

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

"ANALISIS DEL EMPLEO DE BANCO DE CAPACITORES EN ALTA TENSION  
(NIVEL DE SUBTRANSMISION) PARA MEJORAR EL FACTOR DE POTEN-  
CIA DEL SISTEMA GUAYAQUIL"

TESIS DE GRADO

PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE:

INGENIERO EN ELECTRICIDAD

ESPECIALIZACION: POTENCIA

PRESENTADA POR:

FRANKLIN DARIO ENDARA RAMIREZ

GUAYAQUIL - ECUADOR

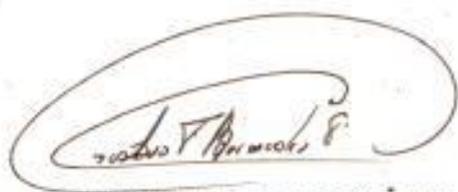
1986

## AGRADECIMIENTO

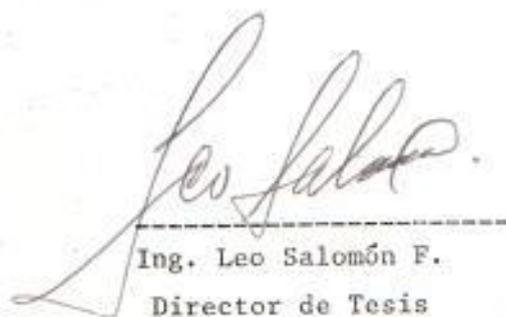
Al Ing. LEO SALOMON FASH,  
Director de Tesis, por su  
ayuda y colaboración pa-  
ra la realización de es-  
te trabajo.

DEDICATORIA

- A TODA MI FAMILIA



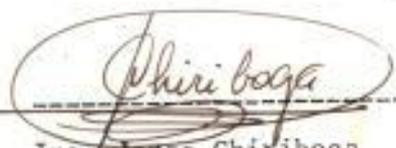
Ing. Gustavo Bermudez F.  
Subdecano de la Facultad  
de Ingeniería Eléctrica



Ing. Leo Salomón F.  
Director de Tesis



Ing. José Layana Ch.  
Miembro Principal

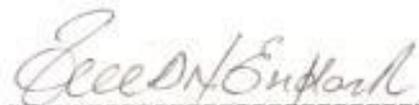


Ing. Jorge Chiriboga  
Miembro Principal

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL).

  
FRANKLIN DARIO ENDARA RAMIREZ

## RESUMEN

Partiendo de la necesidad, que ya se está comenzando a sentir, de que el sistema eléctrico de la ciudad de Guayaquil se encuentre en los próximos años equipado para poder controlar satisfactoriamente los problemas de operación, sobre todo de voltaje, que se puedan presentar por las restricciones de entrega de potencia reactiva de parte del Sistema Nacional Interconectado, tanto en condiciones normales diarias de operación como en caso de alguna contingencia; en esta tesis se plantea la utilización de banco de capacitores a nivel de subtransmisión (69 KV), como un medio de solución del problema.

Por lo cual, en el desarrollo del temario, primero se analiza y justifica plenamente la necesidad del empleo de los bancos de capacitores a 69 KV y luego de esto, se tratan los problemas y criterios técnicos, ingenieriles y económicos que conlleva la utilización de estos bancos.

## INDICE GENERAL

	<u>PAGS.</u>
RESUMEN -----	VI
INDICE GENERAL -----	VII
INDICE DE TABLAS -----	X
INDICE DE FIGURAS -----	XI
INDICE DE CURVAS -----	XIV
INTRODUCCION -----	15
CAPITULO I	
EMPLEO DE BANCO DE CAPACITORES A NIVEL DE SUBTRANSMISION EN EL SISTEMA GUAYAQUIL -----	17
1.1. NECESIDAD DEL USO DE BANCO DE CAPACITORES CONTROLABLES	
1.2. DISPONIBILIDAD DE EQUIPOS PARA UBICAR BANCOS DE CAPACI TORES A NIVEL DE 13.8 KV. -----	23
1.3. RAZONES PARA INSTALAR BANCOS DE CAPACITORES A NIVEL DE 69 KV. -----	25
CAPITULO II	
ANALISIS DEL USO DE BANCOS DE CAPACITORES A NIVEL DE SUBTRANS MISION -----	30
2.1. MOTIVOS POR LOS QUE NO ES ACONSEJABLE EL USO DE UNA SO	

LA UNIDAD -----	30
2.2. DETERMINACION DE LA CANTIDAD DE UNIDADES DEL BANCO DE CAPACITORES -----	45
2.3. CONEXIONES DEL BANCO DE CAPACITORES -----	57
CAPITULO III	
SISTEMAS DE DETECCION DE FALLAS -----	59
3.1. NECESIDAD DE EQUIPOS DE DETECCION DE FALLAS -----	59
3.2. EMPLEO DEL EQUIPO DE DETECCION DE FALLAS -----	60
CAPITULO IV	
COMPORTAMIENTO Y PROBLEMAS DE LOS BANCOS DE CAPACITORES	83
4.1. COMPORTAMIENTO DEL BANCO DE CAPACITORES DEBIDO A LA ENERGIZACION DE OTROS EQUIPOS ELECTRICOS -----	83
4.2. PROBLEMAS DE FERRORESONANCIA EN BANCOS DE CAPACI- TORES GRANDES -----	125
CAPITULO V	
PROTECCION Y SECCIONAMIENTO DE BANCOS DE CAPACITORES	131
5.1. PROTECCION DEL BANCO -----	131
5.2. SECCIONAMIENTO DE BANCOS DE ALTO VOLTAJE -----	132
5.3. SECCIONAMIENTO DE BANCOS DE BAJO VOLTAJE -----	157
CAPITULO VI	
ESTRUCTURAS REQUERIDAS -----	174

## CAPITULO VII

ANALISIS DE COSTOS -----	199
7.1. DETERMINACION DEL COSTO DE TODOS LOS COMPONENTES ---	199
7.2. EVALUACION Y ANALISIS COMPARATIVO -----	203
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES -----	210
BIBLIOGRAFIA -----	213

## INTRODUCCION

En el desarrollo de esta tesis se ha tratado de cubrir todos los temas más importantes que se necesitan explicar en un estudio de utilización de bancos de capacitores en alta tensión, para lo cual se ha diseñado el temario, de tal manera que en los siete capítulos se analicen todos los puntos principales, tanto en el aspecto técnico como económico, así:

En el primer capítulo se explica el empleo de este tipo de banco de capacitores, su necesidad y razones partiendo de una mención de la disponibilidad de equipos para ubicar bancos de capacitores a una tensión más baja.

En el segundo capítulo se enfocan ya aspectos más técnicos como la determinación de la cantidad mínima de unidades capacitoras del banco y el tipo de conexiones que se pueden llevar a cabo.

En el tercer capítulo se justifica la necesidad del empleo de equipo de detección de fallas como también se dan varias alternativas de empleo de estos equipos para los diferentes problemas que se presentan así como para las diferentes conexiones del banco de capacitores.

En el capítulo cuatro se realiza una análisis técnico de los proble-

mas y comportamientos que debe afrontar el banco, debido a los demás elementos eléctricos existentes a su alrededor.

En el capítulo cinco se tratan los tópicos de protección y seccionamiento del banco, tanto de alto voltaje como de bajo voltaje, utilizando ya sea fusibles o circuitos interruptores.

En el sexto capítulo se explica un método a seguirse para la determinación de las estructuras requeridas, según la configuración que se escoja del banco de capacitores.

Finalmente, en el séptimo capítulo se realiza un análisis de costos de los componentes del banco, y de las dos alternativas de diseño planteadas se hace una evaluación y un análisis.

## CAPITULO I

### EMPLEO DE BANCO DE CAPACITORES A NIVEL DE SUBTRANSMISION EN EL SISTEMA GUAYAQUIL

#### 1.1. Necesidad del uso de bancos de capacitores controlables

El capacitor, cuando es conectado en paralelo en el sistema de una empresa eléctrica, es una fuente estática de corriente reactiva. Por lo que es usado para completar la potencia reactiva que los generadores por capacidad o por economía, no pueden suministrar para servir la totalidad de la carga reactiva.

Teóricamente, toda carga, ya sea activa o reactiva puede ser transportada por el sistema de potencia. Sin embargo, el alto voltaje de envío requerido, para mantener un adecuado flujo de VAR, aumentando pérdidas y aumentando la capacidad requerida, crearía una situación intolerable en el sistema, tanto desde el punto de vista de operación como el económico. Por lo tanto, el capacitor se convierte en un elemento importante del equipo de un sistema eléctrico, debido a su capacidad de ser una fuente de corriente reactiva, la cual más aún puede ser instalada cerca de la carga. Se podrá notar entonces, que la disminución de

la corriente en el sistema, producto del empleo de capacitores, dará como resultado una mejora de la regulación de voltaje en la carga y una disminución de las pérdidas de la línea debido a que el transporte de un gran porcentaje de la carga reactiva del sistema es eliminado.

Ahora, el mismo efecto general también podría ser obtenido usando un condensador sincrónico en la barra de carga, donde el condensador sincrónico no es otra cosa que una máquina rotativa capaz de entregar potencia reactiva. Sin embargo, el tamaño de esta máquina y su costo elevado podrían dificultar su empleo en el sistema eléctrico.

Una comparación entre los capacitores en paralelo y los condensadores sincrónicos permite ver lo siguiente:

- 1) Con relación al nivel de voltaje, los condensadores sincrónicos requieren transformadores sobre los 18 KV, mientras que los capacitores en paralelo se los puede conectar directamente a cualquier nivel de voltaje.
- 2) Con relación a los KVA, los condensadores sincrónicos de 15.000 KVAR son los que presentan el mínimo tamaño económico, mientras que los capacitores en paralelo se los puede conseguir en unidades desde 50 KVAR.
- 3) Con relación al control, los condensadores sincrónicos tienen

- un control de variación continua, mientras que los capacitores tienen usualmente un control que cambia en pasos discretos.
- 4) Con relación a los VARS de salida, en los condensadores sincrónicos varían inversamente con el voltaje terminal, mientras que en los capacitores varían directamente con el cuadrado del voltaje terminal.
  - 5) Con relación al efecto sobre la regulación de voltaje, en los condensadores sincrónicos la regulación de voltaje es instantánea, mientras que en los capacitores proveen una regulación retardada en pasos.
  - 6) Con relación a la instalación, la de los condensadores sincrónicos es complicada y costosa, y la localización algunas veces prohíbe su uso, mientras que la de los capacitores es muy simple y versátil, y su localización no es ningún problema.
  - 7) Con relación a su mantenimiento, la de los condensadores sincrónicos es de un procedimiento caro como en cualquier máquina rotativa, mientras que en los capacitores el mantenimiento es mínimo.
  - 8) Con relación a la protección contra fallas internas, en los condensadores sincrónicos la protección normal, que generalmen

te es empleando disyuntores, depende del tamaño de la máquina, mientras que en los capacitores se emplean fusibles individuales y protección contra desbalance, la que depende del tamaño del banco.

- 9) Con relación a la protección contra fallas externas, en los condensadores sincros, los interruptores automáticos y los relés están normalmente asociados con el equipo sincro, mientras que en los capacitores, esta protección generalmente no es requerida.
- 10) Con relación al funcionamiento durante una emergencia en el sistema, como sería la necesidad de KVAR adicionales, en los condensadores sincros, los KVAR adicionales son detenidos en un corto tiempo aumentando la excitación, mientras que en los capacitores, los KVAR de salida varían con el cuadrado del voltaje del sistema, por lo que los capacitores usualmente no ofrecen contribución adicional alguna durante la emergencia.
- 11) En lo que se refiere a corrección del factor de potencia, en los condensadores sincros su instalación es demasiado costosa para justificar su uso exclusivamente para esto, pero en cambio se podría considerar el empleo de las unidades pico, las que pueden ser adecuadas y operadas como condensadores sincros. La ventaja de los capacitores es que su bajo

costo de instalación los hace a éstos muy prácticos.

- 12) Con relación a la ayuda que prestan en la estabilidad del sistema, los condensadores sincrónicos automáticamente ayudan al sistema durante una oscilación suministrando VARS, mientras que en los capacitores los VARS de salida varían con el cuadrado del voltaje terminal.
  
- 13) El uso de los condensadores sincrónicos ha disminuido marcadamente en los recientes años debido a que el costo por KVAR obtenido de las fuentes rotativas ha sido incrementado y el costo por KVAR obtenido usando capacitores ha disminuido. Partiendo de todo lo anterior mencionado, podemos llegar entonces a la conclusión que resulta más ventajoso el empleo de un banco de capacitores en un sistema eléctrico de potencia en lugar de los condensadores sincrónicos.

Ahora bien, la mayor parte de las cargas eléctricas en un sistema eléctrico son inductivas debido al amplio uso de motores, transformadores y otros equipos y aparatos inductivos. Las cargas inductivas requieren más corriente que las cargas resistivas para una misma determinada cantidad de energía. Este exceso de corriente causa pérdidas de energía y calentamiento en los generadores, en los transformadores, en los conductores y en otros aparatos de distribución limitando con esto la cantidad de energía útil que puede ser suministrada por el equipo.

El exceso de corriente también causa una excesiva caída de voltaje en los conductores, lo que puede reducir el voltaje en la carga.

Y son los capacitores los que neutralizan los efectos de la inductancia, el añadir una cantidad apropiada de capacitancia a una carga inductiva, hace posible minimizar la corriente necesaria para suministrar una determinada cantidad de energía. Esto reduce las pérdidas de energía y el calentamiento a lo largo del sistema e incrementa el voltaje entregado a la carga.

Desafortunadamente, demasiada capacitancia puede también causar problemas como sobrevoltajes y la inestabilidad de los generadores. Por lo que es deseable y aconsejable añadir o sustraer capacitancia según las variaciones de la carga.

Son los controles de los capacitores los que proporcionan un medio para sensar los requerimientos de capacitancias, y los encargados de añadir o remover a éstas, para así mantener un funcionamiento óptimo del sistema.

La carga reactiva del sistema puede variar ampliamente durante el ciclo diario de carga de día a día, de estación a estación y de alimentadora en alimentadora. Esto hace necesario que se desconecten todos los VARS en capacitores que se encuentren en exceso, durante las condiciones de mínima carga del sistema, pa-

ra así prevenir los problemas mencionados anteriormente como son los incrementos en las pérdidas, sobrevoltajes y la posible inestabilidad de los generadores.

En su forma más simple, estos elementos funcionales de un control de capacitores consisten de un sensor, un circuito de discernimiento y contactos los cuales son accionados para hacer operar el interruptor del capacitor.

Una vez que la necesidad del empleo del control de capacitores ha sido establecida, se debe entonces decidir qué tipo de control emplear, aunque por experiencia se tiene que uno o una combinación de los siguientes tipos de control proporcionarán una operación efectiva:

- Con control de tiempo.
- Con control de temperatura.
- Control sensando voltaje.
- Control sensando corriente.
- Control sensando VARS.
- Combinación de controles

#### 1.2. Disponibilidad de equipos para ubicar bancos de capacitores a nivel de 13.8 KV

La política seguida por la Empresa Eléctrica del Ecuador Inc.

con respecto al empleo de los bancos de capacitores, es la de utilizarlos, primero a nivel de alimentadoras en pequeños bancos fijos y también en bancos desconectables controlados por tiempo -generalmente de 300 KVAR, 600 KVAR, 900 KVAR y 1200 KVAR a nivel de 13.8 KV- colocándolos en los postes de distribución de energía eléctrica de la ciudad de Guayaquil y, segundo en las subestaciones, empleando bancos de capacitores desconectables controlados por reactivos de 1200 KVAR y 1800 KVAR, también a nivel de 13.800 voltios.

Actualmente a nivel de alimentadoras se tiene instalado 46.200 KVAR en banco de capacitores fijos y 53.700 KVAR en banco de capacitores desconectables, lográndose con esto compensar parcialmente las pérdidas producidas en las líneas de distribución, en los transformadores de las subestaciones y en las líneas de transmisión.

En las subestaciones a su vez se tienen instalados 18.600 KVAR lo que también contribuye a disminuir las pérdidas que se tienen en los transformadores de las subestaciones y en las líneas de transmisión. Aunque con este tipo de bancos de capacitores se compensa menos que con los anteriores, ahora podemos controlar la cantidad de potencia reactiva que vamos a suministrar al sistema.

Como se puede ver, si existe una disponibilidad de equipos pa-

ra instalar los bancos de capacitores a nivel de 13.8 KV, pero lo que sucede es que el problema es más de fondo, porque si se empieza a instalar una gran cantidad de KVARs ya sea en capacitores fijos o desconectables en los postes de la ciudad o en las subestaciones, llegará un momento en que perderemos el control de estos bancos por la imposibilidad física de tener un control directo sobre ellos.

Otro inconveniente que se presenta al instalar bancos de capacitores a nivel de 13.800 voltios, es la imposibilidad también de poder tener grandes paquetes de KVAR, lo cual restringe bastante los beneficios que se pudieran obtener.

La ciudad de Guayaquil es una ciudad en constante crecimiento y desarrollo, por lo que también los problemas de mantener un buen servicio eléctrico aumentan; en esta tesis entonces se trata de plantear los medios para poder encarar estos factores que incidirán en los deseos de mantener un servicio óptimo.

### 1.3. Razones para instalar bancos de capacitores a nivel de 69 KV

La razón principal de instalar bancos de capacitores a 69.000 voltios es la de poder manejar grandes paquetes de potencia reactiva. Estos bancos deberán ubicarse estratégicamente en determinados sitios. Sitios que pueden ser las subestaciones de elevación y reducción, que nos permitirían entonces poderlos conectar o desconectar según las necesidades del sistema, ya sea

por medio de operadores o de un control remoto.

Como se mencionó en el subcapítulo anterior, a nivel de 13.800 voltios existe el inconveniente del tamaño del banco de capacitores, por lo que en esta tesis se plantea el utilizar bancos de capacitores conectados a nivel de 69.000 voltios que es el voltaje de subtransmisión en el sistema eléctrico de Guayaquil.

Ahora el empleo de bancos a este nivel dan como resultado: un incremento en la corriente de carga para un nivel de transferencia de potencia dado, una disminución de las pérdidas ocurridas en las líneas, un mejoramiento en la regulación del voltaje del sistema, asunto que será tratado más profundamente en los siguientes capítulos, y que podría causar una inestabilidad del sistema.

El diseñar una subestación de bancos de capacitores implica muchas consideraciones; los fabricantes emplean normalmente paquetes ya pre-proyectados en su equipo, en un esfuerzo para encontrar las necesidades de la industria eléctrica.

Sin embargo, aunque las limitaciones de diseño de estos paquetes pre-proyectados son restricciones ya conocidas por los fabricantes, los usuarios muchas veces no están muy familiarizados con estos límites.

A menudo, más de un arreglo de un equipo de capacitores puede

ser usado para satisfacer una necesidad particular, por eso el entendimiento de las consideraciones de diseño de un banco de capacitores serán muy útiles cuando se realicen evaluaciones o se solicite información de entre varios tipos de equipos de capacitores.

En general, se puede decir que un banco de capacitores suministrará un adecuado servicio cuando:

- El banco es construído con componentes confiables.
- El banco tenga un diseño apropiado del esquema de protección.
- El banco sea colocado en una configuración eléctricamente estable.
- El banco sea operado dentro de los requerimientos de las normas de su diseño y construcción, por ejemplo: NEMA, ANSI, BS, VDE, IEC, etc.

Las razones para instalar bancos de capacitores a nivel de 69KV en el Sistema Guayaquil son las de mantener un adecuado voltaje del sistema y realizar un control de reactivo del parque generador sobre todo desde las 10H00 hasta las 22H00.

Se ha realizado entonces un estudio de flujo de carga del Sistema Guayaquil tanto para condiciones de máxima carga como de mínima carga, para de esta manera determinar el máximo paso del banco de capacitores trifásico a conectarse o desconectarse del

sistema. Máximo paso que está determinado por la conservadora norma americana, de no permitir una variación de voltaje en la barra donde está conectado el banco capacitor, más allá del 5/8 por ciento del voltaje de esta barra.

Donde esta norma del 5/8 por ciento nos asegura que el flicker producido ya sea por la conexión o desconexión del banco, se encuentre entre los límites de la línea de visibilidad y de la línea de irritabilidad. Por tanto, el usuario no verá afectada la calidad de su servicio eléctrico.

Se ha determinado por el flujo de carga, en condiciones de máxima carga, que el dimensionamiento del banco de capacitores es de 11.000 KVAR. Tamaño con el que se cumple la norma antes mencionada.

En condiciones de mínima carga, al emplear un banco de capacitores de 11 MVAR, se produce una variación de voltaje del 0.9 por ciento; y aunque esta variación se encuentra fuera de lo establecido por la norma, no es un inconveniente.

