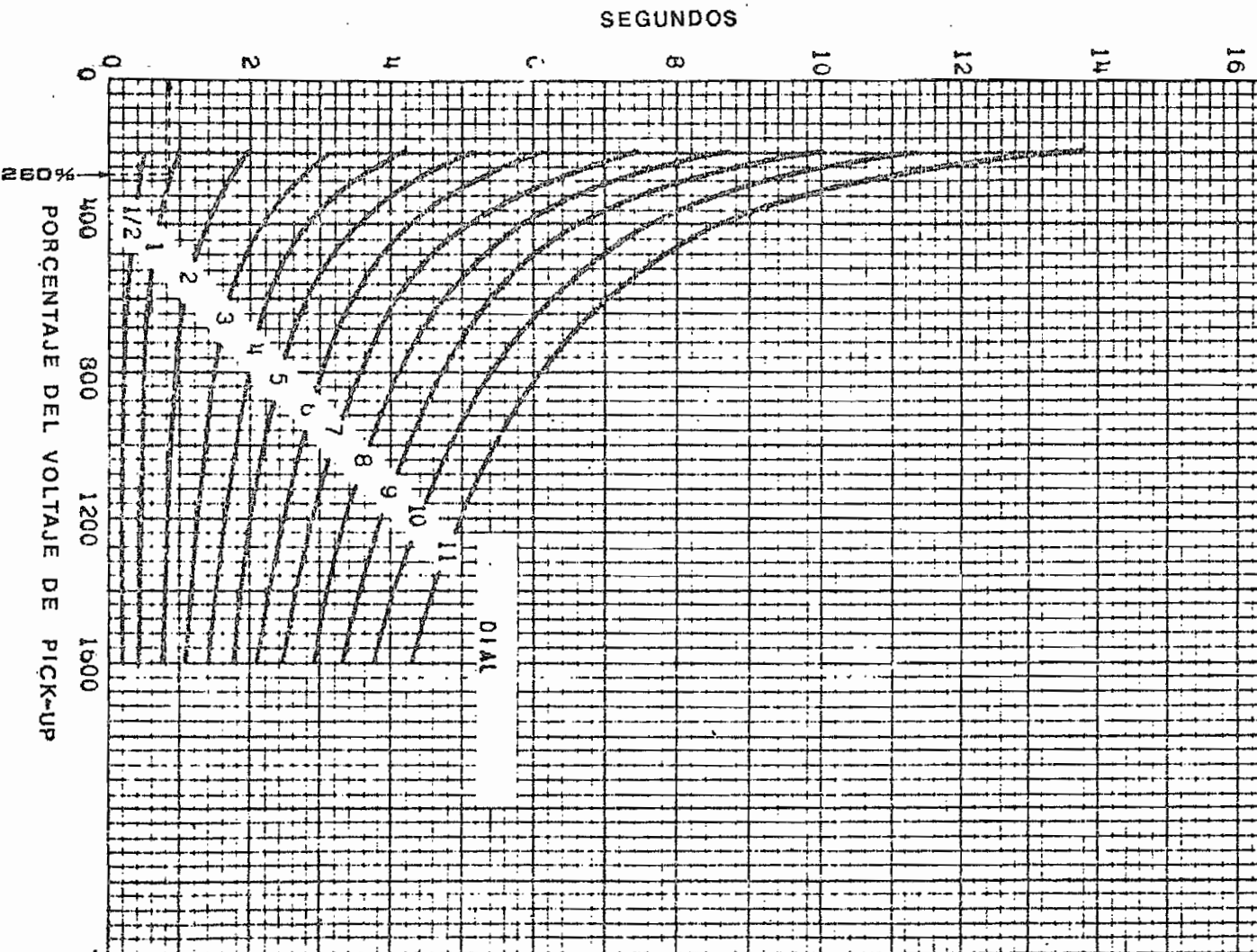


GRAFICO V.B

CURVAS TÍPICAS PARA EL RELE CO-11

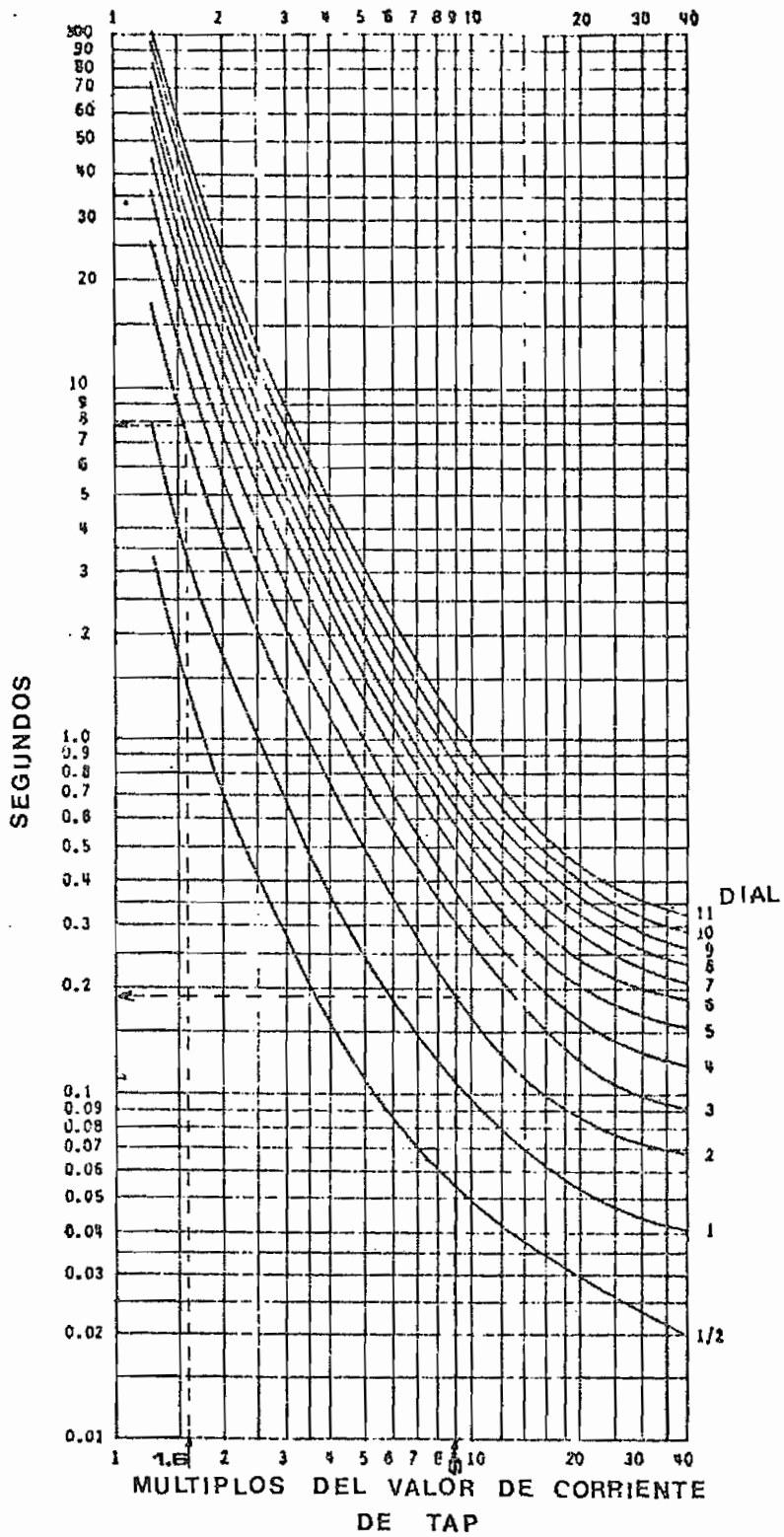


GRAFICO V.C



CURVAS TÍPICAS PARA EL RELE CO-11

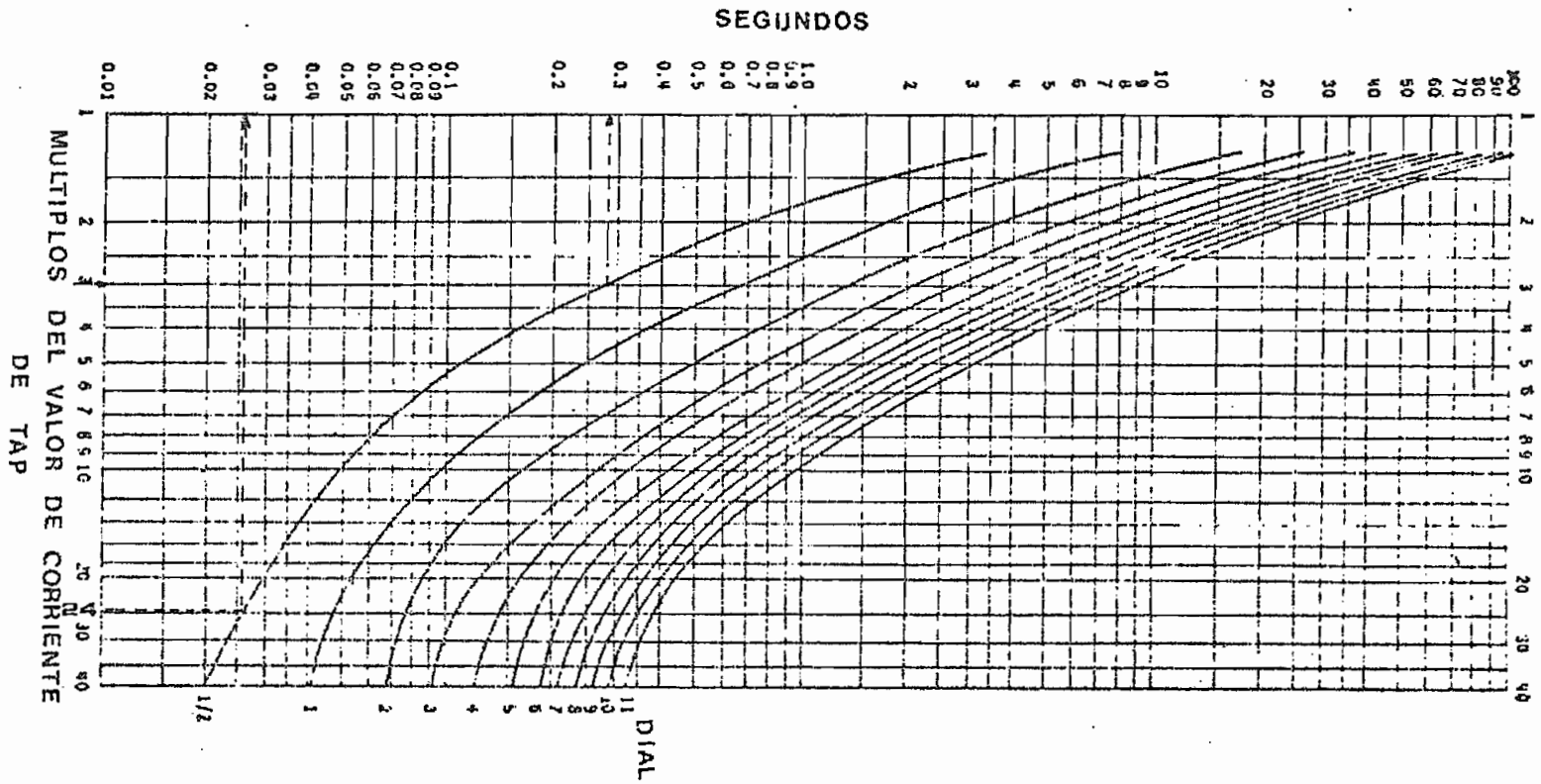


GRAFICO V.D

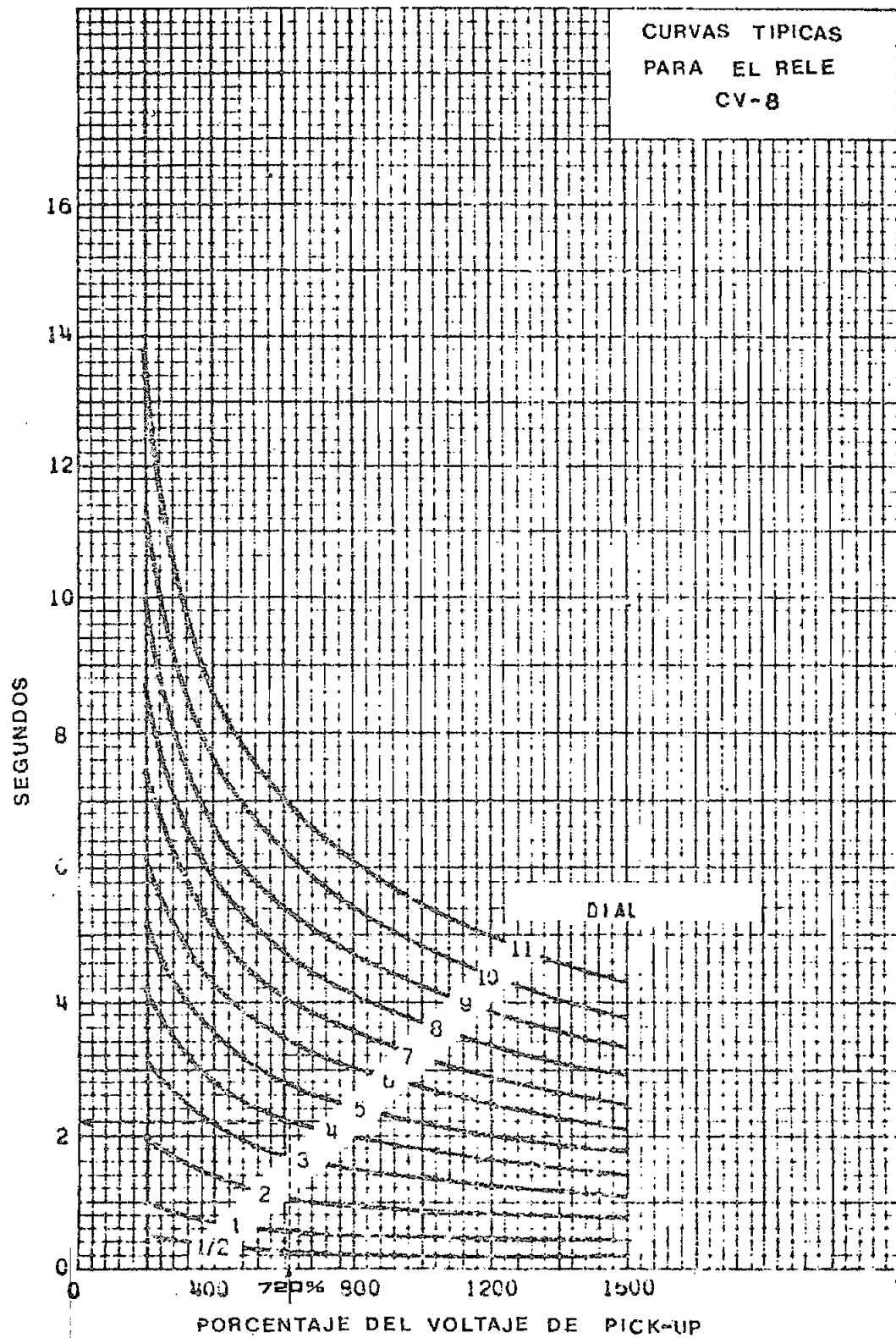


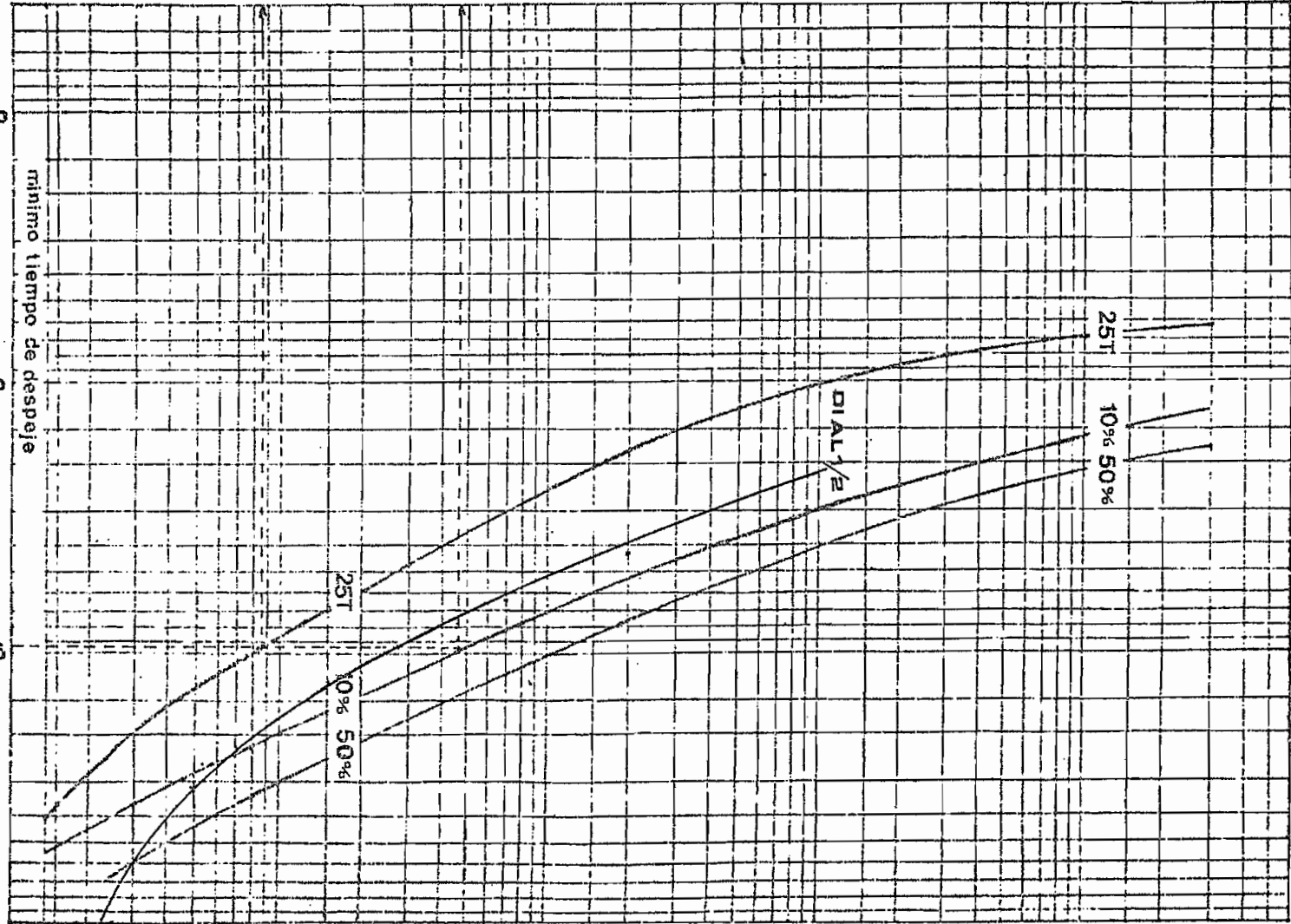
GRAFICO V.E'

TIEMPO EN SEGUNDOS

100

10

2



CORRIENTE EN AMPERIOS

GRAFICO V.F

1000 V.F

## V.8 ESPECIFICACIONES DE LOS ELEMENTOS DE PROTECCION

En esta sección, se trata de definir las características de los diferentes elementos que conforman el método de protección técnico-económica más adecuado para el banco de condensadores frente a cada una de las contingencias normales que pueden presentarse.

CONTINGENCIAS	PROTECCION
Fallas internas en los condensadores	Fusible
Desbalance del banco de condensadores	Conexión del banco de condensadores en doble Y; transformador de corriente mas esquema de protección por desbalance para bancos conectados en doble Y.