Por medio del flujo de carga, se determina que el tamaño del banco de capacitores, que nos permite estar dentro del 5/8 por ciento de variación de voltaje es de 7.2 MVAR. Es decir, en estas condiciones, el determinar cuál tamaño de banco de capacitores emplear debe ser sujeto a un análisis más de efectividad que

un análisis técnico.

Una vez planteadas las razones por las cuales el empleo del banco de capacitores a 69.000 voltios se hace necesario, se procedería a hacer un análisis de todos los aspectos concernientes en los siguientes capítulos.

## CAPITULO II

### ANALISIS DEL USO DE BANCOS DE CAPACITORES A NIVEL DE SUBTRANSMISION

#### 2.1. Motivos por los que no es aconsejable el uso de una sola unidad

El motivo principal por el cual no es posible el uso de una sola unidad es que las unidades de capacitores son construídas por los fabricantes hasta los 15 KV cuando se trata de un banco trifásico, y hasta los 25 KV cuando se trata de una unidad mono fásica.

Como el voltaje de línea a tierra para 69 KV es 40 KV, se requiere por lo tanto una combinación de unidades serie-paralelo para conseguir el voltaje apropiado y los requerimientos de KVAR.

En esta parte, se analizarán aspectos del diseño y aplicación de los capacitores de alto voltaje empleados para corregir el factor de potencia. Se pondrá énfasis en aquellos aspectos que afectan la confiabilidad, seguridad y economía de las instalaciones de capacitores.

### Construcción del capacitor

Las placas de un capacitor de potencia son hojas de aluminio. El dieléctrico es generalmente de algunas hojas finas de película de polipropileno o una combinación de película de polipropileno y de papel Kraft. La lámina y el dieléctrico son envueltas sobre un mandril dentro de un elemento capacitor o "sección". En algunos diseños, unas "lenguetas" metálicas hacen contacto con la lámina y sacan las conexiones eléctricas de cada sección. En otros diseños, la conexión eléctrica es hecha extendiendo las láminas más lejos de los extremos opuestos de la sección. Para capacitores de alto voltaje, cada sección es comunmente diseñada alrededor de 1 a 2.5 KV.

Algunas secciones son conectadas en una combinación serie-paralelo conectando las lenguetas como es requerido para permitir la aplicación del voltaje apropiado y la capacitancia a la "unidad" capacitadora.

La combinación serie-paralelo de las secciones es cubierta con una envoltura o "aislamiento de caja" e insertado dentro de un recipiente metálico. Una "resistencia de descarga" es conectado a través de los terminales de conexión. Una cubierta con terminales de conexión es ensamblado al recipiente, en cuyo punto la unidad es herméticamente sellada excepto por un orificio para impregnación. La unidad es puesta en vacío en seco, donde el vaciado es logrado en altas temperaturas, siguiendo al vaciado, se llena la unidad con un fluido die-

léctrico y luego se sella. El vacío a altas temperaturas elimina la humedad y los materiales volátiles y mantiene la completa impregnación de la unidad. El fluido dieléctrico llena todos los vacíos, mejorando el voltaje de distribución, evitando la descarga por efecto corona, mejorando el desempeño térmico, etc.

Como fue mencionado, cada sección individual es usualmente operada con un voltaje de operación normal en el rango de 1 a 2.5 KV. El dieléctrico consiste de varias capas de material aislante, así que una pequeña imperfección en cualquiera de las capas no traerá como resultado un capacitor defectuoso. El hacer la sección de voltaje demasiado baja hace que el grosor deseado de las hojas dieléctricas individuales sean tan finas que las hojas son difíciles de fabricar, y manipularlas en la fabricación del capacitor. El hacer la sección de voltaje demasiado alta resulta en un relativamente grueso espesor dieléctrico y en un aumento en la concentración del esfuerzo de voltaje en el borde de la lámina del plato. Esta concentración de esfuerzo aumentada incrementa la actividad corona y reduce la capacidad de sobrevoltaje del capacitor. La selección de la sección del voltaje es una optimización para dar una operación económicamente confiable.

El fluido dieléctrico es un aceite hidrocarbónico (algunos años atrás el fluido fue un tipo de bifenil policlorinado). El fluido actual que por ejemplo emplea la Westinghouse es el WEMCOL, que es un isopropilbifenil especialmente tratado, la McGraw Edison usa el "EDLJOL"

y así los otros fabricantes emplean sustancias similares con diferentes nombres comerciales.

#### Factor que afecta la confiabilidad

Casi todos los aspectos imaginables del diseño, fabricación y pruebas tiene un efecto sobre la confiabilidad fundamental de las unidades de capacitores. Además, casi todos los aspectos imaginables de la aplicación y del medio ambiente tendrán un efecto sobre la confiabilidad experimentada.

Lo que se tratará a continuación se concentrará sobre varios aspectos que afectan la confiabilidad fundamental o inherente de las unidades de capacitores.

La fiabilidad del dieléctrico básico del capacitor puede ser afectado por (al menos) el esfuerzo promedio, el esfuerzo corona crítico y el desempeño térmico.

La capacidad del esfuerzo promedio de un sistema dieléctrico depende de la capacidad y calidad de los materiales sólidos y líquidos usados tanto como la minuciosidad de la impregnación. El control de la limpieza y de la humedad durante la fabricación son importantes para evitar impurezas indeseables y daños a los materiales durante la fabricación.

El desempeño térmico de la unidad depende del calor generado en la u

nidad, las características de transferencia de calor de la unidad y la capacidad térmica del sistema dieléctrico. Las consideraciones térmicas pueden afectar la cantidad de KVAR, la cual puede ser introducida en una dimensión dada del recipiente.

Una consideración térmica es el posible deterioro del sistema dieléctrico a la temperatura de operación máxima de seguridad debido a la contaminación, materiales defectuosos, etc. Para detectar posibles defectos, algunos fabricantes realizan una prueba de factor de potencia a alta temperatura en todas las unidades de capacitores, además de las pruebas de rutina requeridas por las normas.

Esta prueba de factor de potencia a alta temperatura detectará la contaminación del fluido o los materiales dieléctricos defectuosos.

El efecto corona de la unidad depende de los bordes de la lámina y de las otras partes no uniformes. Los fabricantes tratan de que el fluido empleado tenga una resistencia dieléctrica alta (resistencia corona) sobre el rango entero de temperatura de operación de los capacitores de poder. Además, existen diseños de anillo corona (borde de la hoja laminada) que reducen substancialmente la concentración del esfuerzo de voltaje en el borde de la lámina. Esto hace el esfuerzo crítico más bajo, acercándolo al esfuerzo promedio.

El ciclo de impregnación y la técnica es extremadamente importante para asegurar una completa impregnación para un óptimo efecto corona.

Además de la prueba del dieléctrico básico, la fabricación del capacitor requiere tomar en cuenta para tener una confiabilidad en el balance de la construcción: integridad del soldado, calidad de la soldadura, durabilidad del acabado, preparación para el embarque, etc.

#### Factores que afectan la seguridad

Como con los factores que afectan la confiabilidad, la seguridad es afectada tanto por las características inherentes de la unidad capacitadora como por las del medio ambiente (sobrevoltaje, temperaturas excesivas, protección, etc.) en las cuales es operada. Probablemente el factor más importante que determina la seguridad es la confiabilidad anteriormente discutida. Solo una unidad que falla tiene una alta probabilidad de la ruptura de su tanque, causando peligro a las personas y medio circundante.

Otro asunto en la seguridad que a menudo es tomado en cuenta es la resistencia de descarga, la cual reduce el voltaje en los capacitores de alto voltaje desde el pico del voltaje nominal a 50 voltios en 5 minutos o menos. Estas resistencias de descarga reducen la probabilidad de un choque debido a un contacto inadvertido con un capacitor desenergizado.

Una cantidad substancial de pruebas de "ruptura de tanque" han sido hechas para reducir la probabilidad y violencia de la ruptura en el caso de falla del capacitor. Como un resultado de esta prueba, los

cambios que han sido hechos apuntan a:

1. Incremento en el tamaño de los terminales de conexión para evitar la vaporización de los terminales en las fallas de corriente del sistema.
2. Adición de un soporte interno para sostener las partes sólidas en el recipiente en el caso de una violenta ruptura, la cual abra el fondo de la unidad.

#### Factores que afectan las pérdidas

Las pérdidas (pérdida de energía) en un capacitor son dominadas por la pérdida dieléctrica, calentamiento del resistor de descarga, y la pérdida  $I^2R$  del conductor (lámina).

En los años recientes, mejoramientos substanciales han sido hechos para reducir las pérdidas dieléctricas del capacitor optimizando los materiales usados para los capacitores.

La película de polipropileno y los fluidos aislantes actualmente en uso tienen una muy baja pérdida dieléctrica sobre el rango de temperatura completa de operación de los capacitores de potencia. Los fluidos aislantes que se emplean no solamente tiene pérdidas mucho más bajas, sino que también resultan en capacitores con menores cambios en la capacitancia y pérdidas con la temperatura.

La pérdida de la resistencia de descarga es limitada por el requerimiento standard de reducir la tensión entre terminales a 50 voltios en 5 minutos o menos.

Esto fija el más alto valor de resistencia el cual es aceptable para un voltaje dado del capacitor, y así, la mínima cantidad de calor que será generada por esa resistencia.

Las pérdidas de conductor  $I^2R$  pueden ser afectadas por el diseño del capacitor, el número y localización de lenguetas, etc.

#### Factores que afectan la economía

Los KVAC, los cuales pueden ser construidos en un volumen dado son:

$$KVAC = 1000 (2\pi f) \epsilon_0 K_v \left(\frac{KV^2}{t}\right)$$

Donde:

$f$  = Frecuencia nominal (60 Hz)

$\epsilon_0$  = Permitividad del espacio libre,

$K$  = Constante dieléctrica efectiva del dieléctrico.

$v$  = Volumen del dieléctrico (área x espacio).

$KV$  = Voltaje RMS aplicado al capacitor en kilovoltios.

$t$  = Espesor del dieléctrico.

Esta fórmula no incluye el volumen de la lámina de metal, de la en -

voltura, etc. Avances substanciales han sido hechos en los recientes años en identificar materiales, los cuales puedan operar con altos esfuerzos (KV/t) de tal forma que con una constante dieléctrica (K) apenas baja, la cantidad de capacitancia en un volumen dado es incrementado.

El borde de la hoja laminado (diseño del anillo corona) ha reducido la concentración de esfuerzo y ha resultado en la capacidad para usar los materiales dieléctricos a un esfuerzo promedio un poco más alto, con mejorada confiabilidad.

Actualmente, los capacitores con dieléctrico papel/película pueden ser construidos con la misma confiabilidad en un volumen un poco más pequeño que los capacitores con dieléctrico todo película.

#### Aplicación de la unidad de capacitor

En la selección de los capacitores para una aplicación, básicamente cuatro aspectos necesitan ser considerados: voltaje, corriente, KVAC, y temperatura.

#### **Voltaje.-**

El límite recomendado de aplicación de sobrevoltaje para unidades de capacitores es ilustrado en la figura # 2.1. Esta figura aplica el voltaje a través del elemento activo del capacitor. (Nota: para u-

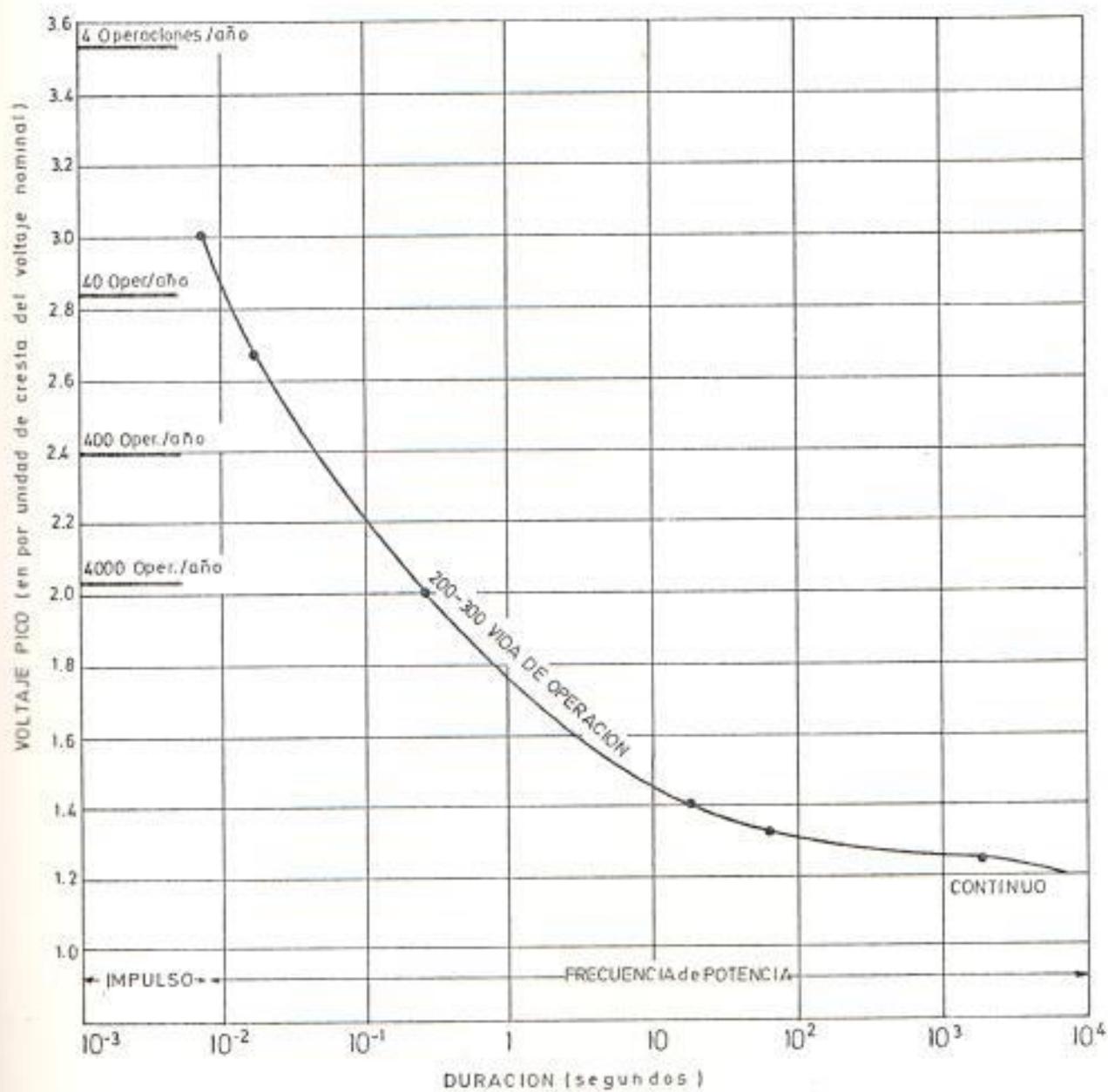


FIGURA 2.1 Guía de aplicación de sobrevoltajes de capacitores

nidades no conectadas al tanque, el "BIL" se aplica al aislamiento entre el elemento activo y el tanque. El "BIL" para unidades conectadas al tanque se refiere solamente a la resistencia de el o de los terminales del capacitor).

Algunas de las circunstancias, las cuales han resultado en un exceso de los límites recomendados incluyen:

- 1) El "RESTRICKING" de los cortacircuitos de capacitores o de los interruptores han producido voltajes en exceso de los límites de im pulso recomendados.
- 2) La subida de voltaje a través de los reactores limitadores de cor tocircuito o de sintonización, en serie con el capacitor ha resul tado en una más alta que la subida de voltaje recomendada.
- 3) La protección con un fusible del grupo de un banco trifásico de capacitores no aterrizado tiene, en el instante de que una unidad se cortocircuita, resultados de sobrevoltaje en las unidades de las fases no falladas que exceden el límite recomendado.
- 4) Si el voltaje de barra de la subestación sube continuamente más alto que el nominal, sobre los bancos con algunos grupos series, el incremento en el voltaje debido a la pérdida de algunas unidades en un grupo serie puede resultar en un voltaje en exceso del voltaje recomendado sobre el balance de las unidades en ese grupo.

Una aplicación conservadora consideraría el máximo voltaje aplicado (incluyendo cualquier aumento al voltaje cresta de las armónicas) más el desbalance máximo permitido.

- 5) Las armónicas altas, en adición a su característica de exceso de corriente y sobrecarga térmica, puede también añadir suficientemente a los voltajes de pico a pico a través del capacitor que ocasionen descargas parciales internas y una rápida degradación del dieléctrico. Tales aplicaciones pueden ocurrir cuando los capacitores en paralelo standards son aplicados a filtros de poder sobre la base de requerimientos de frecuencia fundamental y sin consideraciones de corrientes armónicas transientes, de corta duración y continuas.

Voltajes aplicados en exceso de los límites recomendados de aplicación hacen la unidad vulnerable a daño. Al grado que la confiabilidad de una instalación es importante, los voltajes en exceso del límite recomendado de aplicación deben ser evitados, para minimizar los riesgos asociados con un posible incremento en la probabilidad de falla.

En nuestro caso tendríamos que considerar también el problema de las grandes fluctuaciones de voltaje en los transformadores de INECEL que no tienen cambio de derivación bajo carga (LTC), tanto en los de 230/138 KV como de 138/69 KV.

### Corriente.-

El límite de sobrecorriente aplicable recomendado para unidades de capacitores se muestra en la figura # 2.2. El criterio de aplicación de sobrecorriente ha estado bajo consideración tanto de NEMA como de la IEEE; y sus recomendaciones pueden cambiar en un futuro cercano. También, la capacidad de sobrecorriente de los fusibles, interruptores automáticos, barra de trabajo, transformadores de corriente, etc., usados en equipos de capacitores, no siempre son las mismas que de las unidades de capacitores. Por estas razones, las aplicaciones que caen en el área sombreada de la figura # 2, deben ser revisadas de acuerdo a las instrucciones del fabricante de los equipos. Las situaciones por las cuales los sobrecorrientes deben ser consideradas más a menudo son:

- 1) Grandes instalaciones rectificadoras.
- 2) Grandes hornos de arcos y soldadoras.
- 3) Grandes instalaciones de equipo controlado con SCR.
- 4) Filtros de sintonización.
- 5) Condiciones de resonancia del sistema.
- 6) Pequeños bancos de capacitores conectados frecuentemente en paralelo con bancos grandes.

La experiencia indica que son mínimos los problemas de las unidades capacitoras debido a la corriente. Los problemas más comunes de "corriente" han sido los fusibles volados y los transformadores de co-

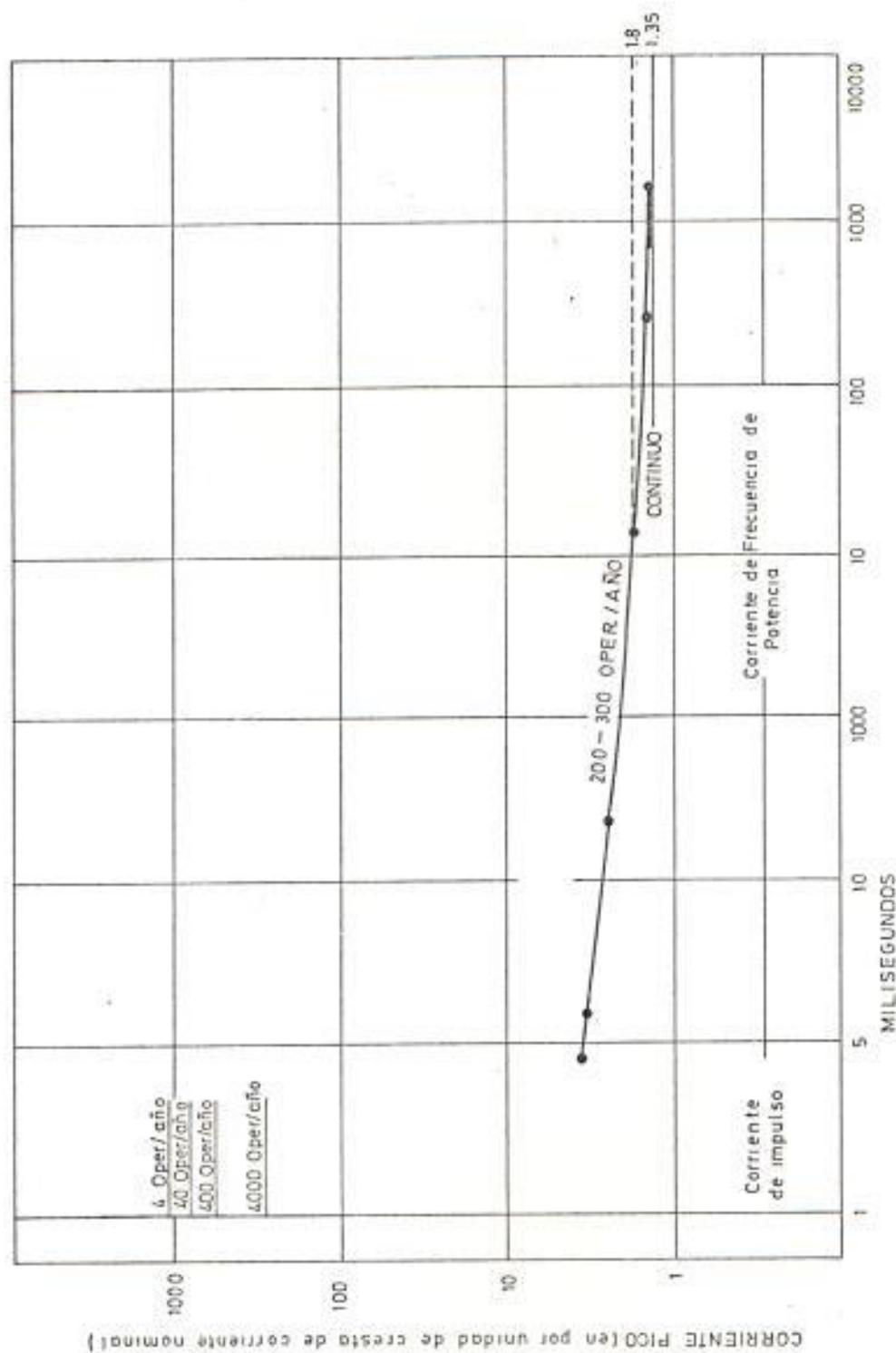


FIGURA 2.2 Guia de aplicacion de sobrecorriente de capacitores

corriente quemados debido a las sobrecorrientes de las armónicas.

Las unidades de capacitores están más comunmente limitadas por el total de los KVAC que solamente por la corriente.

KVAC.-

Los KVAC totales contínuos en una unidad capacitadora debería ser limitada a 1.35 veces lo nominal. En la determinación de los KVAC totales, los factores a ser considerados incluyen: voltajes del sistema como un porcentaje del nominal, capacitancia de la unidad capacitadora como un porcentaje del nominal (límites standard -0, + 15%), y al contenido de la corriente armónica.

Las condiciones del sistema las cuales pueden conducir a KVAC excesivos son esencialmente las mismas como aquellas mencionadas cuando se trató la corriente, con la excepción de la conexión y desconexión. Estas instalaciones usualmente conducirán a la selección de unidades de capacitores con voltaje más alto que el nominal para conseguir tanto los requerimientos de voltaje como los de KVAC de la instalación.

Temperatura ambiente.-

A las unidades de capacitores individuales standard se los trata de que estén térmicamente estables a 46°C y son destinadas para una temperatura

peratura ambiente promedio anual normal no más alta que 35°C. Límites más reales para los equipos son 35-40°C para el día más crítico y un promedio anual de 20-25°C. Grandes instalaciones de capacitores dentro de edificios en climas calientes (y especialmente aquellas cercanas a grandes hornos) necesitan una cuidadosa consideración de la temperatura ambiente. El calor disipado por las mismas unidades puede aumentar la temperatura ambiente en un área cerrada. Para tales aplicaciones de altas temperaturas, una alarma de temperatura ambiente y un relé de disparo son apropiados.

El voltaje de la unidad capacitadora, la corriente, los KVAC y la temperatura ambiente son consideraciones importantes para evitar la vulnerabilidad de las unidades de capacitores y de falla del equipo.

El evitar la falla de la unidad es el primer y más importante paso en la minimización de la probabilidad de la ruptura del tanque del capacitor. Para el ambiente de la ciudad de Guayaquil, esto es un punto que debe ser cuidadosamente considerado para el diseño, tamaño y capacidad del banco.

## 2.2. Determinación de la cantidad de unidades del banco de capacitores

Como una información general se puede decir que la mayor parte de los bancos son construidos con unidades de 200 KVAC, aunque hay una tendencia en los más recientes de usar unidades de 300

(6 400) KVAC. Es mejor usar al menos 10 unidades en paralelo en cada grupo serie, de tal manera la pérdida de una unidad no requerirá que el banco de capacitores salga fuera de servicio. Para un voltaje de línea a tierra de 40 KV, el que sería nuestro caso, la gran mayoría de los bancos son construídos con 2, 3, ó 4 grupos series.

Entrando ya en los factores que intervienen en la determinación de la cantidad de unidades del banco de capacitores se puede decir que para diseñar apropiadamente un banco de capacitores en paralelo para ser usado en sistema de alto voltaje, un número de factores deben ser tomados en consideración. Se tratará en esta parte solamente con la selección de unidades individuales de capacitores a ser usados, junto con el apropiado agrupamiento de estas unidades.

Los bancos de capacitores son generalmente construídos usando unidades de capacitores de una clase de distribución, usualmente entre 2400 y 19.920 voltios, y en tamaños de 50, 100, 150, 300 KVAR.

Para bancos de capacitores que tienen un voltaje nominal de línea a línea de 13.8 KV o menos, todas las unidades de capacitores en cada una de las tres fases están conectadas en paralelo. Cuando el voltaje nominal de línea a línea del banco de capacitores excede los 13.8KV, las fases están usualmente construídas de dos o más grupos de capacitores standard conectados en serie.

Las unidades individuales son seleccionadas de tal manera que la suma de sus voltajes nominales sea igual al nominal de línea a línea o línea a neutro del banco de capacitores, o tan cerca como esto sea posible.

#### Capacitores de voltaje standard recomendados

Después que el voltaje de operación normal del banco de capacitores es determinado, se puede por medio de la tabla # 1.2 ver qué valores de capacitores individuales standard pueden ser usados y el número de grupos serie por fase requerido.

Por ejemplo, si el voltaje fase a fase de un sistema es 69 KV, la tabla 2.1 muestra que tres grupos series de capacitores de 13.280 voltios es un diseño viable. Generalmente, cuando hay más de un arreglo posible, es preferible usar las unidades individuales de voltaje más alto, manteniendo así el número requerido de grupo series al mínimo. Como una regla general, el primer costo, costo de instalación y la complejidad de la instalación se incrementa con el número de grupos series en el banco. Frecuentemente, sin embargo, la utilidad se standardiza sobre ciertas unidades de capacitores para los requerimientos del sistema global y encuentra que el uso de estas unidades en la construcción de bancos de alto voltaje minimizará sus artículos almacenados para propósitos de reemplazo.

#### Voltajes especiales

No DE GRUPOS SERIES	VOLTAJE NOMINAL DE LAS UNIDADES INDIVIDUALES							
	2400	4160	4800	6640	7200	9960	13800	19920
1	4160	7200	8315	11500	12470	17250	23900	34500
2	8315	14410	16630	23000	24940	34500	47800	69000
3	12470	21615	24940	34500	37410	51750	71700	103500
4	16630	28820	33255	46000	49880	69000	95600	138000
5	20785	36025	41570	57500	62350	86250	119500	172500
6	24940	43230	49880	69000	74820	103500	143400	207000
7	29100	50435	58200	80500	87290	120750	167300	241500
8	33255	57640	66510	92000	99790	138000	191200	276000
9	37415	64845	74020	103500	112230	155250	215100	310500
10	41570	72050	83140	115000	124700	172500	239000	345000
12						207000	286800	414000
14						241500	334600	483000
16						276000	382000	552000
18						310500	430200	621000
20						345000	478000	690000

NOTA: Las unidades sobre los 15.000 voltios deben ser de 125-Kv BIL con un solo terminal.

TABLA 2.1 Voltaje fase a fase de bancos trifásicos de capacitores conectados en estrella, en función de unidades individuales.

En el caso de que el voltaje de operación exacto de un sistema no pueda ser igualado por la tabla, hay dos soluciones alternativas para el diseño del banco. La primera es la selección de una unidad de capacitor especial, y la segunda es seleccionar el arreglo el cual tiene el voltaje nominal más próximo al voltaje de operación.

El uso de capacitores especiales tiene las desventajas de un alto costo inicial, incrementa los problemas con respecto al almacenamiento de unidades y se tiene más largos programas de entrega al querer obtener las unidades de repuesto. Cuando la segunda solución alternativa es escogida, debe ser recordado que los KVAR que se entregan serán proporcionales al cuadrado de la relación entre el voltaje existente para el voltaje nominal. En la mayoría de los casos un arreglo conveniente puede ser encontrado y que llene los requerimientos del sistema.

#### Selección del voltaje de la unidad y su capacidad de KVAR

La selección de la dimensión de los KVAR del banco de capacitores está basada en los requerimientos de VAR del sistema en el sitio de la instalación del banco.

Después de que esto ha sido determinado, la selección del voltaje del capacitor y sus KVAR deben ser hechos. Dos factores deben ser considerados.

- 1) Determinación del mínimo número de unidades en paralelo.

## 2) Los KVAR totales del banco.

Una buena práctica de operación dicta el uso de un mínimo número de unidades en paralelo. Cuando una de las unidades en paralelo falla y es retirada del servicio por su fusible individual, las unidades restantes en el grupo serie-paralelo operará con un alto voltaje debido al cambio en la impedancia del grupo. Los standard de diseño recomiendan que ese sobrevoltaje debe ser limitado al 110 por ciento del voltaje nominal.

En la tabla # 2.2 se lista el número mínimo de unidades en paralelo permitido para que aunque ocurra una falla en una de las unidades, las unidades restantes tengan un sobrevoltaje de menos del 110 por ciento del voltaje nominal. El número de unidades en paralelo varía dependiendo del número de grupos series usados en cada fase y del tipo de conexión del banco (estrella con neutro aterrizado o neutro flotante o triángulo). Después de que se ha determinado el mínimo de unidades en paralelo requerido, por medio de las tablas # 2.3, # 2.4 ó # 2.5, se puede determinar los KVAR de la unidad que suministrará los KVAR más cercanos del banco total.

Generalmente la construcción más económica del banco será obtenida cuando unidades de la más alta capacidad de KVAR son empleadas. Por ejemplo, un capacitor de 69 KV puede ser equipado usando ya sea seis grupos series de unidades de 6640 voltios o tres grupos series de unidades de 13.280 voltios. La tabla # 2.2 muestra que el número mí-

NUMERO MINIMO RECOMENDADO DE UNIDADES EN PARALELO POR GRUPO SERIE			
NUMERO DE GRUPOS SERIES	ESTRELLA ATERRIZADA O DELTA	ESTRELLA NO ATERRIZADA	ESTRELLA PARTIDA [SECCION IGUALES]
1	1	4	
2	6	8	7
3	8	9	8
4	9	9	9
5	9	10	9
6	9	10	9
7	10	10	10
8	10	10	10
9	11	11	11
10	11	11	11
11	11	11	11
12	11	11	11

TABLA 2.2 Número mínimo recomendado de unidades en paralelo por grupo serie.

No DE UNID. EN PARALELO POR GRUPO SERIE	NUMERO DE GRUPOS SERIE EN CADA FASE							
	1	3	5	7	8	9	11	12
1	150	450	750	1050	1200	1350	1650	1800
2	300	900	1500	2100	2400	2700	3300	3600
3	450	1350	2250	3150	3600	4050	4950	5400
4	600	1800	3000	4200	4800	5400	6600	7200
5	750	2250	3750	5250	6000	6750	8250	9000
6	900	2700	4500	6300	7200	8100	9900	10800
7	1050	3150	5250	7350	8400	9450	11550	12600
8	1200	3600	6000	8400	9600	10800	13200	14400
9	1350	4050	6750	9450	10800	12150	14850	16200
10	1500	4500	7500	10500	12000	13500	16500	18000
11	1650	4950	8250	11550	13200	14850	18150	19800
12	1800	5400	9000	12600	14400	16200	19800	21600
13	1950	5850	9750	13650	15600	17550	21450	23400
14	2100	6300	10500	14700	16800	18900	23100	25200
15	2250	6750	11250	15750	18000	20250	24750	27000
16	2400	7200	12000	16800	19200	21600	26400	28800
17	2550	7650	12750	17850	20400	22950	28050	30600
18	2700	8100	13500	18900	21600	24300	29700	32400
19	2850	8550	14250	19950	22800	25650	31350	34200
20	3000	9000	15000	21000	24000	27000	33000	36000
21	3150	9450	15750	22050	25200	28350	34650	37800
22	3300	9900	16500	23100	26400	29700	36300	39600
23	3450	10350	17250	24150	27600	31050	37950	41400
24	3600	10800	18000	25200	28800	32400	39600	43200
25	3750	11250	18750	26250	30000	33750	41250	45000
26	3900	11700	19500	27300	31200	35100	42900	46800
27	4050	12150	20250	28350	32400	36450	44550	48600
28	4200	12600	21000	29400	33600	37800	46200	50400
29	4350	13050	21750	30450	34800	39150	47850	52200
30	4500	13500	22500	31500	36000	40500	49500	54000

TABLA 2.3 Kvar trifásicos totales del banco usando unidades de 50 Kvar.

No DE UNID. EN PARALELO POR GRUPO SERIE	NUMERO DE GRUPOS SERIE EN CADA FASE								
	1	3	5	7	8	9	11	12	
1	300	900	1500	2100	2400	2700	3300	3600	
2	600	1800	3000	4200	4800	5400	6600	7200	
3	900	2700	4500	6300	7200	8100	9900	10800	
4	1200	3600	6000	8400	9600	10800	13200	14400	
5	1500	4500	7500	10500	12000	13500	16500	18000	
6	1800	5400	9000	12600	14400	16200	19800	21600	
7	2100	6300	10500	14700	16800	18900	23100	25200	
8	2400	7200	12000	16800	19200	21600	26400	28800	
9	2700	8100	13500	18900	21600	24300	29700	32400	
10	3000	9000	15000	21000	24000	27000	33000	36000	
11	3300	9900	16500	23100	26400	29700	36300	39600	
12	3600	10800	18000	25200	28800	32400	39600	43200	
13	3900	11700	19500	27300	31200	35100	42900	46800	
14	4200	12600	21000	29400	33600	37800	46200	50400	
15	4500	13500	22500	31500	35400	40500	49500	54000	
16	4800	14400	24000	33600	38400	43200	52800	57600	
17	5100	15300	25500	35700	40800	45900	56100	61200	
18	5400	16200	27000	39800	43200	48600	59400	64800	
19	5700	17100	28500	41900	45600	51300	62700	68400	
20	6000	18000	30000	42000	48000	54000	66000	72000	
21	6300	18900	31500	44100	50400	56700	69300	75600	
22	6600	19800	33000	46200	52800	59400	72600	79200	
23	6900	20700	34500	48300	55200	62100	75900	82800	
24	7200	21600	36000	50400	57600	64800	79200	86400	
25	7500	22500	37500	52500	60000	67500	82500	90000	
26	7800	23400	39000	54600	62400	70200	85800	93600	
27	8100	24300	40500	56700	64800	72900	89100	97200	
28	8400	25200	42000	58800	67200	75600	92400	100800	
29	8700	26100	43500	60900	69600	78300	95700	104400	
30	9000	27000	45000	63000	72000	81000	99000	108000	

TABLA 2.4 Kvar trifásicos totales del banco usando unidades de 100 Kvar.

No DE UNID. EN PARALELO POR GRUPO SERIE	NUMERO DE GRUPOS SERIE EN CADA FASE								
	1	3	5	7	8	9	11	12	
1	450	1350	2250	3150	3600	4050	4950	5400	
2	900	1800	4500	6300	7200	8100	9900	10800	
3	1350	4050	6750	9450	10800	12150	14850	16200	
4	1800	5400	9000	12600	14400	16200	19800	21600	
5	2250	6750	11250	15750	18000	20250	24750	27000	
6	2700	8100	13500	18900	21600	24300	29700	32400	
7	3150	9450	15750	22050	25200	28350	34650	37800	
8	3600	10800	18000	25200	28800	32400	39600	43200	
9	4050	12150	20250	28350	32400	36450	44550	48600	
10	4500	13500	22500	31500	36000	40500	49500	54000	
11	4950	14850	24750	34650	39600	44550	54450	59400	
12	5400	16200	27000	37800	43200	48600	59400	64800	
13	5850	17550	29250	40950	46800	52650	64350	70200	
14	6300	18900	31500	44100	50400	56700	69300	75600	
15	6750	20250	33750	47250	54000	60750	74250	81000	
16	7200	21600	36000	50400	57600	64800	79200	86400	
17	7650	22950	38250	53550	61200	68850	84150	91800	
18	8100	24300	40500	56700	64800	72900	89100	97200	
19	8550	25650	42750	59850	68400	76950	94050	102600	
20	9000	27000	45000	63000	72000	81000	99000	108000	
21	9450	28350	47250	66150	75600	85050	103950	113400	
22	9900	29700	49500	69300	79200	89100	108900	118800	
23	10350	31050	51750	72450	82800	93150	113850	124200	
24	10800	33400	54000	75600	86400	97200	118800	129600	
25	11250	34750	56250	78750	90000	101250	123750	135000	
26	11700	35100	58500	81900	93600	105300	128700	140400	
27	12150	36450	60750	85050	97200	109350	133650	145800	
28	12600	37800	63000	88200	100800	113400	138600	151200	
29	13050	39150	65250	91350	104400	117450	143550	156600	
30	13500	40500	67500	94500	108000	121500	148500	162000	

TABLA 2.5 Kvar trifásicos totales del banco usando unidades de 150 kvar.

nimo de unidades de 13.280 voltios para un banco con neutro no aterrizado que usa tres grupos series es 81 unidades; por ejemplo, nueve (en paralelo) por tres (grupos series) por tres (fases) da un total de 81 unidades. Por comparación, el mínimo número de unidades de 6640 voltios es 180 unidades; por ejemplo, diez (en paralelo) por seis (grupos series) por tres (fases) da un total de 180 unidades. Los mínimos KVAR recomendados del banco para estos dos diseños son:

- 27.000 KVAR usando unidades de 6640 voltios, 150 KVAR
- 18.000 KVAR usando unidades de 6640 voltios, 100 KVAR
- 12.150 KVAR usando unidades de 13.280 voltios, 150 KVAR
- 8.100 KVAR usando unidades de 13.280 voltios, 100 KVAR

Porque las unidades de 150 KVAR cuestan menos por KVAR, y es más económico usar unidades de 13.280 voltios en un banco de 69 KV si los KVAR del banco deben ser menos que los 27.000 KVAR. Si los KVAR totales son menos que los 12.150 KVAR, luego deben ser usadas unidades de 13.280 voltios, 100 KVAR. Para bancos de menos de 8.100 KVAR, unidades de 50 KVAR deben ser usadas.

El banco a 69 KV era muy poco usual en los años setenta, ahora se puede considerar unidades de 9.960 y 19.920 voltios, y aún unidades de 200 y 300 KVAR que no están incluidas en las tablas anteriores. Posteriormente se ampliará las consideraciones y factores de diseño para los bancos de alto voltaje.

KVAR máximos por grupo series

En esta parte se ha considerado incluir el siguiente párrafo, que es una parte de los standard NEMA CPI - 6.07 (guía para aplicación segura de fusibles).

"Las conexiones del banco de capacitores y sus arreglos de protección con fusibles deben tomar una apropiada consideración de la energía almacenada en el grupo de capacitores conectado en paralelo. Si la falla del capacitor ocurre, la energía almacenada en el grupo en paralelo de capacitores puede descargarse a través del capacitor fallado y su fusible, cuando fusibles individuales de tipo de expulsión son usados. Para minimizar la probabilidad de falla del fusible de expulsión y/o la ruptura del tanque del capacitor, la energía total almacenada en un grupo de capacitores conectado en paralelo no deberá exceder los 10.000 vatios-segundos cuando es computado en la base de que el voltaje sea  $1.1 \times$  voltaje nominal  $\times 2$ . (Para aplicaciones a 60 hertz, 3.100 KVAR a voltaje nominal es recomendado como el límite para el máximo de los KVAR conectados en paralelo). La exposición a muy altos sobrevoltajes "permitidos" puede indicar la conveniencia de una reducción adicional en el número de unidades conectadas en paralelo, manteniendo la máxima energía conectada en paralelo en 10.000 vatios-segundos en la base del voltaje más alto.

Cuando son encontrados niveles muy altos de energía en unidades conectadas en paralelo, fusibles limitadores de corriente, u otros adecuados dispositivos, o esquemas de conexiones pueden ser requeridos para evitar descargas excesivas de energía en el capacitor fallado".

De lo dicho, es aparente que al menos los fusibles limitadores de corriente más caros sean usados, existe también un número máximo de unidades que pueden ser conectadas con seguridad en paralelo en un grupo serie. Cuando unidades de 100 KVAR son usadas, el número máximo de unidades en paralelo es 31 y para unidades de 150 KVAR el máximo es 20 unidades. Donde dos o más bancos deban ser conectados en paralelo a la misma barra, es preferible pedir al fabricante para un análisis adicional datos sobre la energía en paralelo con la que contribuye el banco o bancos adicionales.

### 2.3. Conexiones del banco de capacitores

Básicamente en esta parte se menciona la información dada por diversos fabricantes, de que los bancos de capacitores para sistemas no aterrizados de 69 KV son conectados en estrella no aterrizada. Y la mayor parte de los bancos de capacitores en servicio en sistemas bien aterrizados de 69 KV son conectados en estrella aterrizada.