Fallas mayores	Sobrecorrientes: tres transformadores de corriente mas tres reles de sobrecorriente. Fallas fase-tierra: tres transformadores de potencial mas un rele de sobrevoltaje.
Sobrevoltajes transitorios	Pararrayos

### ESPECIFICACIONES

#### - Protección por fallas internas de los condensadores

Fusible : (Ref: Catálogo AD 38-663 Westinghouse)

- . Corriente nominal ..... 25 A
- . Voltaje nominal ..... 7.96KV/13.8KV
- . Máxima capacidad de ..... 6.0KA (RMS  
interrupción simétricos)
- . Frecuencia ..... 60 Hz
- . BIL ..... 110 KV

Portafusible : (Ref: catálogo AL 39-230 Westinghouse)

- . Voltaje nominal ..... 8 KV
- . Máxima capacidad de ..... 10 KA (RMS  
interrupción ..... simétricos)
- . Frecuencia ..... 60 Hz
- . BIL ..... 110 KV

- Protección por desbalance del banco de condensadores

Transformador de corriente: (Ref. catálogo PB 44-170  
Westinghouse)

- . Corriente nominal  
primaria/secundaria ..... 75A/5A
- . Voltaje nominal ..... 13.8KV
- . Clase de precisión ..... T 100
- . Capacidad térmica  
(x 1 segundo normal) ..... 130
- . Frecuencia ..... 60 Hz
- . BIL ..... 110 KV