Como en el sistema eléctrico de Guayaquil, todos sus elementos eléctricos se encuentran aterrizados, la opción que se escogerá es la de conectar el banco aterrizado. En un capítulo posterior se verá que, el aterrizar el banco de capacitores representa un ahorro, es decir es por tanto una ventaja económica.

Hay que mencionar también, que el banco de capacitores puede

ser conectado en triángulo, pero esta conexión no es muy usual y además presenta el inconveniente de la dificultad de encontrar un método fácil para calcular las corrientes cuando existen condiciones de desbalance. Dificultándose entonces el ajuste de los relés y alarmas a emplearse con el sistema de protección. En esta tesis no se analiza este tipo de conexión.

En este subcapítulo únicamente se han mencionado los diferentes tipos de conexiones de los bancos de capacitores; mientras que en los capítulos 3 y 5 se analizarán más profundamente los variados problemas técnicos que se van presentando en su conjunto. Es decir, se estudia la conexión del banco junto con otros tópicos como son su esquema de protección, o con su infraestructura requerida, etc.

## CAPITULO III

### SISTEMAS DE DETECCION DE FALLAS

#### 3.1. Necesidad de equipos de detección de fallas

Un banco de capacitores, como la mayoría de las piezas de un equipo eléctrico, es vulnerable a falla y a cualquier otra condición anormal de operación -ya sea momentánea o sostenida- y por lo tanto debe ser protegido contra daños que podrían ocurrirle al mismo banco y al sistema al cual está conectado. Esta protección del capacitor puede estar dividida en dos clasificaciones generales: la protección de las unidades individuales y la protección del banco. La protección del banco contra condiciones anormales sostenidas de operación generalmente toma la forma de un método de detección de desbalance. A continuación se explicará los propósitos y las funciones de los métodos más prácticos de detección de desbalance.

Para entender la necesidad de los circuitos de detección de desbalance, es necesario definir las condiciones, las cuales constituyen la operación normal y anormal de las unidades de capacitores. Una condición de operación normal existe cuando el voltaje nominal es aplicado al banco y todos los capacitores están

funcionando correctamente. Bajo condiciones de operación normal, los KVAR de operación del banco no deben exceder del 135% de los KVAR nominales. Este valor máximo es la suma de: (1) KVAR debido al exceso del voltaje a la frecuencia fundamental, (2) los KVAR causados por los voltajes armónicos, y (3) KVAR en exceso de los nominales de placa debido a las tolerancias de fabricación. En un banco construido de varios grupos series de capacitores de distribución, la condición de operación normal existe cuando el voltaje de línea a neutro del banco está dividido a través de los varios grupos series de tal manera que ninguna de las unidades de capacitores estén operando con un exceso del 110% del voltaje nominal. La operación continua sobre el 110% del voltaje nominal podría ser permitida solamente en casos de emergencia. Los sobrevoltajes ocasionales, sin embargo, podrían sin peligro exceder del 110% por períodos cortos.

### 3.2. Empleo del equipo de detección de fallas

Debido a que el banco de capacitores está diseñado para tener iguales impedancias en cada una de sus tres fases, el banco, bajo condiciones normales de operación, presentará una carga trifásica balanceada al sistema. El voltaje y la corriente de todas las fases serán igual y mutuamente desplazadas por 120 grados eléctricos. Esto permite que una condición anormal de operación puede ser detectada midiendo: (1) Los voltajes o corrientes dentro de las fases del banco ó (2) La relación del neutro

del banco de capacitores a tierra. Dependiendo de la magnitud del desbalance, el problema de detección puede ser o no ser fácil y por lo tanto la función del detector de desbalance puede o no puede ser práctica. Las clases generales de protección que pueden ser provistas por el detector de desbalance son: (1) Protección contra fallas graves dentro del banco, (2) Protección contra desbalances sostenidos severos, y (3) Protección contra sobrevoltajes causadas por fallas de las unidades individuales.

#### Protección contra fallas graves dentro del banco de capacitores

La protección contra fallas graves, tales como una falla de línea a línea o una falla de línea a tierra, generalmente requieren alguna forma de protección de respaldo externa, tal como fusibles de poder o interruptores automáticos con circuitos de relés asociados. Puede ser encontrado, sin embargo, que para la detección de una falla de línea a neutro en un banco conectado en estrella no aterrizado, el uso de un circuito de detección de desbalance es práctico y deseable. En un banco conectado en estrella no aterrizado, una falla de línea a neutro causará un incremento en la corriente de línea en la fase fallada de solamente tres veces la corriente normal. Y como los fusibles individuales de los capacitores no protegerán contra una falla de línea a tierra que ocurra fuera de una unidad, otra protección es requerida. Como se ha mencionado previamente, los bancos podrían operar al 135% de los KVAR nominales en determinado momento. Esto también significa 135% de la corriente de línea nominal. La

protección de respaldo, por lo tanto, debe permitir que el 135% de la corriente nominal sea transportada continuamente, pero al mismo tiempo, debe retirar el banco en el caso de tener tres veces la corriente de línea nominal. Se puede tener dificultades al tratar de acoplar esta protección con los fusibles de poder.

La conexión por pasos en los bancos a voltaje de distribución es muy común y, este factor debe ser tomado en cuenta en la protección de respaldo. La protección de respaldo más económica está usualmente provista de un interruptor automático o un fusible de poder entre cada paso. Esto es específicamente verdad si los dispositivos interruptores para los pasos individuales no tuvieran la capacidad interruptiva suficiente para servir como protección contra fallas de línea a línea o fallas de línea a tierra.

Considerando un banco que sólo tiene dos pasos. Si la protección de respaldo está en la línea principal protegiendo ambos pasos, este dispositivo debe llevar el 270% de la corriente nominal de un paso, pero al mismo tiempo debe retirar los bancos en el caso de llegar al 300% de la corriente nominal en un paso. Puede ser observado que esto presentará una relativa dificultad de ajuste para los relés y que será virtualmente imposible para los fusibles. Cuando se considera tres pasos, la situación se vuelve imposible para los relés sin importar cuán sensibles éstos pueden ser.

Si, por otro lado, cada uno de los pasos individuales tiene alguna

forma de detección de desbalance asociado con él, el circuito puede ser usado para detectar la falla de línea a neutro y disparar el banco que tiene la falla. Esto permite a la protección de respaldo en la línea que protege a toda la instalación, hacerlo solamente contra fallas de gran magnitud, tal como fallas de línea a línea o de línea a tierra.

#### Protección contra desbalances severos

En bancos donde las fases están compuestas de varios grupos en serie de capacitores de distribución, existe la posibilidad que un conductor externo pueda causar que un grupo serie sea cortocircuitado. En general, una condición como esta continuará indefinidamente ya que la impedancia restante en la fase limitará la corriente a una magnitud debajo de la requerida para operar los dispositivos de protección de respaldo. La detección de desbalance servirá muy satisfactoriamente para la protección contra este tipo de operación anormal.

#### Protección contra sobrevoltajes causados por fallas en las unidades individuales

La falla de una o más unidades de capacitores en la sección en serie de una fase resultará en un incremento en el voltaje sobre las unidades restantes en esa particular sección en serie y un desbalance resultante en el banco completo. Cuando un número suficiente de fallas han ocurrido en una sección en serie o fase de un banco para

causar que el voltaje en las unidades restantes excedan al 110% del voltaje nominal de esas unidades, el banco deberá ser retirado del sistema y las unidades falladas reemplazadas.

Aunque es posible detectar fallas en las unidades con un detector de desbalance, es generalmente muy difícil, y al menos que los factores limitantes estén entendidos y considerados, un intento de hacerlo así puede llevar a resultados insatisfactorios.

Se recomienda generalmente que para un banco en estrella no aterrizada, que tiene un grupo en serie, por ejemplo: todas las unidades en cada fase en paralelo, o bancos de cualquier conexión, que tienen más de un grupo en serie, el banco deberá tener por lo menos una dimensión mínima segura. Esta mínima dimensión del banco es basada, entre otras razones, sobre la premisa que una unidad en cualquier grupo serie del banco puede fallar sin causar que un sobrevoltaje en exceso del 110% del voltaje nominal aparezca sobre las unidades restantes dentro de ese grupo. La tabla # 2.2 muestra el número mínimo recomendado de unidades por grupo serie para varias conexiones del banco.

Para el diseño de banco recomendado anteriormente, el detector de desbalance, para proteger contra sobrevoltajes causados por fallas de unidades, debería responder al retiro de la segunda unidad de capacitores en un grupo serie. Si el banco tiene un número más grande que el mínimo de unidades requerido en paralelo por grupo serie, dos,

tres o más unidades pueden tener que ser retiradas del mismo grupo serie para causar que el voltaje sobre las unidades restantes excedan del 110%.

Para determinar si la protección contra unidades falladas debe ser obtenido de detectores de desbalance, los siguientes factores deberán ser advertidos y cuidadosamente considerados en el diseño de los circuitos detectores.

- 1.- El desbalance causado por el retiro de unidades en una sección se añadirá vectorialmente al desbalance de unidades retiradas en otras secciones. Deberá ser entendido, para un funcionamiento apropiado del circuito detector de desbalance, que todos los capacitores deben ser retirados de un grupo serie y todos los capacitores en otros grupos series deben permanecer intactos.
- 2.- El desbalance causado por el retiro de una o dos unidades de un grupo serie será pequeño ya que el cambio de impedancia de la fase, como un resultado de este retiro, será muy pequeño.
- 3.- En todo banco habrá un desbalance residual o inherente. Esto se añadirá vectorialmente al desbalance causado por el retiro de una o más unidades y puede por lo tanto incrementar o disminuir el efecto del desbalance de la unidad. El desbalance residual puede cambiar de tiempo en tiempo como un resultado de los cambios en la capacitancia debido a los efectos térmicos en varias seccio -

nes de la estructura de soporte, cambios en la capacitancia total debido al retiro y reemplazo de unidades individuales o por otras causas.

- 4.- El desbalance del sistema debe ser tomado en consideración, dependiendo del tipo de detector de desbalance empleado y el sistema al cual el banco es conectado. Esto es especialmente cierto si la referencia para el detector de desbalance es el neutro a tierra.

Se pone nuevamente énfasis en que mientras la detección del retiro de una sola unidad de una sección serie es a menudo posible, generalmente se encontrará muy difícil detectarla consistentemente, lo que puede llevar a resultados insatisfactorios.

#### Recomendaciones para el ajuste

Los ajustes recomendados para la mayoría de los detectores de desbalance es hacer que los dispositivos de detección respondan a un desbalance más grande que el máximo desbalance causado por el sistema o por el desbalance residual, pero menos que el desbalance causado por el cortocircuito de una sección serie.

La razón por la que esto proveerá una protección satisfactoria es sostenida por las siguientes consideraciones:

Si el retiro de una unidad de una sección serie no causa un sobrevol

taje en exceso del 110% que aparezca sobre las unidades restantes, luego es seguro asumir que la vida de las unidades restantes no es apreciablemente disminuída y que la próxima unidad que falle podría estar en cualquier otra sección del banco. Con tal que las unidades individuales estén protegidas de acuerdo con las recomendaciones del fabricante, una unidad fallada será la única unidad retirada de la sección serie por su fusible individual; esto es, los fusibles de las otras unidades de capacitores no se fundirán como resultado de corrientes de descarga en unidades adyacentes cortocircuitadas. Recordando que el promedio de falla de los capacitores modernos, según los extensos estudios ya realizados en este campo, es de un décimo del uno por ciento o menos por año, puede ser visto que un programa razonablemente establecido de inspección visual de los bancos de capacitores detectará las unidades retiradas por la operación de los fusibles individuales antes de que cualquier falla subsiguiente ocurra.

Es, por lo tanto, necesario solamente usar los detectores de desbalance para protegerse de situaciones, las cuales son directamente no civas a las unidades de capacitores o a los equipos asociados.

#### Métodos de detección de desbalance

Existen muchos métodos actualmente para la detección de desbalance. Algunos de estos sin embargo, ni son prácticos ni económicos, y en la mayoría de los casos, no habrán más que los cuatro métodos indicados en las figuras # 1.3, 2.3 y 3.3.

Generalmente, se encontrará que por lo menos uno de los cuatro métodos será satisfactorio para cualquier banco bien diseñado. Por supuesto, la elección final del circuito a ser usado dependerá del banco de capacitores a ser protegido.

Método 1. Figura 3.1 Doble estrella con transformadores de corriente.

Descripción:

Un banco en estrella no aterrizado partido en dos secciones, los neutros de cada uno interconectados a través de un transformador de corriente. Las secciones son generalmente de igual o aproximada dimensión. El transformador de corriente debe tener un voltaje de operación de acuerdo a la clase del sistema en el que trabaja.

Operación:

La impedancia a desbalanceada de una sección, con respecto a otra, causará que una corriente fluya por el neutro. Un relé sensor de corriente o un dispositivo en el secundario del transformador de corriente es fijado para responder a un predeterminado grado de desbalance.

Ventajas:

- 1) No es sensible al desbalance del sistema.

- 2) No es afectado por las corrientes de tercera armónica ya que los bancos en estrella no aterrizados no permiten el paso de éstas.
- 3) Relativamente económico.
- 4) Relés de sobrecorriente standard pueden usualmente ser usados para detectores.
- 5) En bancos muy grandes, que tienen más de un grupo serie, la división de unidades de capacitores en dos secciones disminuye la corriente de descarga por la unidad fallada.

Desventajas:

- 1) Disminuye el número de unidades por grupo serie para una dimensión de banco dado lo que por lo tanto incrementa el sobrevoltaje como resultado de las unidades falladas.
- 2) Aunque relativamente económico, puede requerir mayor área de la subestación que un sólo banco de igual dimensión conectado en estrella.
- 3) El costo de los materiales de conexión son más altos que los de un solo banco de igual dimensión conectados en estrella.

Cálculos del desbalance:

- 1) La cantidad de corriente fluyendo entre los neutros de las dos mitades. Al transformador de corriente se le asume que tiene una impedancia cero.

$$I_n = I_{un} \left[ \frac{V_T}{S_V} \right] \left[ \frac{3F}{6S(N-F) + 5F} \right] \text{ (AMP).}$$

% In (Porcentaje de la corriente nominal total del banco) =

$$\frac{150 F}{6S(N-F) + 5F}$$

- 2) El voltaje que queda sobre las unidades en una sección serie con F unidades retiradas.

$$\% VR = \frac{V_T}{S_V} \left[ \frac{600 SN}{6S(N-F) + 5F} \right]$$

- 3) El número permitido de unidades que pueden ser retiradas de una sección serie para obtener un % VR dado sobre las unidades restantes en esa sección.

$$F = \frac{6SN}{6S - 5} \left[ 1 - \frac{V_T}{S_V} \cdot \frac{100}{\% VR} \right]$$

(Si F es una fracción, se usará el número entero próximo más bajo)

$V_T$  = Voltaje aplicado de línea a neutro.

$V$  = Voltaje nominal de las unidades de capacitores.

VR = Voltaje sobre las unidades restantes en el grupo con F unidades retiradas.

In = Corriente entre los neutros de los dos bancos.

Iu = Corriente nominal de una unidad.

S = Número de secciones serie por fase.

N = Número de unidades en paralelo en una sección serie.

F = Número de unidades retiradas de una sección serie.

Método 2. Figura 3.2 Una sola estrella con transformador de potencial.

Descripción:

Un solo banco conectado en estrella con un transformador de potencial colocado entre el neutro y la tierra del sistema. El transformador de potencial debe tener un voltaje de operación de acuerdo a la clase del sistema en que trabaja.

Operación:

Impedancias de fase desbalanceadas del banco causarían un desplazamiento del neutro con respecto a tierra. La magnitud del desplazamiento medido por el elemento sensor de voltaje debe ser la ajustada para que responda a un predeterminado grado de desbalance.

Ventajas:

## BANCO DE DOBLE ESTRELLA (Neutro Desplazado)

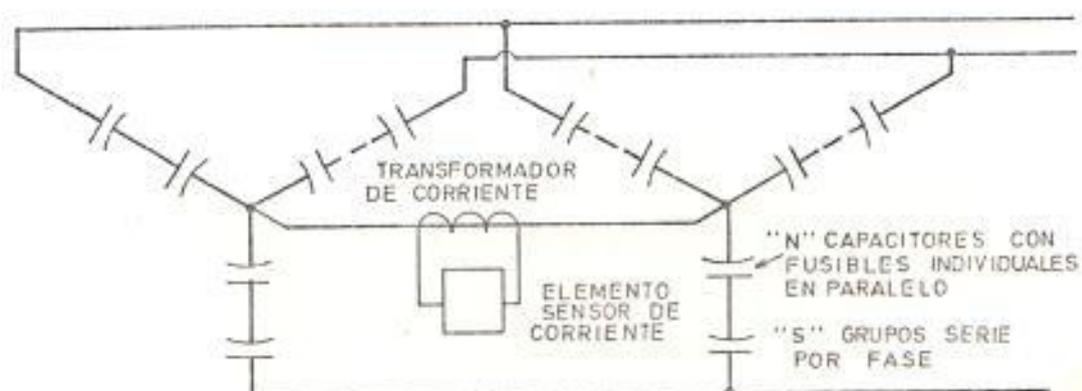


FIGURA 3.1

FIGURA 3.1 Doble estrella con transformadores de corriente.

## BANCO DE UNA SOLA CONEXION ESTRELLA NO ATERRIZADO (Voltaje de Neutro a Tierra)

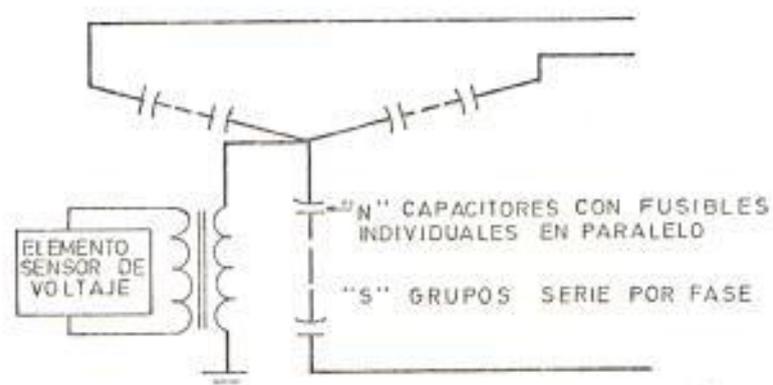


FIGURA 3.2

FIGURA 3.2 Una sola estrella con transformadores de potencial

- 1) El banco tiene dos veces más unidades en paralelo por grupo serie comparada con un banco doble conectado en estrella para la capacidad dada.
- 2) Se puede requerir una menor área en la subestación que para un banco doble conectado en estrella.
- 3) Disminuye el costo de los materiales de conexión.

Desventajas:

- 1) Es sensitivo al desbalance del sistema.
- 2) Es sensitivo a la corriente de tercera armónica; la cual generalmente requiere circuito de filtro o relé especial.
- 3) Fallas mayores causarán voltajes en el secundario muy altos.
- 4) El transformador de potencial es un dispositivo costoso.
- 5) Un limitado número de relaciones de transformación para los transformadores de potencial es obtenible (usualmente en el primario: 120). Esto hace a menudo que el ajuste de los relés de detección sea difícil.
- 6) Hay que tener precaución en que si los bancos son conectados con

dispositivos de distribución que "cortan" el voltaje, este alto porcentaje de cambio de potencial sobre el neutro del banco puede dañar los transformadores de potencial.

Cálculos del desbalance:

- 1) La magnitud del desplazamiento del neutro debido al retiro de  $F$  unidades en una sección serie. Si el transformador de potencial está conectado entre el neutro y tierra, será asumido que tiene impedancia infinita.

$$\% \text{ VNS} = \frac{100 F}{3S (N-F) + 2F}$$

$$\text{VNS (voltios)} = \frac{\% \text{ VNS}}{100} \text{ VT}$$

- 2) El voltaje que quedó sobre las unidades en un grupo con  $F$  unidades retiradas.

$$\% \text{ VR} = \left[ \frac{100 NS}{S (N-F) + F} \right] \left[ 1 + \frac{F}{3S (N-F) + 2F} \right] \frac{\text{VT}}{\text{SV}}$$

- 3) El número permitido de unidades que pueden ser retiradas de un grupo serie para dar como resultado un  $\% \text{ VR}$  dado sobre las unidades restantes en ese grupo.

$$F = \left[ \frac{3 NS}{3S - 2} \right] \left[ 1 - \frac{\text{VT}}{\text{SV}} \cdot \frac{100}{\% \text{ VR}} \right]$$

(Si  $F$  es una fracción, se debe usar el número entero próximo más bajo).

- 4) El desplazamiento del neutro cuando una sección serie completa es cortocircuitada.

$$\% \text{ VNS} = \frac{100}{3S - 2}$$

VNS = Desplazamiento del neutro.

VI = Voltaje aplicado de línea a neutro.

V = Voltaje nominal de las unidades de capacitores.

VR = Voltaje sobre las unidades restantes en un grupo con  $F$  unidades retiradas.

S = Número de secciones serie por fase.

N = Número de unidades en paralelo por sección serie.

F = Número de unidades retiradas de una sección.

Método 3. Figura 3.3. Una sola estrella con neutro flotante y con un sensor de voltaje de red de capacitores.

Un solo banco en estrella con neutro flotante y con red sensora divisora de voltaje con capacitores que conecta el neutro a tierra.

#### Operación:

El desbalance del banco causará un desplazamiento en el neutro con

respecto a tierra. La red de capacitores (divisora de impedancia), es causada para detectar el desplazamiento del voltaje del neutro.

#### Ventajas:

- 1) El banco tiene dos veces más unidades en paralelo por grupo serie comparado a un banco doble conectado en estrella para una dimensión de KVAR dados.
- 2) Puede requerir menos área en la subestación que un banco doble en estrella.
- 3) La conexión entre el neutro y tierra es un elemento capacitivo en vez de inductivo. Un elemento inductivo está expuesto a sobrevoltajes destructivos cuando un banco es conectado, y la extinción del arco es extremadamente rápida. Esta condición es llamada "Recorte de Voltaje".

#### Cálculos del desbalance:

- 1) La magnitud de desplazamiento del neutro debido al retiro de F unidades en una sección serie. Si el transformador de potencial está conectado entre el neutro y tierra, se puede asumir que tiene una impedancia infinita.

$$\% \text{ VNS} = \frac{100 F}{3S (N-F) + 2F}$$

$$\text{VNS (voltios)} = \frac{\% \text{ VNS}}{100} \text{ VT}$$

- 2) El voltaje que se tendrá sobre las unidades en un grupo con  $F$  unidades retiradas.

$$\% \text{ VR} = \left[ \frac{100 \text{ NS}}{S (N-F) + F} \right] \left[ 1 + \frac{F}{3S (N-F) + 2 F} \right] \frac{\text{VT}}{\text{SV}}$$

- 3) El número de unidades permitido que pueden ser retirados de un grupo serie par dar como resultado un  $\% \text{ VR}$  dado, sobre las unidades restantes en ese grupo.

$$F = \left[ \frac{3 \text{ NS}}{3S - 2} \right] \left[ 1 - \frac{\text{VT}}{\text{SV}} \cdot \frac{100}{\% \text{ VR}} \right]$$

(Si  $F$  es una fracción, se debe usar el número entero próximo más bajo).

- 4) El desplazamiento del neutro cuando una sección serie completa es cortocircuitada.

$$\% \text{ VNS} = \frac{100}{3S - 2}$$

VNS = Desplazamiento del neutro.

VT = Voltaje aplicado de línea a neutro.

V = Voltaje nominal de las unidades de capacitores.

VR = Voltaje sobre las unidades que quedan en un grupo con  $F$  unidades retiradas.

S = Número de secciones serie por fase.

N = Número de unidades en paralelo por sección serie.

F = Número de unidades retiradas de una sección.

Método 4. Figura 3.4. Solo una estrella con transformador de corriente.

Descripción:

El desbalance del banco que la corriente del neutro fluya a tierra. El dispositivo sensor de corriente (que puede ser un relé de voltaje y resistencia) debe ser ajustado para que responda a un predeterminado grado de desbalance.

Ventajas:

- 1) Tiene un número más grande de unidades en paralelo por grupo serie comparado con un banco doble conectado en estrella.
- 2) El banco aterrizado provee una segunda cantidad de protección de sobretensión.
- 3) El costo inicial del banco es bajo.
- 4) Reduce los voltajes de recuperación ya que el neutro es fijado y el banco es conectado como tres secciones monofásicas.

Desventajas:

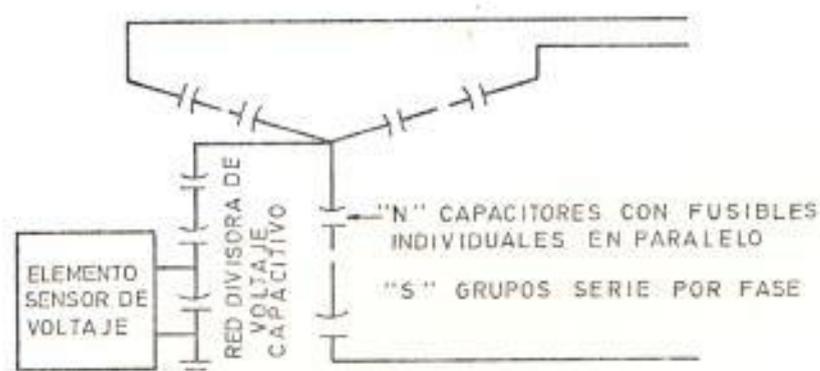


FIGURA 3.3

FIGURA 3.3 Una sola estrella con neutro flotante y con un sensor de voltaje de red de capacitores

BANCO DE UNA SOLA CONEXION ESTRELLA  
ATERRIZADA (Corriente del Neutro a Tierra)



FIGURA 3.4

FIGURA 3.4 Solo una estrella con transformadores de corriente

- 1) Sensible al desbalance del sistema. Aunque si el banco es lo suficientemente grande, esta desventaja puede ser eliminada partiendo el banco como se mostró en la doble estrella del método 1 y figura 1.3. Y para mantener las características del neutro aterrizado, dos transformadores de corriente son requeridos para que midan la diferencia de la corriente del neutro a tierra.
- 2) Es sensible a las corrientes de tercera armónica. Por lo que generalmente requerirá un circuito de filtro.
- 3) El neutro aterrizado puede causar interferencias telefónicas.
- 4) Requiere el reajuste de los relés de tierra del sistema.
- 5) Presenta un paso de falla a tierra de baja impedancia.
- 6) Usualmente hace necesarios los fusibles limitadores de corriente en un banco de un solo grupo serie debido a las magnitudes de corriente de falla de línea a tierra.

#### Cálculos del desbalance:

- 1) La cantidad de corriente a tierra debido al retiro de  $F$  capacitores en una sección serie. Se asume que el transformador de corriente tiene una impedancia cero.

$$I_n = \frac{I_u VT}{SV} \left[ \frac{NF}{S(N-F) + F} \right] \text{ (AMP.)}$$

$$\% I_n \text{ (de corriente de fase nominal)} = \frac{V_T}{S V} \left[ \frac{100 F}{S (N-F) + F} \right]$$

- 2) El voltaje sobre las unidades que quedan en una sección serie con F unidades retiradas.

$$\% V_R = \frac{V_T}{S V} \left[ \frac{100 S N}{S (N-F) + F} \right]$$

- 3) El número permitido de unidades que pueden ser retiradas de una sección serie para dar como resultado un % VR dado sobre las unidades restantes en ese grupo.

$$F = \left[ \frac{NS}{S-1} \right] \left[ 1 - \frac{V_T}{S V} \cdot \frac{100}{\% V_R} \right]$$

(Si F es una fracción, se debe usar el número entero próximo más bajo).

- 4) La corriente en el neutro cuando una sección serie completa es cortocircuitada.

$$\% I_n \text{ (de corriente de fase nominal)} = \frac{100}{S-1}$$

$I_n$  = Corriente del neutro.

$I_u$  = Corriente nominal de una unidad.

$V_T$  = Voltaje aplicado de línea a neutro.

$V$  = Voltaje nominal de las unidades de capacitores.

VR = Voltaje sobre las unidades restante en un grupo con F unidades retiradas.

S = Número de secciones serie por fase.

N = Número de unidades en paralelo por sección serie.

F = Número de unidades retiradas de una sección.

## CAPITULO IV

### COMPORTAMIENTO Y PROBLEMAS DE LOS BANCOS DE CAPACITORES

#### 4.1. Comportamiento del banco de capacitores debido a la energización de otros equipos eléctricos

Los bancos de capacitores estáticos son comunmente instalados en las líneas y en las subestaciones, a dos niveles de voltaje: de transmisión o de distribución. Aunque muchos bancos pueden estar permanentemente conectados, en esta parte de la tesis se tratará con los bancos de capacitores desconectables, es decir, bancos que pueden ser conectados y desconectados del sistema. Donde estos pueden ser conectados o desconectados tan frecuentemente como varias veces durante el día en respuesta a los cambios de hora a hora de los requerimientos de potencia reactiva en el sistema, o tan infrecuentemente como solo pocas veces durante el año debido a las variaciones del sistema, y sus consecuentes requerimientos.

Los KVAR capacitivos instalados en un determinado sitio pueden ser conectados o desconectados en un solo bloques o en pasos, o puede, como actualmente se acostumbra, consistir de varios bancos, los cuales se conectan o desconectan en pasos parciales se

las condiciones lo requieran. Condiciones que son dictadas ya sea para tener una más eficiente y global corrección de los VAR o porque la corrección total requerida es más grande que la capacidad de un solo elemento desconectable.

La operación de los mecanismos desconectables del banco de capacitores puede ser controlada manualmente o por dispositivos que trabajen a base de tiempo (relojes), o en respuesta a variaciones en la temperatura, voltaje del sistema, requerimientos de corriente o VAR, o aún con una combinación de éstos.

Los bancos de capacitores en paralelo pueden ser conectados o desconectados del sistema por interruptores automáticos, ya sean estos para propósitos generales o específicamente resignados para la interrupción de capacitores. También pueden usarse mecanismos de interrupción que no tengan la capacidad sustancial de interrupción de falla, tales como interruptores de vacío, o interruptores de aceite o gas, que son a menudo específicamente designados para este servicio.

Se considerará ahora los fenómenos de voltaje y corriente asociados con la conexión y desconexión del banco de capacitores, los esfuerzos impuestos sobre los mecanismos de interrupción y se comparará la aplicación de elementos tales como son los interruptores automáticos e interruptores de aire para esta función.

El funcionamiento del aparato de interrupción utilizado con los

bancos de capacitores puede ser severo en tres aspectos generales:

- 1) Dependiendo de los requerimientos del sistema para añadir o quitar bancos de capacitores, un número relativamente grande de operaciones puede ser necesario. Se impone con esto un funcionamiento mecánico severo sobre las partes operativas. Esto depende, por supuesto, del elemento interruptor empleado. Dos, o aún una operación por día podría ser severa en algunas clases de interruptores automáticos, mientras que esta frecuencia de operación sería normal para un dispositivo diseñado para tal servicio.
- 2) El voltaje de recuperación (que es el voltaje que aparece a través de los contactos del elemento interruptor después de la interrupción) puede imponer severos esfuerzos sobre el dispositivo interruptor, lo que resulta del efecto combinado del voltaje del sistema y el voltaje atrapado en el capacitor al momento de la interrupción.
- 3) La corriente de carga del banco de capacitores, usualmente no más que unos pocos cientos de amperios, generalmente no ocasiona esfuerzos indebidos al elemento interruptor ya sea por transportar la corriente continuamente o al ser interrumpida. Cuando un solo banco de capacitores (aislado) es energizado, la corriente de arranque (in rush) puede ser varias

veces o más, la corriente normal, pero esta corriente usualmente no es severa. Cuando un banco (un paso) de un grupo de dos o más bancos (o banco de varios pasos) es energizado con uno o más bancos, o pasos, ya conectados a la barra, una corriente de gran magnitud y de alta frecuencia puede pasar a través del aparato interruptor, cuando el banco energizado se "descarga" en el banco que está siendo conectado. Bajo algunas condiciones esto puede causar un severo esfuerzo, en los dispositivos de interrupción.

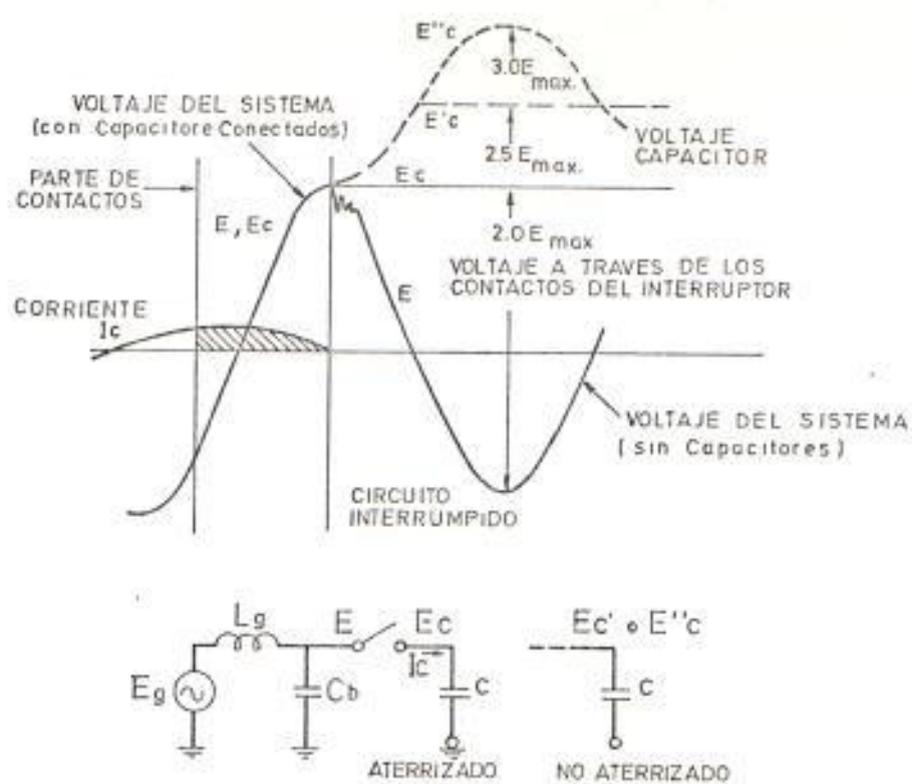
En la figura # 4.1 se muestra las relaciones de voltaje y corriente durante la interrupción de corriente a un banco de capacitores aislado.

El máximo voltaje de recuperación ocurre a través del dispositivo interruptor  $1/2$  ciclo después de la interrupción.

#### Apertura

La figura # 1.4 muestra el fenómeno asociado con la conexión de un solo banco aislado de capacitores. El circuito mostrado podría ser una fase de un banco trifásico con el neutro aterrizado, o con el neutro no aterrizado como se indica.

Mientras el interruptor es cerrado, la corriente adelanta al voltaje con 90 grados y el capacitor es cargado al valor del voltaje del sis



### NEUTRO DEL BANCO DE CAPACITORES

FIGURA 4.1

FIGURA 4.1 Relación de voltaje y corriente durante la interrupción de corriente a un banco de capacitores aislado

tema. Cuando los contactos del interruptor se separan en  $t_0$ , un arco es iniciado y se mantendrá los próximos 60 hertz hasta que la corriente sea cero en  $t_1$ . En este momento la corriente es cero y el voltaje a través del interruptor es casi cero ya que el capacitor retiene la carga del voltaje pico el cual existió hasta cuando la corriente fue cero. El voltaje del sistema disminuyó un poco, indicando la regulación del sistema cuando los capacitores son retirados. Este cambio de voltaje  $\Delta e$ , usualmente un pequeño porcentaje del voltaje del sistema, está determinado por los KVAR del banco de capacitores y los KVA de cortocircuito (KVAcc) posibles del sistema.

$$\text{Cambio de voltaje } (\Delta e) = \frac{\text{KVAR}}{\text{KVAcc}} \times 100 (\%)$$

Esto ocurre con una frecuencia natural de oscilación determinada por la inductancia de la fuente  $L_g$  y la pequeña capacitancia inherente de la barra  $C_b$ .

Siguiendo a la interrupción del circuito en  $t_1$ , el capacitor retiene la carga del voltaje de cresta pero el sistema cambia de polaridad en el siguiente medio ciclo, imponiendo esencialmente dos veces el valor de cresta a través de los contactos del interruptor, como se muestra en  $t_2$ . Después de  $t_2$ , el voltaje del sistema otra vez se invierte de polaridad, reduciendo la diferencia de voltaje a través de los contactos, etc. El continuar abriendo la abertura de los contactos reduce el esfuerzo del voltaje existente sobre ésta en el intervalo del próximo medio ciclo.

Si el neutro del banco de capacitores no está aterrizado, un voltaje más alto que dos veces  $E_{max}$  podría aparecer a través de la primera fase a interrumpirse debido a un desplazamiento del neutro del banco de capacitores, con respecto a tierra. Todo esto antes de que las fases dos y tres sean interrumpidas, normalmente 90 grados después del tiempo  $t_1$ . Este desplazamiento correspondientemente eleva el voltaje terminal de la carga capacitiva de la primera fase a interrumpirse, sin cambiar la carga de 1.0 por unidad sobre esta capacitancia, como es mostrado por el voltaje  $E'c$ , resultando en un voltaje a través de la primera fase a interrumpirse de  $2.5 E_{max}$ . al tiempo  $t_2$ , siguiendo la interrupción de la fase 2 y 3 en su próxima corriente cero mutua lo cual ocurriría en  $t_1$  más 90 grados. Si por alguna razón las fases 2 y 3 no se interrumpieron en esta corriente cero, el voltaje terminal del capacitor de la fase 1 continuaría subiendo, con respecto a tierra, como es mostrado por el voltaje  $E_c''$  resultante de la aparición de  $3.0 E_{max}$ , al tiempo  $t_2$ , a través de la primera fase a despejar.

Bajo las mismas condiciones, al interrumpir un banco de capacitores trifásico no aterrizado pueden aún producirse voltajes de recuperación muy altos, si hay una diferencia de tiempo sustancial en la separación de los contactos en las tres fases, como podría ocurrir en un dispositivo de interrupción trifásico que tuviera el mecanismo de ajuste en malas condiciones o con tres dispositivos de interrupción monofásicos que no estén bien sincronizados.

Ha sido de práctica común el tener básicamente bancos de capacitores -

res no aterrizados equipados con algunos medios para detectar un cambio en el voltaje a tierra del neutro del banco de capacitores durante su operación normal como un indicador de un desbalance en la reactancia de una fase del banco. Tal cambio o desplazamiento podría ocurrir si los fusibles individuales del capacitor han volado, así posiblemente ocurriría un incremento en el voltaje en los capacitores restantes. Cuando un predeterminado desplazamiento ha ocurrido, los medios de detección iniciarían una alarma, o una señal para abrir el elemento interruptor, para así proteger los capacitores restantes de un excesivo voltaje de estado estable. Usualmente, la señal de voltaje es obtenida con transformadores de distribución de poca capacidad, con transformadores de potencial o con arreglos de divisores resistivos de voltaje. Ya que debido al efecto de los medios para medir el voltaje conectados entre el neutro del banco y tierra, el voltaje de recuperación en el dispositivo interruptor podría caer entre los valores del banco aterrizado y el no aterrizado. Adicionalmente, podría existir alguna posible influencia de las características de saturación del transformador, si es que este método de detección es usado.

Si la resistencia dieléctrica de la apertura de los contactos no es suficiente durante el tiempo entre  $t_1$  y  $t_2$ , según la figura anterior, el soportar el aumento del voltaje de recuperación, podría ocasionar un rompimiento a través de los contactos. Tal ruptura es denominada "REIGNITION" o "RESTRIKE" dependiendo si ocurre luego de un intervalo de secuencia cero menor que  $1/4$  de ciclo, o más de  $1/4$  de ciclo.

La figura 2.4 ilustra el fenómeno de "RESTRIKE" en un simple circuito con neutro aterrizado, ocurriendo en el tiempo  $T_2$ , el momento del más alto voltaje a través del dispositivo interruptor, y posiblemente el peor momento para que el "RESTRIKE" ocurra, medio ciclo después de la interrupción inicial de la corriente. La corriente que fluye cuando el capacitor es "REENERGIZADO" a través del "RESTRIKE", tiene una frecuencia natural asociada con la capacitancia del banco y la inductancia de la fuente usualmente en un rango de los pocos cientos a un mil hertz. El voltaje del capacitor cambia en la misma proporción, hacia el valor instantáneo del voltaje del sistema, y como ocurre en cualquier circuito oscilatorio, esto hace que el voltaje del sistema se incremente. Teóricamente, este incremento podría ser igual a la diferencia de voltaje existente a través de los contactos en el instante que el "RESTRIKE" ocurre,  $(A - 3.0 E_{max.})$  pero debido a la amortiguación inherente, usualmente alcanza solamente de 2.0 a 2.5  $E_{max.}$  El instante del máximo incremento coincide con la primera corriente cero de la corriente de "RESTRIKE", y esta corriente puede ser interrumpida en este momento de una manera similar a la interrupción inicial en  $t_1$ . El voltaje en el lado de la fuente del dispositivo interruptor empieza a regresar al valor de frecuencia normal en este instante, en una proporción asociada con la misma frecuencia natural como por el cambio en la regulación del lado de la fuente en  $t_1$ , con el consecuente voltaje de recuperación en el interruptor como se muestra en la figura.