Esquema de protección por desbalance:

- . Este esquema consta, básicamente, de dos  
relés de sobrecorriente, cuyas caracterís-  
ticas se dan en el ejemplo de aplicación y  
de un dispositivo para alarma.  
(Ref. catálogo PL 39-410 Westinghouse)

- Protección por fallas mayores

Transformador de corriente: (Ref. catálogo PB 42-924  
Westinghouse)

- . Corriente nominal  
primaria/secundaria ..... 400A/5A
- . Voltaje nominal ..... 13.8KV
- . Clase de precisión ..... T 100
- . Capacidad térmica  
(x 1 segundo normal) ..... 150
- . Frecuencia ..... 60 Hz
- . BIL ..... 110 KV

Transformador de potencial: (Ref. catálogo PB 44-216  
Westinghouse)

- . Voltaje nominal (primario) .. 14.4KV
- . Relación de transformación .. 120:1
- . Clase de precisión ..... 0.3 X

- . Capacidad térmica ..... 1500 Va
- . Frecuencia ..... 60 Hz
- . BIL ..... 110 KV

Características de los relés se han dado en el ejemplo de aplicación (Ref. catálogos IL 41-202P y IL 41-100H Westinghouse)

#### - Protección por sobrevoltajes

Pararrayos: (Ref. catálogo FD 38-312 Westinghouse)