En la figura # 4.2 se muestra el fenómeno de voltaje y corriente con

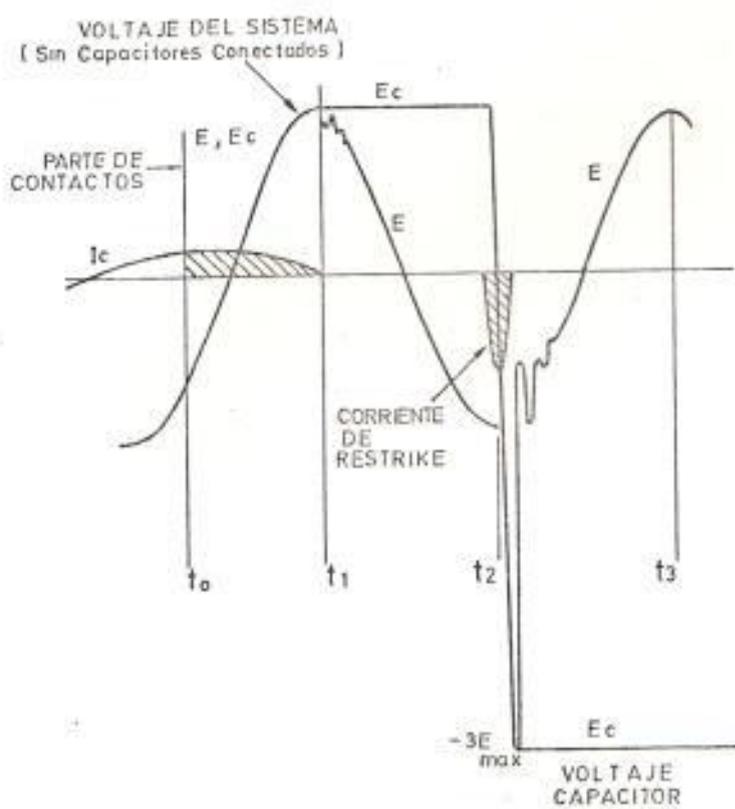


FIGURA 4.2

FIGURA 4.2 Fenómeno de voltaje y corriente con un "restrike" a  $1/2$  ciclo luego de la interrupción.

un "RESTRIKE" que ocurre  $1/2$  ciclo después de la interrupción de la corriente del banco de capacitores. Corriente de "RESTRIKE" interrumpida después de una "onda".

Si el "RESTRIKE" es interrumpido exitosamente en este momento, la variación normal de los 60 hertz impondrá un alto voltaje, como se muestra en t3, a través del interruptor medio ciclo más tarde, con la posibilidad de una "REIGNITION" o un "RESTRIKE" adicional, o una interrupción completa si el interruptor soporta este voltaje. Si el interruptor no soporta el voltaje de recuperación que sigue inmediatamente a la interrupción de la corriente de "RESTRIKE" en su primera corriente cero de frecuencia natural, "ondas" adicionales pueden fluir, como se muestra en la figura 3.4, lo que puede por último dar como resultado que quede una pequeña carga atrapada en el capacitor con el consecuente pequeño esfuerzo sobre el dispositivo interruptor.

Como puede ser visualizado, diferentes combinaciones de "REIGNITION" y/o "RESTRIKE" pueden resultar en otras, generalmente menores, cargas atrapadas y esfuerzos sobre el banco, el interruptor, y el sistema. Adicionalmente, la mayor parte de las instalaciones actuales no son tan simples como el circuito mostrado ya que introducen otras impedancias en la forma de fuentes de suministro remotas y parámetros de línea distribuidos. Estos factores generalmente sirven para modificar los sobrevoltajes transientes en los severos casos que se han considerado.

La figura # 4.3 muestra los fenómenos de voltaje y corriente al i-

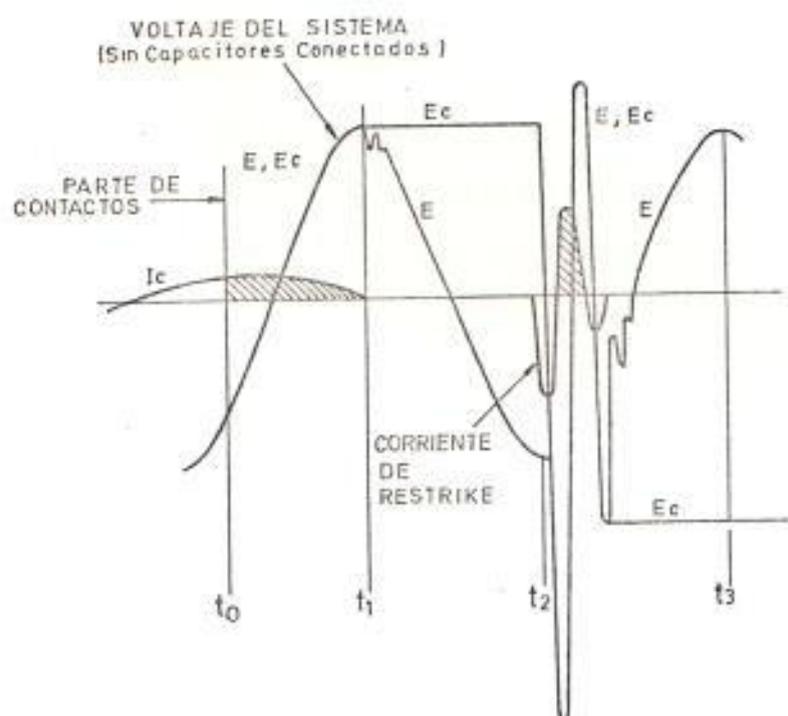


FIGURA 4.3

FIGURA 4.3 Fenómeno de voltaje y corriente con duración de la corriente de "restrike" de tres picos.

gual que la figura # 2.4, pero con una duración de la corriente de "RESTRIKE" de tres "picos". El voltaje atrapado en el banco de capacitores es menor que el de la figura # 4.2.

### Cierre

Cuando un solo banco de capacitores (aislado) es energizado, habrá una moderada corriente de arranque (in rush) similar a la corriente de "RESTRIKE", dependiendo del voltaje en el instante que el circuito es establecido. Los voltajes momentáneos en el banco de capacitores normalmente no excederán los  $2.0 E_{max}$ . Bajo ciertas condiciones se ha podido observar altos voltajes en puntos alejados del sistema, en alimentadoras que parten de la subestación donde existen instalados bancos de capacitores, cuando estos bancos de capacitores fueron energizados. Análisis detallados de este fenómeno están más allá del campo de esta discusión, pero del cual existe amplia información. Aplicaciones absolutas de reglas no pueden ser dadas con respecto a este fenómeno, pero como una regla general se puede decir que cuando en la localización de un banco de capacitores que se ha conectado, sea esta una subestación, etc., existe una alimentadora radial, particularmente con una sección de cable aéreo entre la estación y esta sección, podrían ocurrir grandes transientes sobre la sección de la alimentadora aérea. Por lo que con estas condiciones, un estudio más detallado puede ser aconsejable.

Cuando un banco de capacitores es energizado con un banco ya conecta

do a la barra, por ejemplo, cuando éstos están muy próximos, la corriente de arranque (in rush) del banco que se conecta puede incluir una corriente de descarga desde el banco ya energizado a más de la corriente desde la fuente. Esta corriente de descarga tiene generalmente una mucho más alta frecuencia natural y magnitud inicial que la componente de la corriente de arranque (in rush) de la fuente al banco conectado. La frecuencia natural, la cual está típicamente dentro del rango de 3 a 15 KHZ, está determinada por las capacitancias en serie combinadas de los dos bancos y la inductancia (de los conductores, etc.) entre los bancos, usualmente sobre los varios cientos de microhenmos. La magnitud de cresta inicial de la corriente es determinada por estos parámetros más el valor instantáneo del voltaje (por ejemplo, la carga sobre el banco energizado) cuando los contactos del interruptor se cierran. Esencialmente, esta magnitud inicial está limitada solamente por la inductancia entre los bancos. La resistencia inherente generalmente impone el suficiente amortiguamiento para que la corriente alcance del 85% al 95% del máximo valor teórico y los picos subsecuentes son reducidos correspondientemente, de tal manera que este transiente de corriente es disipado en una fracción de un ciclo normal de frecuencia.

El pico máximo de la corriente de arranque (in rush) teórico para energizar el segundo banco de dos bancos de capacitores de igual capacidad que se encuentran próximos, pueden ser determinados de la relación:

$$I_{\text{pico}} = 940 \sqrt{\frac{\text{KVAR}}{L_t}} \quad (\text{amperios})$$

Donde:

KVAR = kilovars trifásicos nominales de un banco.

$L_t$  = inductancia por fase en microhenrios entre los terminales de los bancos.

En ausencia de una información específica sobre la inductancia del conductor o de la barra, el valor de 0.3 a 0.5 microhenrios por pie de longitud del circuito entre los terminales del banco puede ser usado, más 5 a 10 microhenrios por la inductancia interna de cada banco de capacitores. En casos donde la máxima corriente de arranque (in rush) posible excede la capacidad nominal del dispositivo interruptor, puede ser necesario incrementar la inductancia, aumentando la distancia del circuito entre los bancos o añadiendo reactores.

De manera similar la frecuencia natural de la corriente de arranque (in rush) entre dos bancos de igual capacidad puede ser determinada de la relación:

$$f_o = \frac{K \sqrt{V-1}}{\sqrt{L_t \times KVAR}} \times 138 \times 10^3 \text{ (Hertz)}$$

Una breve consideración de los valores típicos de la magnitud y frecuencia de la corriente de arranque (in rush) para estos casos rápidamente revelará que el porcentaje de subida inicial de la corriente puede ser bastante excesivo en algunos casos. Si esta corriente de arranque (in rush) fluye a través de un arco, tal como es un "PRES - TRIKE", antes de que los contactos del dispositivo interruptor se

cierran, o en algunos casos en un "RESTRIKE" al abrirse, fuertes ondas mecánicas de choque pueden ser impuestas sobre los interruptores de un dispositivo de aceite tal como es un breaker. Posibles exposiciones a estos esfuerzos deben ser tomadas en cuenta en el diseño de los interruptores de aceite para así prevenir daños durante la conexión de bancos de capacitores muy cercanos. En los dispositivos que no emplean el aceite, tales como los interruptores magnéticos de aire o de vacío, la exposición a estas corrientes de arranque (in rush) generalmente no causa problemas.

Ampliando la información de la cual es la manera de determinar la corriente de arranque, se puede decir que cuando un banco de capacitores es energizado conectándolo éste a una fuente de voltaje, una extremadamente grande, de corta duración, corriente de carga oscilatoria fluirá hasta que el voltaje del banco de capacitores se estabilice al de la fuente de voltaje.

La magnitud de la corriente de carga corriente de arranque (in rush) y su frecuencia depende de lo siguiente:

- 1.- La capacitancia total del circuito (de la fuente más la del banco de capacitores).
- 2.- La inductancia total del circuito (de la fuente más la del banco de capacitores).
- 3.- La resistencia total del circuito (ésta predominantemente da la

frecuencia oscilatoria de la corriente de arranque y tiene además un pequeño efecto sobre la magnitud de la corriente).

Aunque las corrientes de arranque se hacen presente cuando bancos de capacitores aislados (de un solo paso) son energizadas, la magnitud será más pequeña que la corriente momentánea nominal del interruptor para capacitores. Si un interruptor para capacitores tiene la capacidad suficiente de soporte de la corriente momentánea para manejar la corriente de cortocircuito del sistema al cual es conectado, también será capaz de soportar la corriente de carga del capacitor. Existe una directa relación entre los KVA de cortocircuito de un sistema y la corriente de carga (del mismo sistema) para un banco de capacitores de un solo paso. La experiencia ha demostrado que la corriente de arranque usual para un solo banco aislado es de 5 a 15 veces la corriente normal del capacitor. El conectar bancos de capacitores de varios pasos (dos o más pasos) resulta en valores mucho más grandes de 20 a 250 veces la corriente de estado estable, y estos valores deben ser determinados para tener la seguridad que el equipo de interrupción puede manejar estas altas corrientes.

Para eliminar la necesidad para calcular estos valores cuando extensas ecuaciones, juego de tablas y una familia de curvas han sido desarrolladas para determinar la corriente de arranque y la frecuencia en un tiempo mucho más corto.

#### Bancos de varios pasos

Para los bancos de varios pasos la corriente de arranque predominante a un paso no energizado es producida por el o los pasos paralelos adyacentes ya energizados. El arranque del paso que está siendo energizado depende del efecto límite (impedancia) de la reactancia inductiva entre los dos pasos. Los valores usados en las curvas son calculados, basados en la suposición que el interruptor energiza el banco justo en el voltaje pico (cresta).

La ecuación empleada para calcular la corriente de arranque máxima en un banco con neutro flotante o en un banco de dos pasos conectado en triángulo es:

$$I_{pico} = \frac{1770 \sqrt{KVAR}}{L_o} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Donde: KVAR = KVAR totales por fase por paso.

$L_o$  = Inductancia total entre pasos (en microhenrios)

Para bancos conectados en estrella aterrizada, la máxima corriente de arranque es aproximadamente 87% de los valores determinados para el banco con neutro flotante o conectado en triángulo.

Los valores de inductancia que son usados para obtener  $L_o$ , están dados en la tabla # 4.1.

Estos valores son conservativos y generalmente producen una corriente de arranque mayor de la que realmente existe, dando con esto un

VALORES APROXIMADOS DE INDUCTANCIA	
ELEMENTO	INDUCTANCIA
Conductor monofásico aéreo	0.33 $\mu$ h/ft *
Cable trifásico	0.09 $\mu$ h/ft *
Interruptor monofásico tipo NR ( 15 Kv, 200 amperios )	0.8 $\mu$ h
Interruptor trifásico tipo VR ( 15 Kv, 400 amperios )	1.2 $\mu$ h
Banco de capacitores ( dos filas de unidades con espaciamento normalizado )	1.0 $\mu$ h **
Interruptor de circuito	Según fabricante
Interruptor de vacío	Despreciable

\* Se asume espaciamento normalizado, sin considerar el tamaño.

\*\* Independientemente del tamaño.

TABLA 4.1 Valores de inductancia aproximados.

factor de seguridad. La inductancia total para un banco de dos pasos consiste de la inductancia de cada banco. La inductancia de las líneas que interconectan y la del aparato de interrupción, más la inductancia de los reactores si son por último requeridos después de la determinación inicial de la corriente de arranque.

Cuando más de dos bancos son conectados en paralelo, la corriente de arranque para cada paso sucesivo, que es energizado, se incrementa por un porcentaje fijo si los pasos son de la misma dimensión y tienen igual inductancia entre ellos. Si no son iguales, se debe usar la más pequeña inductancia entre cualquiera de los pasos.

La tabla # 4.2 lista los factores de multiplicación a ser usados para varios números de pasos de igual dimensión. Se asume solamente que todos los bancos tienen el mismo tipo de conexión del neutro.

Aunque el voltaje es un factor, puede ser asumido que la mayoría de los bancos operan a un voltaje nominal. La corriente de arranque es directamente proporcional al voltaje aplicado versus el voltaje nominal.

#### Frecuencia de la corriente de arranque

La frecuencia de la corriente de arranque es un factor a ser considerado cuando la caída de voltaje a través de una inductancia es necesitada para un criterio de diseño. La frecuencia de la corriente de

FACTORES DE MULTIPLICACION		
NUMERO DE PASOS IGUALES	:	FACTOR $F_{mp}$
2	:	1.00
3	:	1.33
4	:	1.50
5	:	1.60
6	:	1.67
$\infty$	:	2.00

TABLA 4.2 Factores de multiplicación.

arranque puede ser determinada por la ecuación:

$$f = \frac{138 VR}{\sqrt{Lo KVAR}} \quad (\text{Hertz}) \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Donde: KVAR = KVAR totales por fase por paso.

Lo = Inductancia total entre pasos (microhenrios)

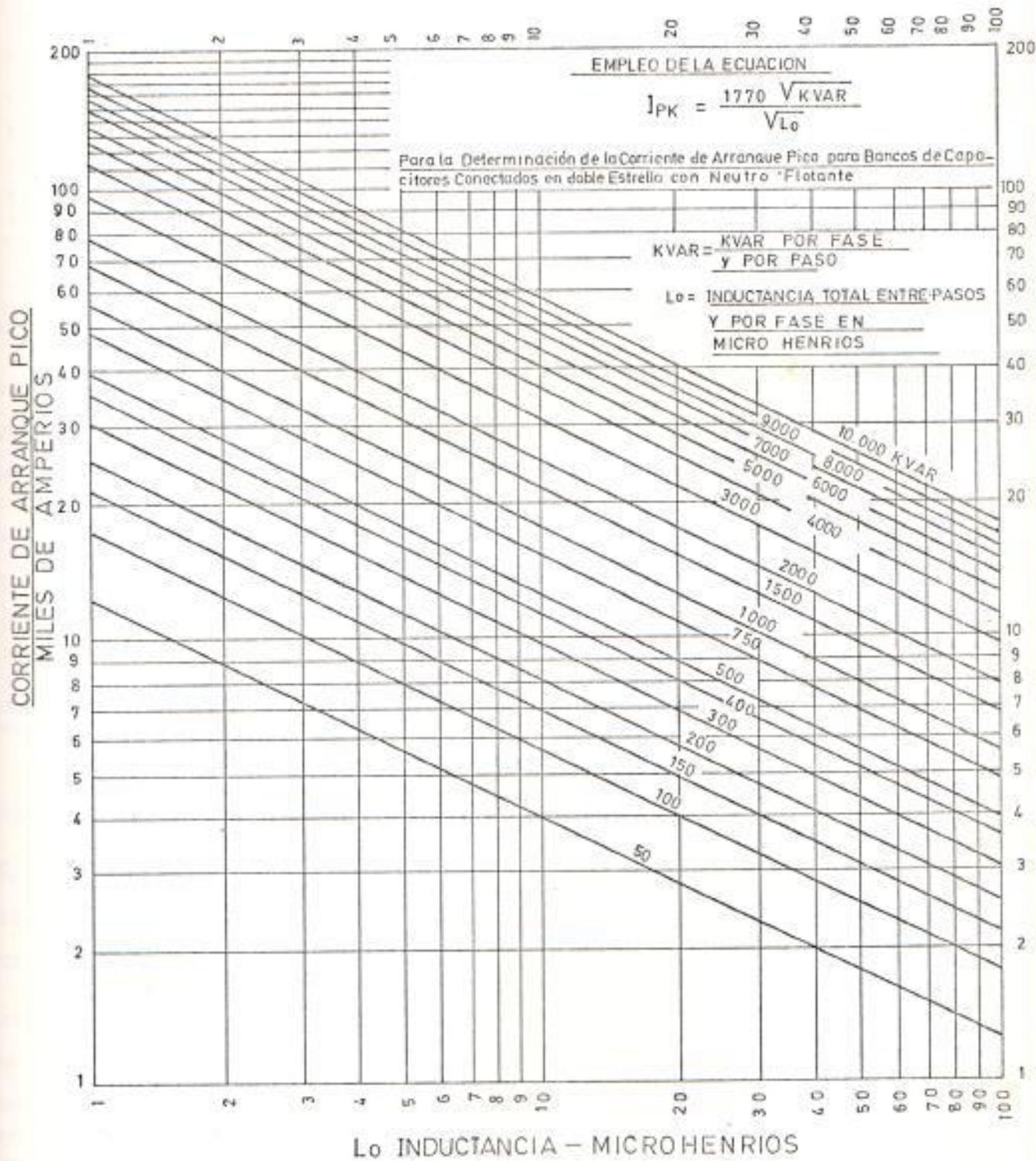
VR = Voltaje nominal RMS de línea a neutro.

#### Determinación de la corriente de arranque y su frecuencia

Después de que la inductancia total "Lo", entre dos pasos ha sido determinada, la corriente de arranque puede ser obtenida de la curva # 4.1 leyendo el valor de corriente opuesto a la intersección de "Lo" y los KVAR por fase por paso en la curva.