- . Clase ..... estación  
(gapless metal oxide)
- . Voltaje nominal ..... 15 KV
- . Máximo voltaje de descarga para sobretensiones por maniobras ..... 32.8 KV (pico)
- . Máximo voltaje de descarga para onda de impulso de 8x20 useg y 10 KA ..... 39.7 KV (pico)
- . Capacidad de energía ..... 4.2 KJ/KV
- . BIL ..... 110 KV

Disyuntor: (Ref. catálogo PL 39-320 Westinghouse)

- . Número de fases ..... 3
- . Voltaje nominal ..... 14.4 KV
- . Máximo voltaje de operación ..... 15.5 KV
- . Voltaje de control para cierre y apertura ..... 125 VDC
- . Tensión nominal de 10 seg a frecuencia industrial en húmedo ..... 45 KV
- . Tensión nominal de 1 seg a frecuencia industrial en seco ..... 50 KV
- . Corriente nominal ..... 600 A
- . Corriente momentánea ..... 24 KA (RMS asimétricos)
- . Corriente de 1 seg ..... 16 KA (RMS simétricos)
- . Capacidad de interrupción medida a 14.4 KV ..... 8 KA (RMS simétricos)
- . Corriente para maniobras capacitivas ..... 450 A
- . Frecuencia ..... 60 Hz
- . BIL ..... 110 KV

## CAPITULO VI:

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

VI.1 CONCLUSIONES

VI.2 RECOMENDACIONES

## VI.1 CONCLUSIONES

### GENERALES AL TEMA

Se citan las siguientes conclusiones:

- La protección de los condensadores mediante los fusibles individuales (un fusible para cada condensador), representa la primera línea de protección del banco de condensadores y, por su costo, constituye el método de protección más económico.
- Al fallar el condensador, el fusible debe sacarlo de servicio antes que se produzca su explosión y, consecuentemente, antes que esto cause disturbios en el sistema o daños en el resto de condensadores y demás equipos de protección
- Un banco de condensadores puede seguir operando normalmente mientras la separación de servicio de unidades que han fallado no expongan al resto de condensadores a un sobrevoltaje mayor al 10% del voltaje nominal; por lo que, la protección por desbalance es necesaria, ya que actuará para sacar de servicio al banco de condensadores, frente a esta condición anormal.
- El neutro de un banco de condensadores en Y sin puesta a tierra está sujeto a sobrevoltajes transitorios, originados en maniobras y en descargas atmosféricas, por lo que, el transformador de potencial, utilizado para la protección por desbalance para este tipo de conexión, necesita ser protegido con un pararrayos



- conectado de neutro a tierra.
- El disyuntor que opera un banco de condensadores está sujeto a grandes esfuerzos, debido a que la corriente capacitiva está defasada 90 grados respecto al voltaje y los condensadores mantienen el voltaje pico del sistema en el momento de la apertura del disyuntor, por lo que, estos disyuntores deberán ser más robustos, especialmente para bancos de condensadores sin puesta a tierra, ya que, en tal caso, los voltajes de recuperación son de mayor magnitud.
  - El disyuntor del banco de condensadores actúa con las protecciones mediante relés, tanto por desbalances de voltaje como por fallas mayores, por lo que, el banco de condensadores es retirado de servicio (por actuación de las protecciones) únicamente cuando estas condiciones anormales se presentan.
  - El banco de condensadores debe ser protegido con un pararrayos por fase, cuyo valor nominal depende de la puesta a tierra del sistema.
  - Un banco de condensadores está sujeto a sobrevoltajes transitorios originados tanto en maniobras como en descargas atmosféricas, por consiguiente, la protección con pararrayos debe ser analizada desde estos dos puntos de vista.

## ESPECIFICAS AL EJEMPLO DE APLICACION

Se citan las siguientes conclusiones:

- En el banco de condensadores de la subestación La Vicentina, el fusible 25T brinda adecuada protección contra fallas internas de los condensadores.
- El fusible representa la mínima protección que debe tener un banco de condensadores, pues, de los gráficos de coordinación, se observa que éste actúa en primera instancia y luego, selectivamente, actúan las otras protecciones mediante relés y disyuntores. Además, esta protección es la de menor costo en relación a las demás.
- Para el banco de condensadores, conectado tanto en doble Y sin puesta a tierra como en Y sin puesta a tierra, el sistema de protección por desbalance debe operar frente a la separación del tercer condensador fallado.
- Tanto técnico como económico, el sistema de protección por desbalance implementando un banco en doble Y sin puesta a tierra presenta mayores ventajas que el sistema de protección implementando un banco en Y sin puesta a tierra.
- El máximo valor de la corriente transitoria de energización de 2465.34 A, para un banco de condensadores aislado, es menor que la corriente de cortocircuito del sistema (7733.15 A) y el valor  $I^2 t$  que genera

puede normalmente ser soportada por el fusible, por lo que, no es necesario incluir reactores que limiten esta corriente.

- Se ha encontrado que para el banco de condensadores, teóricamente, por factores técnicos y económicos, se puede implementar un disyuntor no libre de reencendidos, pero, se ha encontrado la dificultad de encontrar en el mercado actual un disyuntor que cumpla con esta característica.
- Para este banco de condensadores, la protección con pararrayos es necesaria debido al sobrevoltaje que impone una onda viajera que incida en el primario del transformador de potencia.
- El banco de condensadores debe estar bajo el apantallamiento de la subestación, puesto que, descargas atmosféricas directas, cargan a los condensadores a voltajes mayores que su BIL (287KV para descargas de 24 coulombs) y superan la capacidad de disipación de energía de los pararrayos de  $KJ/KV = 4.2$ , que es menor del impuesto por esta descarga de  $KJ/KV = 74.88$ .
- Los pararrayos destinados a proteger el banco de condensadores, a más de cumplir con los criterios de selección deben tener suficiente capacidad para disipar la energía asociada con las sobrecorrientes originadas en maniobras o descargas atmosféricas, que para el caso son:  $KJ/KV_{nominal} = 0.0102$  y  $KJ/KV_{nominal} = 1.151$

respectivamente.

- En el banco de condensadores de la Subestación La Vicentina, es necesario disponer de un pararrayo conectado neutro-tierra, pues, técnicamente el máximo sobrevoltaje esperado es de 3.8 p.u del voltaje nominal fase-neutro y, al ser el transformador de 14.4 KV nominal, estaría sometido a un sbrevoltaje del 210%.

## VI.2 RECOMENDACIONES

Se citan las siguientes recomendaciones:

- En el banco de condensadores de la Subestación La Vicentina, se recomienda utilizar el fusible 25T en lugar del fusible 30T actualmente utilizado.
- Se recomienda revisar el sistema de protección por desbalance (a la fecha en mal estado) y calibrarlo para que opere frente al aislamiento del tercer condensador fallado.
- En futuras instalaciones de bancos de condensadores, por efectos de protección, se aconseja implementar la conexión en doble Y sin puesta a tierra.
- La protección contra sobrecorrientes por fallas mayores es recomendada por la selectividad que se debe conservar con las protecciones del sistema.
- Es recomendable utilizar pararrayos de voltaje nominal igual al del sistema y conectados fase-tierra, debido a los sobrevoltajes transitorios originados en descar-

gas atmosféricas.

- Para instalaciones de bancos de condensadores se deberá utilizar disyuntores que tengan suficiente capacidad para manejar las corrientes capacitivas.
- Se aconseja también, efectuar un estudio de la puesta a tierra y conexión del banco de condensadores, pues, en la presente tesis, se ha partido de una configuración ya seleccionada.

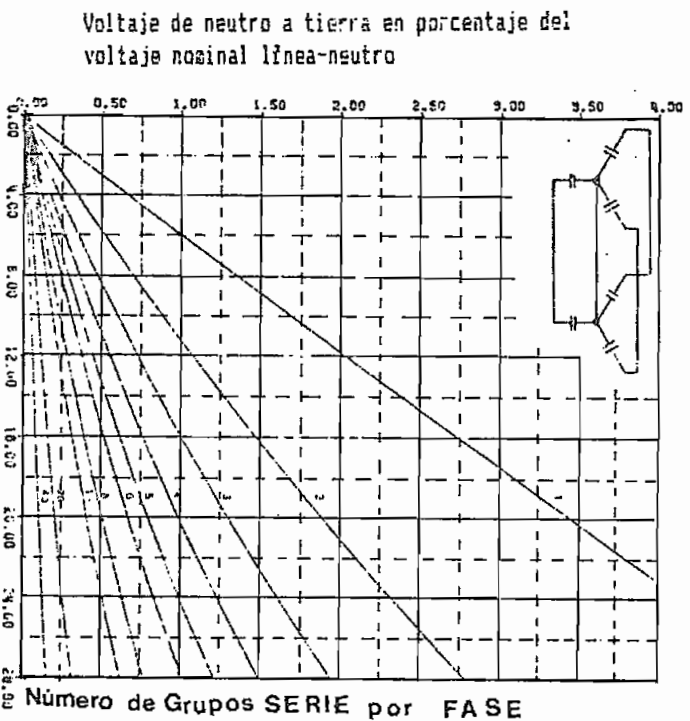
\*

## . APENDICE A

### CALCULO DEL DESBALANCE POR SEPARACION DE UNIDADES CON FALLA

Para cada una de las diferentes configuraciones de bancos de condensadores es posible calcular el desbalance debido a la separación de condensadores que han fallado con los siguientes parámetros (7).

**BANCOS DE CONDENSADORES EN DOBLE Y.- (Y-Y)**



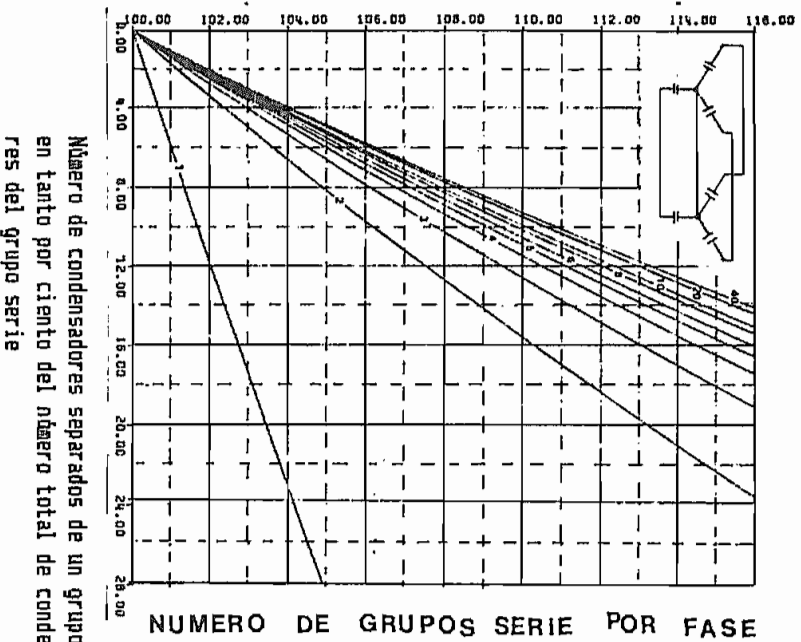
$$\% V_{GN} = \frac{100 N}{5X(M-N) + 5N}$$

M= No. de unidades por grupo  
 X= No. de grupos serie  
 N= No. de unidades separadas

Número de condensadores separados de un grupo serie en tanto por ciento del número total de condensadores del grupo

**Gráfico A1. Voltaje del neutro del banco de condensadores a tierra en función del número de condensadores aislados de un grupo serie.**

Voltaje resultante en porcentaje del voltaje nominal de los condensadores



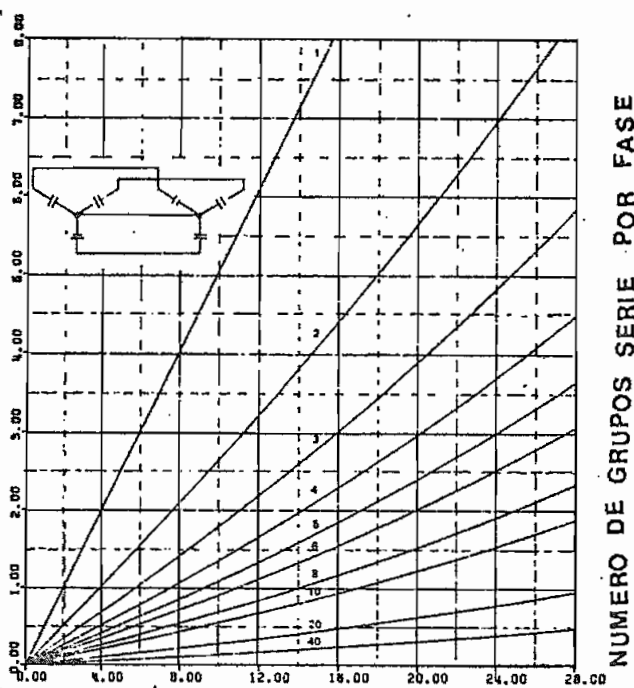
Número de condensadores separados de un grupo serie en tanto por ciento del número total de condensadores del grupo serie

$$\Delta V_x = \frac{600 M X}{6X(M-N)+5N}$$

- M = No. de unidades por grupo
- X = No. de grupos serie
- N = No. de unidades separadas

Gráfico A2. Voltaje en el resto de condensadores de un grupo serie en función del número de condensadores separados del grupo.

Corriente de neutro en porcentaje de la corriente nominal de fase



Número de condensadores separados de un grupo serie en tanto por ciento del número total de condensadores del grupo

$$\% I_n = \frac{300 N}{6X(M-N) + 5N}$$

M = No. de unidades por grupo

X = No. de grupos serie

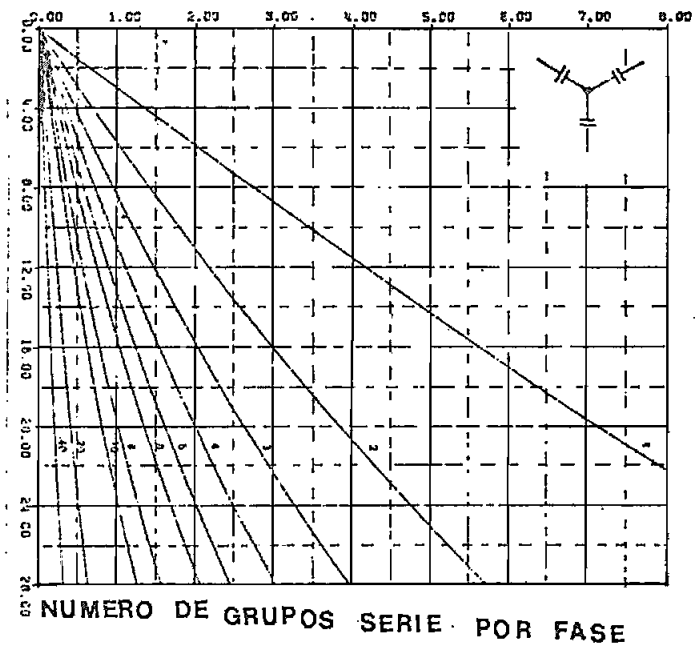
N = No. de unidades separadas

Gráfico A3. Corriente de neutro en función del número de condensadores aislados del grupo.