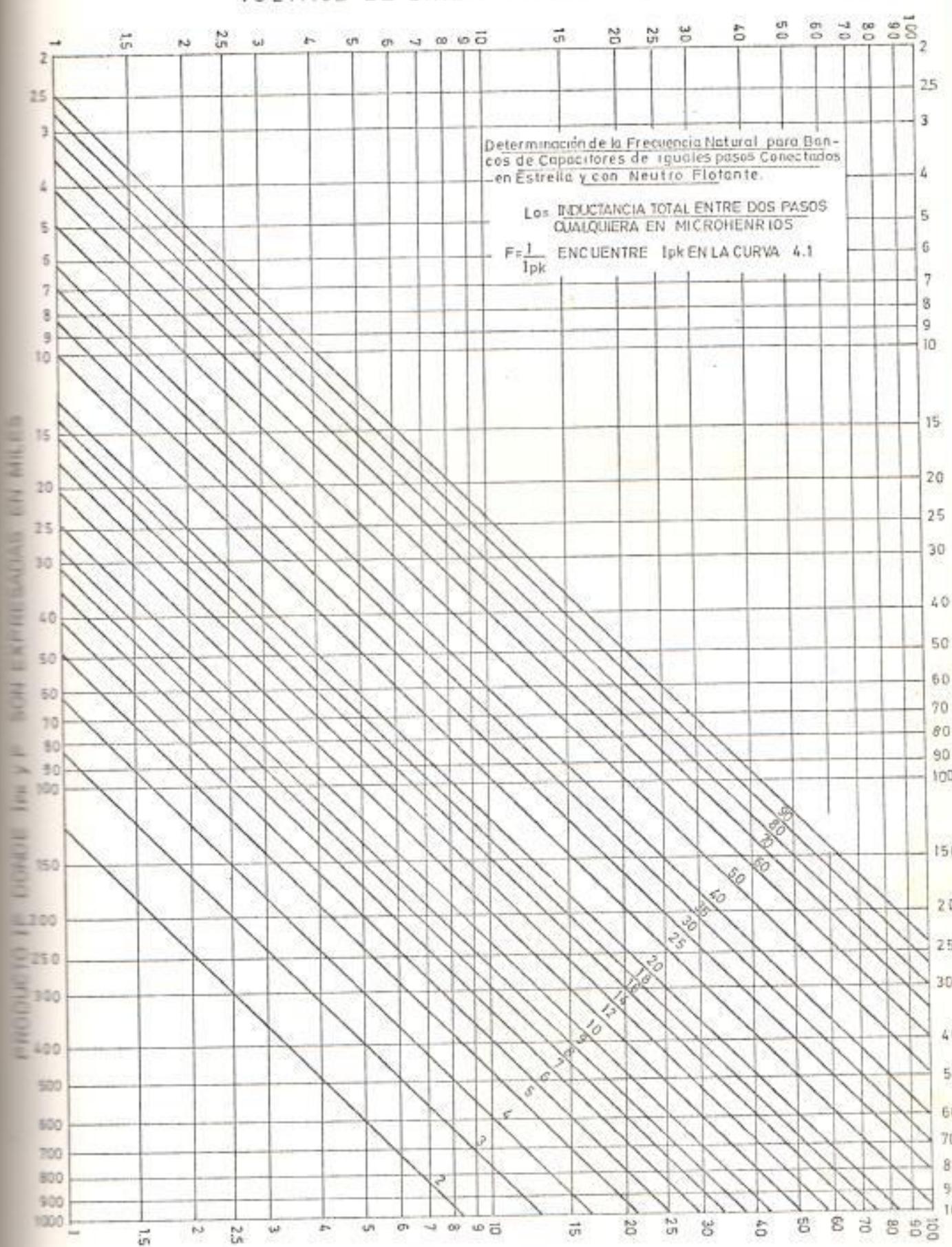
La curva # 4.2 puede ser usada para determinar la frecuencia. Primero hay que leer el valor del producto de la corriente y la frecuencia. Es encontrado en la curva # 2 donde el valor de voltaje de línea a neutro corta la inductancia total. La frecuencia es determinada dividiendo el producto de IF para la corriente obtenida de la curva # 4.1.

Como un ejemplo, se toma el de un banco de dos pasos con neutro flotante a 7.2/12.47 KV y 500 KVAR por fase por paso, y con una inductancia total de 20 microhenrios entre pasos. La corriente de arranque pico es 8.800 amperios como se lo determina de la curva # 4.1.



CURVA 4.1

CURVA 4.1 Determinación de la corriente de arranque



VOLTAJE DE LINEA A NEUTRO KV

CURVA 4.2

CURVA 4.2 Valor del producto corriente-frecuencia

El producto de la corriente y la frecuencia (IF) de la curva # 4.2 da  $88 \times 10^6$ . La frecuencia es  $88 \times 10^6$  dividido para 8.800 ó 10.000 hertz.

Hay que hacer dos consideraciones, la una es que cuando reactores son añadidos dentro del circuito para introducir una reactancia inductiva que limite las corrientes de arranque, las consideraciones que se deben tomar deben ser sobre el voltaje que se desarrollará a través del reactor. La frecuencia de la corriente es un factor importante, y es evidente de la curva # 4.2 que como el voltaje del banco se incrementa, la frecuencia se incrementa en una relación apreciable. Esto significa que puede ser necesario usar dos reactores en serie, no para limitar la corriente de arranque sino para limitar la caída de voltaje a través del reactor.

La otra es que los aparatos de interrupción con resistores limitadores de corriente de arranque que son preinsertados en el circuito antes de la operación de cierre del interruptor deben ser tratados diferentemente que los reactores, y las tablas y curvas anteriores no son aplicables. Por lo que se debe recurrir a los fabricantes, para las recomendaciones de las limitaciones en la conexión de bancos en paralelo.

#### Bancos aislados

El problema más simple es el de un solo banco de capacitores aislado

como se muestra en la figura # 4.4. Ya que los KVA de cortocircuito son usualmente conocidos para cualquier localización en el sistema, la siguiente expresión simplificada para la máxima corriente de arranque ha sido derivada basada en los KVA de cortocircuito obtenibles. Se asume que el circuito es cerrado en la cresta del voltaje y por lo tanto causa la máxima corriente de arranque.

$$I_{pk} = I_o \left[ 1 + \sqrt{\frac{\text{KVA de cortocircuito}}{\text{KVA del capacitor}}} \right] \quad (\text{amperios}) \quad (\text{Ec. 4.3})$$

$$f_R = f_o \sqrt{\frac{\text{KVA de cortocircuito}}{\text{KVA del capacitor}}} \quad (\text{Hertz}) \quad (\text{Ec. 4.4})$$

$I_o$  = Valor de cresta, amperios en estado estable

$f_o$  = Frecuencia del sistema

Los KVA de cortocircuito son los KVA de falla obtenibles en los terminales del banco de capacitores y deben ser basados sobre la reactancia inductiva solamente del sistema. Los KVA y los KVAR pueden ser trifásicos o monofásicos, pero deben ser los mismos para un cálculo dado.

Por conveniencia las curvas 4.3 y 4.4 han sido incluidas. La curva 3.4 muestra la corriente de arranque pico para un banco aislado cuando la corriente de falla obtenible del sistema y la corriente de línea nominal del banco son conocidas. Para usar esto, se debe convertir los KVA de falla del sistema en amperios RMS. La curva 4 mues -

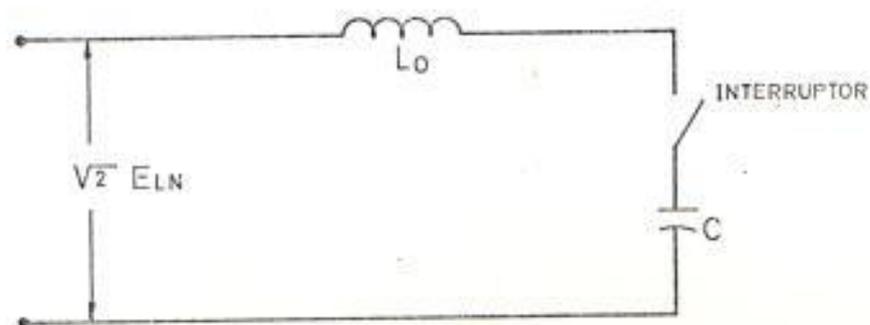


FIGURA 4.4  
FIGURA 4.4 Banco de capacitores aislado

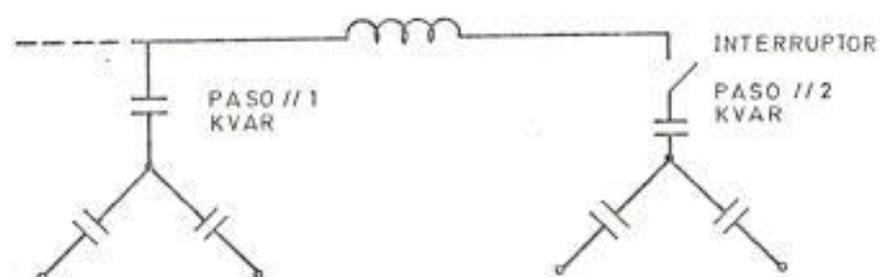
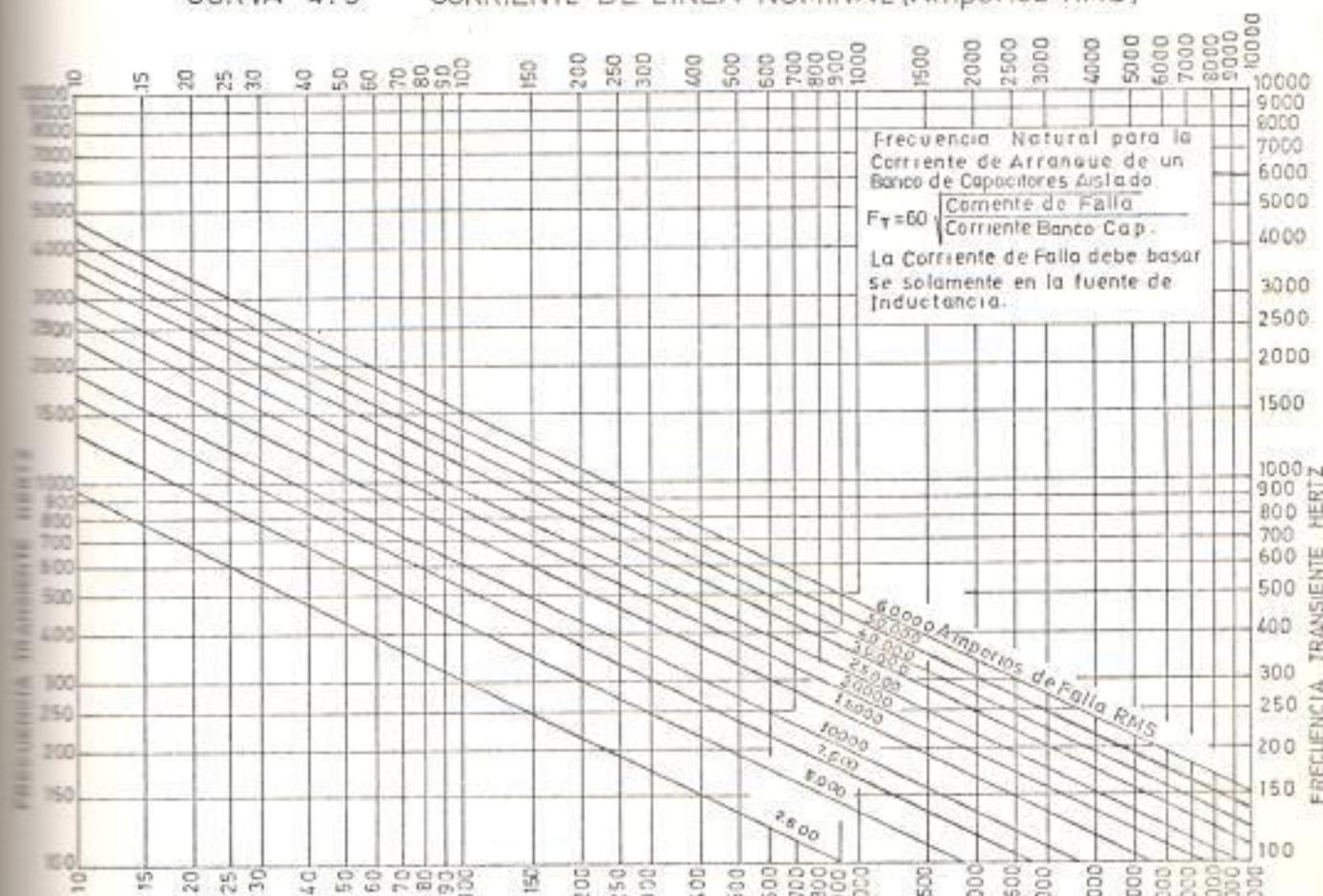
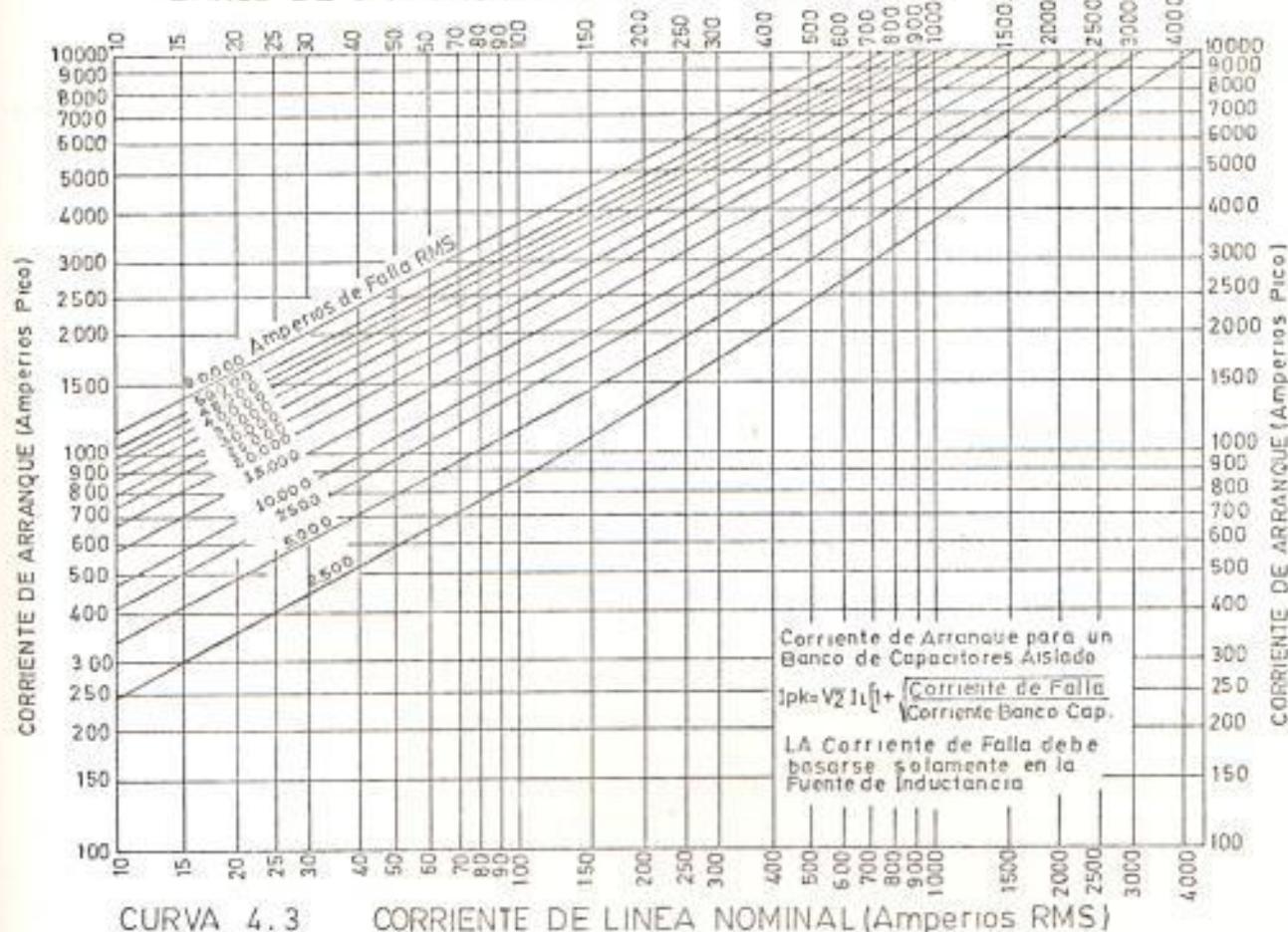


FIGURA 4.5  
FIGURA 4.5 Instalación típica

## BANCO DE CAPACITORES Corriente de Linea Nominal (Amperios RMS)



tra la frecuencia de arranque usando la misma información.

### Bancos en paralelo

Cuando un banco de capacitores es conectado en paralelo con otro banco o bancos, una corriente de arranque adicional fluirá. Esto es causado por la descarga de los capacitores de los bancos ya energizados en el banco descargado. Mientras la corriente de arranque del sistema está limitada por la reactancia inductiva del banco a la fuente, la corriente de arranque de los bancos en paralelo depende solamente de la reactancia inductiva entre los pasos de capacitores, y del voltaje al momento en que el interruptor es cerrado.

Es siempre asumido que el paso energizado es nuevamente cerrado en el voltaje pico. En este momento los pasos de capacitores ya energizados tienen la máxima carga sobre ellos, lo cual resultará en una más grande magnitud de la corriente de arranque. Al voltaje pico, la corriente estará en cero o cerca de cero y si la frecuencia del transiente es al menos 10 veces que la de la fuente de voltaje, casi toda la corriente de arranque para el banco recién energizado vendrá de los bancos en paralelo cargados.

La corriente transiente usualmente decae a valores insignificantes en menos de un ciclo a 60 hertz y a menudo habrá decaído a un valor más bajo dentro del medio ciclo a 60 hertz.

La determinación de la magnitud de la corriente de arranque y la fre

cuencia para un banco de capacitores de dos pasos, como el de la figura # 4.4, ya está dado por las ecuaciones mostradas en la parte que trata de bancos de varios pasos.

Las ecuaciones 4.5 y 4.6 que se ponen a continuación dan el cálculo de las corrientes de arranque y su frecuencia, pero empleando kilovars trifásicos y voltaje de línea a línea. Estas ecuaciones se pueden emplear en lugar de las ecuaciones 1 y 2, si es que se desea.

$$I_{pk} = \frac{1020 \sqrt{KVAR}}{\sqrt{L_o}} \quad (\text{amperios}) \quad (\text{Ec. 4.5})$$

$$f_t = \frac{138 VR}{\sqrt{L_o KVAR}} \quad (\text{Hertz}) \quad (\text{Ec. 4.6})$$

Donde: KVAR = KVAR nominales totales, trifásicos por paso  
VR = Voltaje nominal RMS de línea a línea.

Cuando más de dos pasos son conectados en paralelo las ecuaciones 1, 2, 5 y 6 son todavía usadas pero deben ser modificadas por un multiplicador, Fmp. Estos valores son tabulados en la tabla # 4.2 ya mostrada, a la que se le puede añadir que:

$$I_{pk} \text{ ("N" pasos)} = F_{mp} \cdot I_{pk} \text{ (dos pasos)}$$

$$f_t \text{ ("N" pasos)} = f_t \text{ (dos pasos)}$$

Refiriéndonos a la figura # 4.5 para cualquier instalación típica.

Se asume que todos los pasos son de igual tamaño y de igual espaciamiento. Si algunos pasos están demasiado juntos que otros, se debe usar el valor de la más baja inductancia entre los dos pasos para "Lo", en las ecuaciones.

Un ejemplo de los cálculos es mostrado siguiente la figura # 4.6.

Las corrientes de arranque son proporcionales al voltaje. Por lo tanto los valores calculados deben ser modificados por la relación del voltaje existente para el voltaje nominal.

Las ecuaciones dadas para bancos en paralelo, incluyen un factor el cual toma en consideración la corriente de arranque promedio suministrada por el sistema y el sobrevoltaje debido a la operación de cierre no simultánea. Un factor adicional es incluido, el cual aproxima la disminución promedio al primer pico del medio ciclo del transiente.

Las ecuaciones dadas también pueden ser usadas para los cálculos de los bancos conectados en delta, pero el voltaje equivalente de línea a neutro debe ser usado en las ecuaciones 4.5 y 4.6.

Por tomar parte en los cálculos de las corrientes de arranque donde bancos en paralelo están presentes, las curvas 1.4 y 2.4 deben ser empleadas. Para usar éstas es solamente necesario calcular la inductancia total entre dos pasos cualesquiera y conocer los KVAR por fase

por paso y el voltaje nominal (línea a neutro) de los bancos. (Si más de dos pasos existen en un banco y ellos no están igualmente espaciados, se usará el valor más pequeño de dos pasos cualquiera).

La frecuencia es obtenida de la curva # 4.2. Esta curva como ya fue mencionado, da directamente el producto de la corriente y de la frecuencia. Y para determinar la frecuencia, se divide el producto  $IF$  para la magnitud de la corriente obtenida de la curva # 1. Debe ser recordado que los valores así obtenidos de corriente se aplican solamente a bancos de dos pasos a los que se asume operando a voltaje nominal. Cuando el banco total tiene más de dos pasos, se debe emplear el multiplicador de la tabla # 2.4 para obtener la corriente correcta. Si el voltaje existente difiere del nominal, se debe también ajustar la magnitud de la corriente por la relación dada por el voltaje existente para el voltaje nominal.

Dando un ejemplo:

Cuatro pasos iguales, 7200/12.470 voltios, 3000 KVAR cada paso. Para todos ellos se emplea un interruptor VR. La línea total entre dos pasos cualesquiera es 150 pies de línea aérea de un solo conductor.

Se desea encontrar la corriente de arranque y su frecuencia natural.