BANCO DE CONDENSADORES EN Y SIN PUESTA A TIERRA

Voltaje resultante neutro-tierra en porcentaje del voltaje nominal línea-neutro



Condensadores removidos de un grupo serie en porcentaje del número de unidades del grupo

$$\% V_{GN} = \frac{100 N}{3X(M-N) + 2N}$$

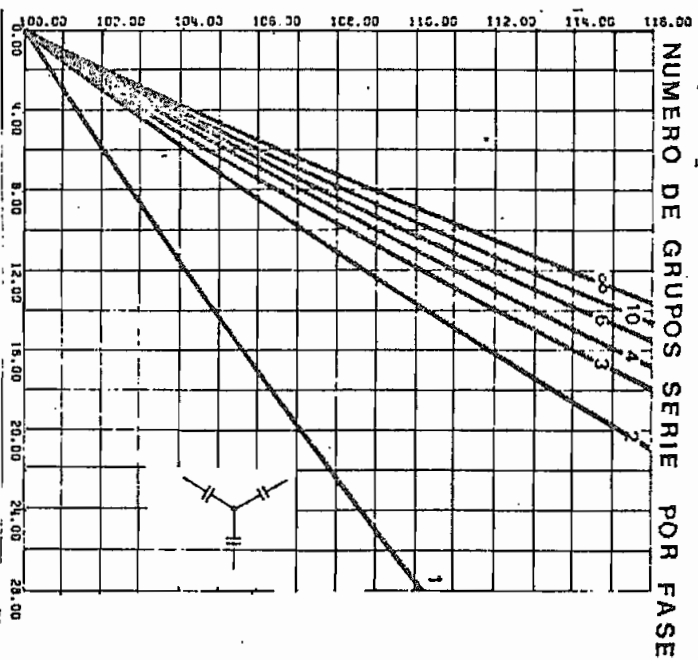
M = No. de unidades por grupo

X = No. de grupos serie

N = No. de unidades separadas

Gráfico A4. Voltaje del neutro del banco de condensadores a tierra en función del número de unidades separadas del grupo.

Voltaje resultante en porcentaje del voltaje nominal de los condensadores



Condensadores removidos de un grupo serie en porcentaje del número de unidades del grupo

$$\Delta V_x = \frac{300 M X}{3X(M-N)+2N}$$

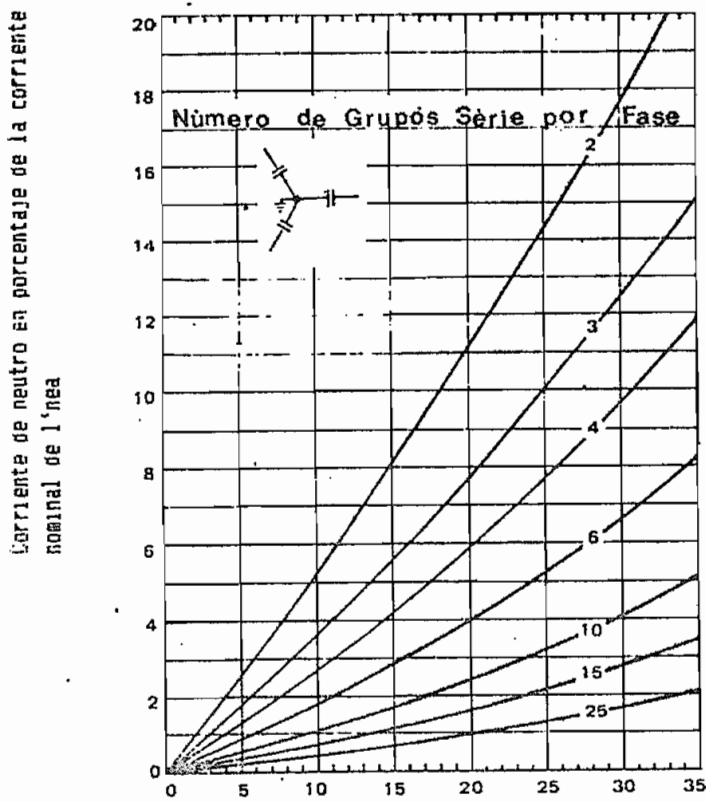
M = No. de unidades por grupo

X = No. de grupos serie

N = No. de unidades separadas

Gráfico A5. Voltaje en el resto de condensadores de un grupo en función del número de unidades separadas del grupo.

## Bancos de Condensadores en Y con Puesta a Tierra



Número de condensadores separados de un grupo serie en tanto por ciento del número total de condensadores del grupo serie

$$\% I_n = \frac{100 N}{X(M-N) + N}$$

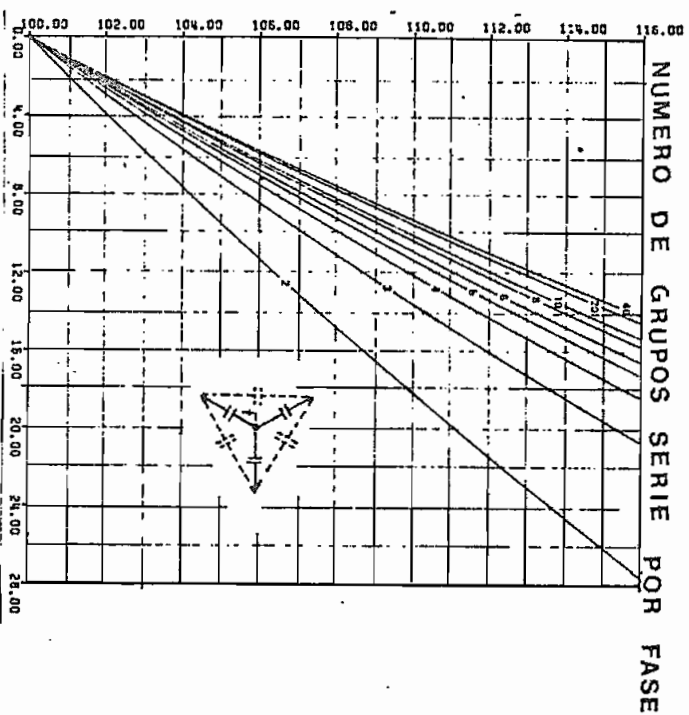
M = No. de unidades por grupo

X = No. de grupos serie

N = No. de unidades separadas

Gráfico A6. Corriente de neutro en función del número de condensadores separados del grupo serie.

Voltaje resultante en porcentaje del voltaje nominal de los condensadores



Número de condensadores separados de un grupo serie en tanto por ciento del número total de condensadores del grupo

$$\Delta V\% = \frac{100 M X}{X(M-N) + N}$$

M = No. de unidades por grupo

X = No. de grupos serie

N = No. de unidades separadas

Gráfico A7. Voltaje en el resto de condensadores en función del número de condensadores separados de un grupo serie.

## APENDICE B

### Cálculo del Desbalance Inherente

Las ecuaciones siguientes muestran una manera para la estimación del desbalance inherente como consecuencia de: tolerancias en la capacitancia de los condensadores, voltaje de alimentación desbalanceado tanto en magnitud como en ángulo de fase (7).

### Nomenclatura.-

- $I_N$  = Corriente de Neutro A.
- $\Delta C$  = Variación de la Capacitancia en pu.
- $VAR_B$  = Potencia reactiva nominal del banco de condensadores VA.
- $V_{LG}$  = Máximo valor voltaje línea-tierra V.
- $\Delta V_{NN}$  = Voltaje entre neutros V.
- $\Delta V_{LG}$  = Variación de  $V_{LG}$  en pu.
- $M$  = Número de condensadores por grupo.
- $VAR_U$  = Potencia reactiva nominal de un condensador VA.
- $V_C$  = Voltaje nominal del condensador V.
- $X = \frac{V_{LG}}{V_C}$  = número de grupos serie.
- $X_T$  = Número de grupos serie de tap a tierra.
- $\Delta V_{GT}$  = Voltaje desde el punto tap a tierra V.
- $V_{NG}$  = Voltaje de neutro a tierra V.

EFFECTO DEL DESBALANCE INHERENTE

Conexión del banco de condensadores	Tolerancia en la capacitancia de los condensadores	Variación de voltaje del sistema	
		en magnitud	en ángulo de fase
Doble Y: Protección por corriente entre neutros	$I_N = \frac{\Delta C * VAR_B}{6 * V_{LG}}$	$I_N = 0$	$I_N = 0$
Doble Y: Protección por diferencia de voltaje entre neutros	$\Delta V_{NN} = \frac{\Delta C * V_{LG}}{3}$	$\Delta V_{NN} = 0$	$\Delta V_{NN} = 0$
Y puesta a tierra protección por corriente de neutro	$I_N = \frac{\Delta C * VAR_B}{3 * V_{LG}}$	$I_N = \frac{\Delta V_{LG} * M * VAR_U}{X * V_c}$	$I_N = \frac{2 * M * V_{LG} * (\text{Sen} \theta / 2) * VAR_U}{X * V_c}$
Y puesta a tierra protección por voltaje de tap a tierra	$\Delta V_{TG} = \Delta C * V_{LG} \frac{X_T}{X} (X - X_T)$	$\Delta V_{TG} = 0$	$\Delta V_{TG} = 0$
Y sin puesta a tierra. Protección por voltaje de neutro	$V_{NG} = \frac{\Delta C * V_{LG}}{3}$	$V_{NG} = \frac{V_{LG}}{3}$	$V_{NG} = 2/3 (\text{Sen} \theta / 2) V_{LG}$

## APENDICE C

### Cálculo de Requerimientos Energéticos de los Pararrayos

#### 1.- Energía disipada por los pararrayos ante sobrevoltajes originados en maniobras (15).

El disyuntor, al servicio de un banco de condensadores, puede provocar reencendidos o preencendidos. Ante tal circunstancia, los pararrayos son útiles para protección de los condensadores. El correcto dimensionamiento de los pararrayos requiere conocer la capacidad de disipación de energía de los mismos ante este tipo de transitorios (15).

De manera conservativa, la energía disipada por el pararrayos se puede calcular asumiendo las siguientes características y en función de los siguientes parámetros:

#### Características:

- Voltaje de alimentación constante durante el transitorio ( $V_s$ ).
- Forma triangular para la sobrecorriente.
- Pararrayo ideal (nivel de protección del pararrayos constante ( $V_p$ )).

#### Parámetros:

- Inductancia de alimentación ( $L_s$ ).
- Voltaje de alimentación.
- Nivel de protección del pararrayos.
- Capacitancia de los condensadores ( $C$ ).

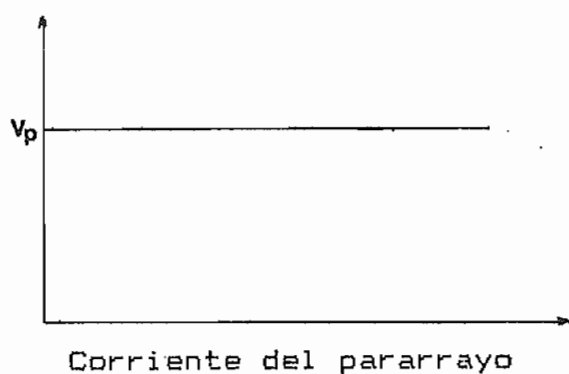


Figura 1: Característica ideal del pararrayo.

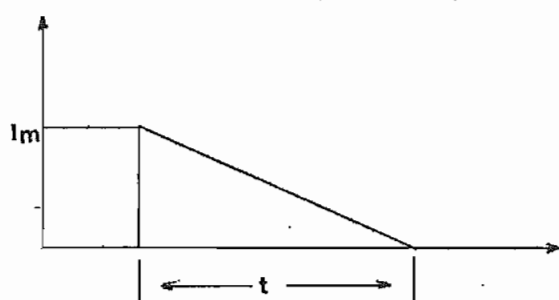
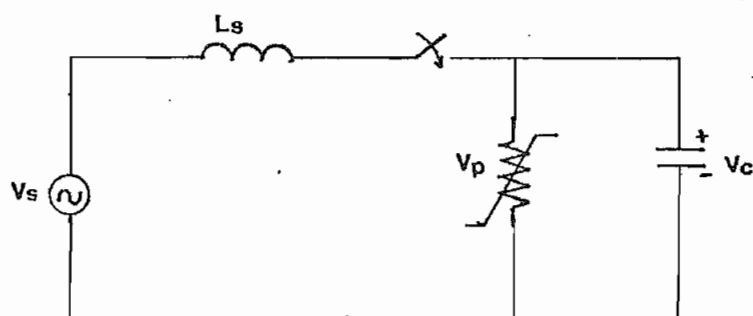


Figura 2: Forma de onda de la corriente ante reencendidos.

a) Ante reencendidos en bancos de condensadores en Y con puesta a tierra.



$$I_m = \left[ (V_s - V_c)^2 - (V_p - V_s)^2 \right]^{1/2} \sqrt{L_s / C} \text{ Amperios}$$



$$t = \frac{L_s I_m}{V_p - V_s} \text{ seg}$$

$$J = 1/2 I_m \cdot t \cdot V_p = 1/2 \frac{L_s I_m^2}{(V_p - V_s)} V_p \text{ Joules}$$

Para el primer reencendido:

$V_s$  = Voltaje pico línea-neutro

$V_p$  = Nivel de protección del pararrayos

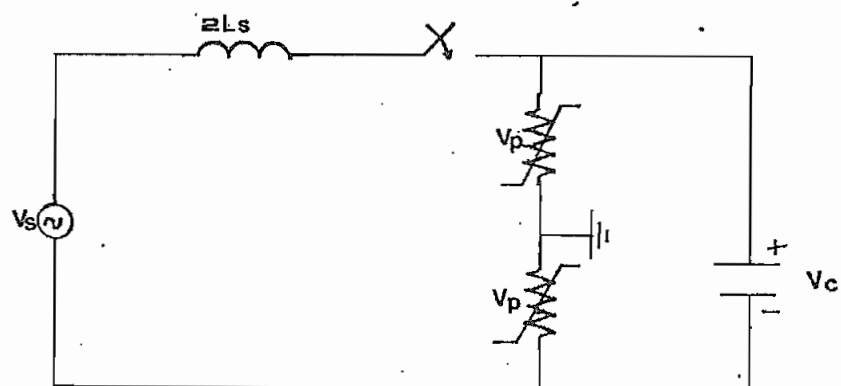
$V_c$  =  $-V_s$

Para subsiguientes reencendidos:

Igual que para el primer reencendido a excepción de

$V_c = -V_p$

b) Ante reencendidos en dos fases de un banco Y sin puesta a tierra.



$$I_m = \left[ (V_{L-L} - V_c)^2 - (2V_p - V_{L-L})^2 \right]^{1/2} / \sqrt{L_s/C} \text{ Amperios}$$

$$t = \frac{2 L_s I_m}{(2V_p - V_{L-L})} \text{ seg}$$

$$J = 1/2 I_m \cdot t \cdot V_p = \frac{L_s I_m^2}{(2V_p - V_{L-L})} V_p \text{ joules}$$

Para el primer reencendido:

$V_{L-L}$  = Voltaje pico línea-línea

$V_p$  = Nivel de protección del pararrayos

$V_c = -2.37 V_{L-L}$

Para subsiguientes reencendidos:

semejante al primer reencendido a excepción de

$V_c = -2V_p$

2.- Energía disipada por los pararrayos ante sobrevoltajes por descargas atmosféricas (15).

La energía disipada por un pararrayo (J) como consecuencia de una descarga atmosférica, en función del voltaje nominal del pararrayo (V) y la sobrecorriente (I), es expresada como:

$$J = \int V I dt$$

Considerando constante el nivel de protección del pararrayo ante la sobretensión aplicada. Como una aproximación:

$$V = V_{10}$$

Donde:  $V_{10}$  = nivel de protección del pararrayo para una sobrecorriente de 10 KA.

$$J = V_{10} \int I dt =$$

$$J = V_{10} * Q$$

Donde: Q = Carga contenida en la descarga (Tabla I).

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- ANSI C55.1 - 1968, "Stand for Shunt Power Capacitors" (IEEE Standard 18).
- 2.- F. Dates, P. Coleman and J. Zulaski, "Protect Capacitor Over Voltage", Electrical World, March 15, 1977.
- 3.- B. Stenerhang, L. Wirsen, "La Compactación palabra clave en los Condensadores", Boletín ASEA No. 3, 1984.
- 4.- L. M. Burrage, "Shunt Capacitor Tank Rupture Considerations", IEEE T-PAS, July 1977, Paper No. F 77567-5.
- 5.- L. Burrage, "Shunt Capacitor Tank Rupture Considerations", IEEE T-PAS, January 1976, Paper No. A 76 043-0.
- 6.- R. A. Pratt and W. Olive "Two-Fuse System Protects Capacitors", Electrical World, June 15, 1977.
- 7.- J. A. Zulaski, "Shunt Capacitor Bank Protection Methods", IEEE T-PAS, July 1981, Paper No. 81 SM 348-2.
- 8.- K. C. Behrendt and M. W. Ross, "Protect Distribution Substation Capacitor Banks at Low Cost", Transmission and Distribution, September 1983.

- 9.- J. Lapp, "Concepts in Systems Testing of Dielectrics in Capacitors", IEEE T-PAS, May 1974, Paper T 74 450-3.
- 10.- K. Sato, T. Shimizu, M. Oku, A. Tomago, "Characteristics of Film and for All-Polypropylene-Film Power Capacitor", IEEE T-PAS, February 1980, Paper No. F 80 197-4
- 11.- D. F. Miller, "Application Guide for Shunt Capacitors on Industrial Distributions system at Medium Voltage Levels", IEEE T-IA, January 1976, Paper No. IOO - 75 - 44.
- 12.- B. Legeman, "Fundamentals of Fusing to Minimize Case Rupture in Distribution Capacitor Banks", IEEE T-PAS, July 1978, Paper No. F 78 706 - 4.
- 13.- M. G. Ramos, "Estudio de Capacitores y su Aplicación para Sistemas de Distribución", CIER, Noviembre 1983.
- 14.- ANSI C37.0731 - 1973, "Application Guide for Capacitance Current Switching for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis", (IEEE Std 342. 1973).
- 15.- M. F. Mc Granyham, W. E. Ried, S. W. Law, D. W. Gresham, "Overvoltage Protection of Shunt - Capacitor Banks Using Mov Arresters", IEEE T-PAS, August 1984, Paper No. WM 032-9.

- 16.- E. W. Boehre, "Shunt Capacitor Energization with Vacuum Interrupters - A Possible Source of Overvoltage", IEEE T-PAS, September 1968, Paper No. TP 83 - PWR.
- 17.- H. M. Pflanz, G. N. Lester "Control of Overvoltage on Energizing Capacitor Banks", IEEE T-PAS, July 1962, Paper No. T 72541-1.
- 18.- Transients in Power Systems, Harolda Peterson
- 19.- J. R. Marck, "Innovative Fusing Techniques for Protecting Shunt - Capacitor Banks", IEEE T-PAS, July 1981, Paper No. 81 TD 709-5.
- 20.- Distribution Systems Protection Manual, MacGraw Edison Company
- 21.- R. H. Amundson, W. J. Huber, "Protective Characteristics of Current-Limiting Capacitor Fuses", IEEE T-PAS January 1976, Paper No. F 75 538 - 9.
- 22.- J. E. Harder, "Optimum Shuntz Capacitor Group Fusing", IEEE T-PAS, January 1976, Paper No. F 76 347 - 5.
- 23.- Transmission And. Distribution Systems, Westinghouse.
- 24.- Power System Protection, 3 Application, the Electricity Council, 1981.

- 25.- ASEA BICC Capacitors Limited, "Biprol All film the First choice for a step Mearer to Pure Power".
- 26.- A. Danemar, T. Lovkvist, "Reliability Calculations for Capacitor Banks", IEEE T-PAS, February 1983, Paper No. 83 WM 161 - 7.
- 27.- A. Danemar, E. E Eriksson, "Los fusibles interiores protegen mejor", ASEA, Boletín No. 3, 1984.
- 28.- P. Ayora, "Elementos de protección contra sobrevoltajes".
- 29.- H. Nishinkawa, K. Yokokura, S. Masuda, M. Okawa, H. Koike, T. Katos, "A Method of Evaulity o Circuit Breaker for a Capacitor Bank and Suppression of Restriking Overvoltage", IEEE T-PAS, July 1982, Paper No. 82 SM 455 - 4.
- 30.- R. Voshall, F. Holmes, "An Indirect Test for Testing Vacuun Interruptures for Capacitor Switching Duty", IEEE T-PAS, February 1980, Paper No. 80 285 - 7.
- 31.- P. Dahlstrom, ASEA Circuit Breakers Application GUIDE, January 1986, LB 05.0003 E.
- 32.- E. Zolorzano, P. Rush, "Application of Load Break Switches for switching High-Voltage AC Shunt Capacitor Banks", IEEE T-PAS, February 1970, Paper 70 TP 595 - PWR.

- 33.- J. Fish, J Clayton, "Lightning Protection of Shunt Capacitors", July 1972, Paper No. 72 560 - 1.
- 34.- R. Harner, R. Owen, "Neutral Displacements of Ungrounded Capacitor Banks During Switching", IEEE T-PAS, September 1970, Paper No. 71 TP 67-PWR.
- 35.- ASEA, "Power Capacitors type CHF", Catalogue KK 43-2 E, October 1976.
- 36.- AIEE Committee Report, "Report of a Survey on the Connection of Shunt Capacitor Banks", AIEE T-PAS, October 1958, Paper 58 - 1184.
- 37.- Allan Greenwood, "Electrical transients in power System; John Wiley & sons, Inc. New York, 1971.
- 38.- L. E. Bock, "Substation Capacitor Application", General Electric Company, October 1978.
- 39.- S. Hensley, "RMX Gapless Intermediate Class Riser Pole Surge Arrester", Westinghouse, October 1985.
- 40.- A. R. Hileman, "Surge Transfer Through 3-Phase Transformers", AIEE. T-PAS, October 1958, Paper No. 58 - 1160.
- 41.- G. MIER, "Recopilación de Datos y Apuntes personales", Marzo 1987.
- 42.- Datos de COINTEC "Lista de precios de la Empresa COINTEC.

- 43.- Westinghouse, stack type Capacitor Equipments; 1979.
- 44.- Westinghouse, "Type CV voltage Relay", 1984.
- 45.- Westinghouse, "Type CO (HI-10) Overcurrent Relay", 1984.
- 46.- P. Hidalgo, "Selección y Protección de un Banco de Capacitores Estáticos en Derivación en una Subestación de Distribución", Tesis de Grado.

\*