Determinando Lo:

Inductancia característica			
de cada banco	= 1 uh	Total para dos pasos = 2	
Cada Vr	= 1.2 uh	Total para dos pasos = 2.4	
150 pies de línea aérea	= (0.33) (150)		= 49.5
			Lo 53.9

## Método # 1

$$I_{pk} = \frac{1770 \sqrt{KVAR}}{\sqrt{L_o}} \quad . \quad F_{mp} = \frac{1770 \sqrt{1000}}{\sqrt{53.9}} \times 1.5 = 11.400 \text{ (amperios)}$$

$$f_t = \frac{138 V_r}{\sqrt{L_o KVAR}} = \frac{(138) (7200)}{\sqrt{53.9 \times 1000}} = 4260 \text{ (Hertz)}$$

## Método # 2

$$I_{pk} = \frac{1020 \sqrt{KVAR}}{\sqrt{L_o}} \quad . \quad F_{mp} = \frac{1020 \sqrt{2000}}{\sqrt{53.9}} = 11.400 \text{ (amperios)}$$

$$f_t = \frac{138 V_r}{\sqrt{L_o KVAR}} = \frac{(138) (12.470)}{\sqrt{53.9 \times 3000}} = 4.260 \text{ (Hertz)}$$

Derivación de la ecuación (4.1)

La corriente pico para el circuito de bancos en paralelo de la figura # 5.4 es:

$$I_p = \sqrt{2} E \sqrt{\frac{C_{EQ}}{L_o}}$$

Usando los multiplicadores que toman en consideración la contribución de la fuente, del cerramiento de polos no simultáneos, la ecuación se convierte:

$$I_p = 1.15 (1.04) 0.9 (\sqrt{2}) E \sqrt{\frac{C_{EQ}}{L_o}}$$

$$\text{Con } C_1 = C_2 \text{ luego } EQ = \frac{1}{C_1} + \frac{2}{C_2} = \frac{C_1}{2}$$

Donde  $C_1$  es la capacitancia por fase por paso.

Además,

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f X_{c1}}$$

y

$$X_{c1} = \frac{E^2}{\text{KVAR} \times 10^3}$$

Sustituyendo (4) en (3), se obtiene:

$$C_1 = \frac{\text{KVAR} \times 10^3}{2\pi f E^2}$$

Ahora sustituyendo (5) en (1), se obtiene:

$$I_p = 1.15 (1.04) 0.9 \frac{2}{\sqrt{2}} E \sqrt{\frac{\text{KVAR} \times 10^3}{(2) (2\pi f) E^2 L_o \times 10^{-6}}}$$

Donde "Lo" es dada en microhenrios. Simplificando esta ecuación, considerando que la frecuencia es 60 hertz, se obtiene la ecuación que se quería derivar:

$$I_p = \frac{1770 \sqrt{KVAR}}{\sqrt{L_o}}$$

Esta ecuación puede ser usada para los cálculos en sistemas de 50 Hertz con tal que los kilovar usados en la ecuación sean el valor a 60 Hertz.

Derivación de Fmp para los cálculos de las corrientes de arranque en circuitos de bancos de capacitores de varios pasos.

Para entender el cálculo de la magnitud del arranque y su frecuencia natural de capacitores de varios pasos en paralelo, se debe primero entender el circuito básico. Este se muestra en la figura # 4.7.

Ha sido mostrado previamente que en un circuito de corriente alterna, se puede sustituir la fuente por un potencial de corriente continua,  $E^M$ , cuya magnitud es igual al valor pico de la fuente de corriente alterna aplicada. Esto dará como resultado el máximo transiente de arranque. Bajo estas condiciones luego,

$$I_{pk} = K_1 \frac{\sqrt{C_o}}{\sqrt{L_o}} \quad (\text{amperios})$$

$$t = \frac{K_2}{\sqrt{L_o C_o}} \quad (\text{Hertz})$$

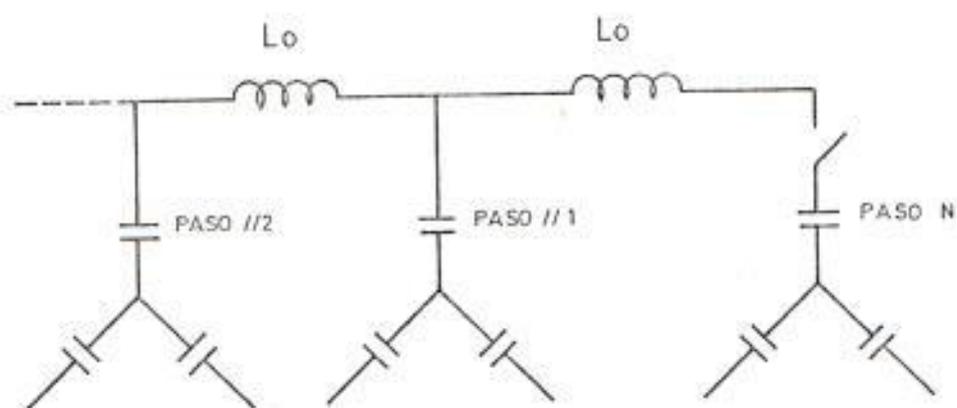


FIGURA 4.6 N PASOS IGUALES

FIGURA 4.6 Banco de N pasos iguales

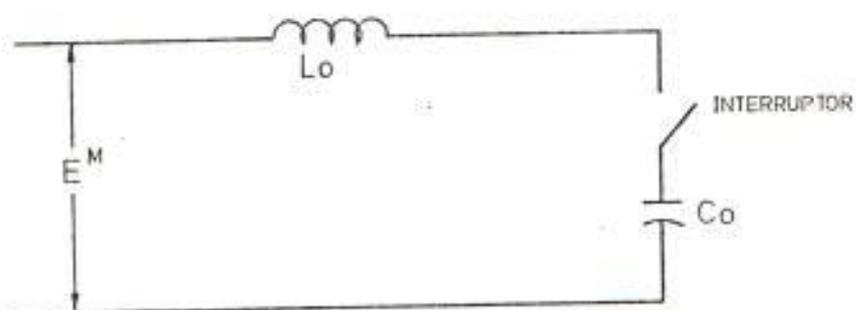


FIGURA 4.7

FIGURA 4.7 Circuito básico

En el análisis de un banco de capacitores de dos pasos iguales, se tiene un circuito como se muestra en la figura # 4.8.

Este circuito debe ser convertido en el circuito serie equivalente de la figura # 4.7 para poder aplicar las ecuaciones básicas. Es asumido que el capacitor energizado es cargado al valor pico del voltaje aplicado en el momento que el interruptor es cerrado. Esto, luego es representado por un voltaje D.C. igual a  $E_M$ . Por conveniencia la inductancia entre pasos es dividida en dos valores iguales,  $L_1$  y  $L_2$ . Las siguientes relaciones pueden ser establecidas.

$$L_o = 2 L \quad \text{Si: } L_1 = L_2 = L$$

$$L_o = \frac{C}{2} \quad \text{Si: } C_1 = C_2 = C$$

Luego:

$$I_{pk} (2) = K_1 \sqrt{\frac{C}{4L}} \quad (\text{amperios})$$

$$t = \frac{K_2}{\sqrt{LC}} \quad (\text{Hertz})$$

Estas ecuaciones ahora servirán como base para todos los otros estudios de bancos de varios pasos.

Ahora se examinará un banco de tres pasos como el mostrado en la figura # 4.9.

Nuevamente se ha dividido la inductancia total entre pasos adyacentes

en dos de igual valor,  $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_3$ . Se puede simplificar el asunto diciendo que  $L = L_1 = L_2 = L_3$  y que como todos los capacitores son iguales  $C = C_1 = C_2 = C_3$ . Es cierto entonces que para el circuito serie básico:

$$L_o = \frac{L}{2} + L = \frac{3}{2} L$$

$$C_o = \frac{2C^2}{3C} = \frac{2}{3} C$$

La expresión para corriente y frecuencia es:

$$I_{pk(3)} = K_1 \sqrt{\frac{2C}{3} \left| \frac{3}{2} L \right.} = K_1 \sqrt{\frac{4C}{9L}} \quad (\text{amperios})$$

$$t = \frac{K_2}{\sqrt{\frac{3L}{2} \frac{2C}{3}}} = \frac{K_2}{\sqrt{LC}} \quad (\text{Hertz})$$

La relación de  $I_{pk(3)}$  para  $I_{pk(2)}$  es:

$$\frac{I_{pk(3)}}{I_{pk(2)}} = \frac{K_1 \sqrt{\frac{4C}{9L}}}{K_1 \sqrt{\frac{C}{4L}}} = \sqrt{\frac{16}{9}} = 1.33$$

De esto se puede ver que si tenemos pasos iguales de capacitancia y de igual inductancia entre pasos, la corriente de arranque de un banco de tres pasos puede ser calculada usando la capacitancia de un paso y la mitad de la inductancia entre dos pasos cualquiera, por la

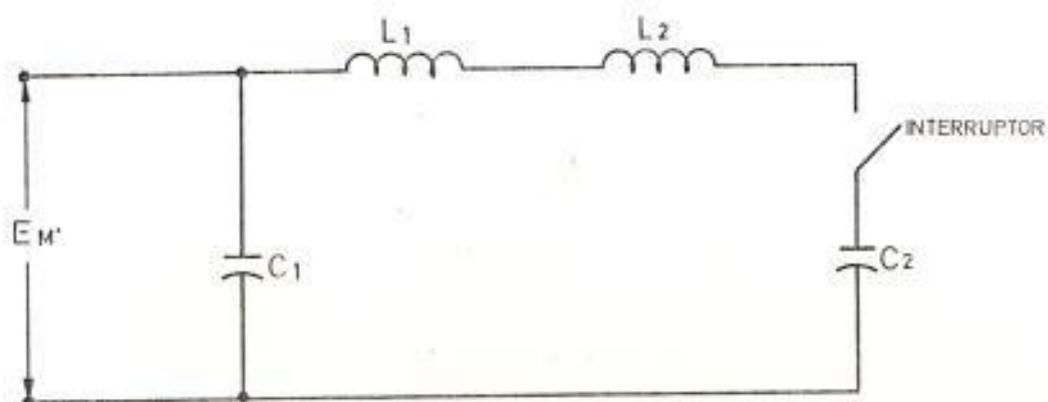


FIGURA 4.8

FIGURA 4.8 Banco de dos pasos iguales

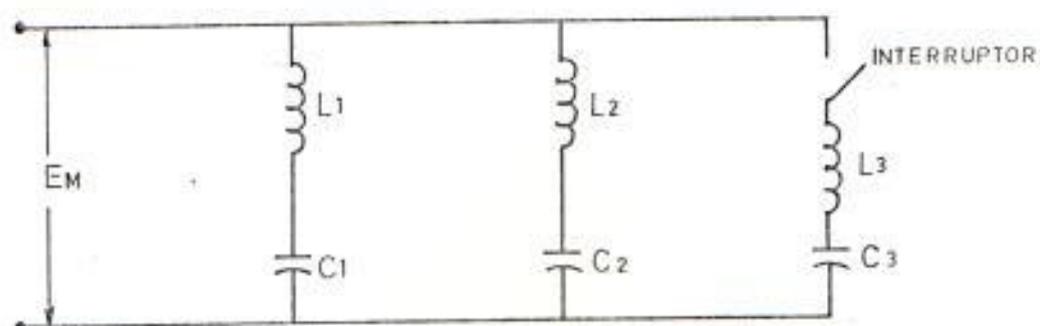


FIGURA 4.9

FIGURA 4.9 Banco de tres pasos

son es la misma que la de uno de dos pasos y es simplemente:

$$f_t = \frac{K_2}{\sqrt{LC}} \text{ (Hertz)}$$

Donde L y C nuevamente son la mitad de la inductancia entre dos pasos cualquiera y la capacitancia de un paso.

El mismo análisis puede ser aplicado para un banco de cuatro pasos.

El circuito es mostrado en la figura # 4.10.

$$\text{Si: } L = L_1 = L_2 = L_3 = L_4, \text{ Luego } L_o = \frac{L}{3} + L = \frac{4}{3} L$$

$$\text{Si: } C = C_1 = C_2 = C_3 = C_4, \text{ Luego } C_o = \frac{3}{4} C$$

$$\text{y: } I_{pk}(4) = K_1 \sqrt{\frac{3C}{4} \left| \frac{4}{3} L \right.} = K_1 \sqrt{\frac{9C}{16L}} \text{ (Amperios)}$$

$$f_t = \frac{K_2}{\sqrt{\frac{4L}{3} \times \frac{3}{4} C}} = \frac{K_2}{\sqrt{LC}}$$

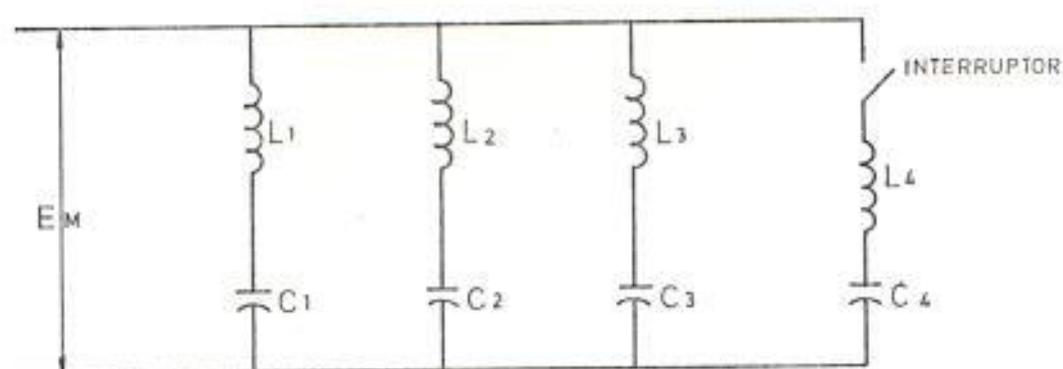


FIGURA 4.10

FIGURA 4.10 Banco de cuatro pasos

La relación de  $I_{pk}(4)$  a  $I_{pk}(2)$  es:

$$\frac{I_{pk}(4)}{I_{pk}(2)} = \frac{K1 \sqrt{\frac{9}{16} \frac{C}{L}}}{K1 \sqrt{\frac{C}{4L}}} = \sqrt{\frac{36}{16}} = 1.5 \text{ (Amperios)}$$

$$Y: I_{pk}(4) = 1.5 I_{pk}(2) = K1 \sqrt{\frac{C}{4L}} \text{ (1.5) (Amperios)}$$

El análisis para 5, 6, 7,.... N pasos es idéntico y un juego de multiplicaciones,  $F_{mp}$ , puede ser establecido para cualquier número de pasos. Usando estos, la corriente para un banco de dos pasos es siempre determinado y luego incrementada por el factor correspondiente al número total de pasos. El límite de  $F_{mp}$  es 2 cuando el número de pasos, N, se aproxima al infinito.

La frecuencia natural para cualquier número de pasos siempre será la misma que la que fue determinada para un banco de dos pasos.

Por conveniencia estas ecuaciones han sido re-escritas en términos de los KVAR y del voltaje RMS aplicado. Además, para evitar confusión la inductancia total entre dos pasos cualquiera es usada con las constantes  $K1$  y  $K2$  en las que se introducen todos los factores de conversión necesarios. Esto significa que para encontrar la corriente de arranque para el último paso energizado con cualquier número de pasos en paralelo y la frecuencia natural, se necesita solamente conocer los KVAR nominales de los pasos, la inductancia entre

dos pasos adyacentes y el voltaje RMS aplicado de línea a neutro.

$$I_{pk(n)} = \frac{1770 \sqrt{KVAR}}{\sqrt{L_o}} \quad F_{mp} \quad (\text{Amperios})$$

$$t = \frac{138 V_r}{\sqrt{L_o KVAR}} \quad (\text{Hertz})$$

#### 4.2. Problemas de ferresonancia en bancos de capacitores grandes

La ferresonancia no es generalmente un problema con los bancos de capacitores grandes, ya que estos bancos son escogidos para dar menos del 3% de subida de voltaje en el momento de la conexión de éste, y esencialmente son siempre cerrados usando circuitos interruptores trifásicos.

Los bancos de capacitores usados en los sistemas de transmisión y subtransmisión emplean a menudo un sistema de control de voltaje, el cual sacará automáticamente de servicio al banco en contingencias que den como resultado un voltaje excesivo. Todo esto da como resultado un funcionamiento del banco, sin problemas de ferresonancia.

Ampliando un poco este fenómeno podemos decir que el capacitor como un parámetro circuital tiene la capacidad intrínseca de resonar a determinada frecuencia con las inductancias del circuito, de ello resulta que bajo ciertas condiciones, la resonancia

puede ocurrir con el capacitor en combinación con las reactancias a tierra en el sistema o en su equipo. Varios fenómenos de sobrevoltajes transientes ya han ocurrido, los cuales han sido debido directamente a la presencia de bancos de capacitores en paralelo en el sistema. Los problemas de resonancia caen generalmente dentro de estas siguientes categorías:

- 1) Sobrevoltajes en el circuito primario, cuando se tiene bancos de capacitores en paralelo instalados en circuitos de distribución aterrizados en varios puntos y en el que se emplean transformadores de distribución monofásicos.
- 2) Sobrevoltajes transientes que ocurren en el secundario de un transformador trifásico que tiene capacitores en el primario.
- 3) Sobrevoltajes resonantes directos, que son los que ocurren simplemente por la acción de conectar el banco de capacitores al circuito.

Los sobrevoltajes transientes en los primeros dos casos ocurren cuando uno o dos elementos que se encuentran conectados son abiertos y, un circuito resonante es establecido entre la reactancia magnetizante del transformador y la reactancia a tierra del transformador.

Para la primera categoría de resonancia, es decir la resonancia

en transformadores de distribución monofásicos, las conclusiones a las que se llega son:

- 1) Este fenómeno particular de resonancia ocurre solamente en circuitos de cuatro hilos que tienen cargas monofásicas de línea a tierra y bancos de capacitores no aterrizados. Donde el capacitor puede ser conectado en estrella no aterrizada o en triángulo.
- 2) La resonancia ocurre cuando una o dos fases se abren y esta falla se encuentra entre el banco de capacitores y la fuente de voltaje.
- 3) Sobrevoltajes serios o inversión del neutro ocurren solamente durante condiciones de muy poca carga. Este tipo de resonancia sería la más predominante y bien conocida, excepto que los valores necesarios de capacitancia, inductancia y resistencia están fuera del rango generalmente encontrados en los circuitos de alimentadores primarios.
- 4) La condición de resonancia puede ser impedida: aterrizando el neutro del banco de capacitores, evitando fases abiertas entre el capacitor y la fuente de voltaje, o manteniendo las constantes del circuito fuera del rango crítico.

Hablando de la resonancia en transformadores de distribución trifásicos, este segundo tipo de fenómeno de resonancia puede

ocurrir con un banco aterrizado de capacitores y un banco de transformadores de distribución conectado en estrella no aterrizada - triángulo. Con uno o dos conductores de fase abiertos, la reactancia capacitiva y la reactancia magnetizante del circuito tienden a formar un paso resonante de baja impedancia, que se encuentra relacionado con estas reactancias. Esto permite que la corriente al fluir dé como resultado la aparición de altos voltajes en el secundario o en las fases abiertas del primario. Los voltajes del circuito pueden alcanzar una magnitud de dos a tres veces el voltaje de línea a línea normal.

El problema puede ocurrir aún donde los capacitores en paralelo no están instalados, debido a la capacitancia de línea a tierra del circuito, sin embargo, la presencia de un banco en paralelo conectado en estrella agrava la situación.

Por último, el fenómeno asociado con la tercera condición, es decir el sobrevoltaje resonante directo, es un efecto resonante indeseable que causa altos voltajes cuando un banco de capacitores es físicamente conectado a un sistema. Estos sobrevoltajes ocurren a menudo en sitios distantes del banco de capacitores, como un circuito de bajo voltaje acoplado inductivamente a través de un transformador al circuito en el cual el capacitor está localizado.

Generalmente, el circuito reductor de voltaje tiene un banco fi

jo de capacitores eléctricamente próximo. Por ejemplo, los altos sobrevoltajes transientes podrían ser observados cerca de los capacitores ubicados en el secundario cuando un banco de capacitores es conectado a un alimentador primario. Esto es debido a que un circuito resonante toma forma con el capacitor del secundario y el alimentador y la inductancia del transformador entre los dos bancos de capacitores. Cuando el banco del primario es conectado, una frecuencia transiente ocurre, la cual dispara el circuito resonante causando el sobrevoltaje. Este tipo de problema puede conducir a fallas en los fusibles o pararrayos en los circuitos de bajo voltaje y en posibles descargas en los terminales del transformador o en fallas de los instrumentos de peste en el circuito de alto voltaje.

Todas estas tres condiciones de resonancia mencionadas son difíciles de reconocer y casi imposible de predecir. Solamente después de que el problema ocurre, este puede ser relacionado a los bancos de capacitores, ya que un conjunto peculiar de condiciones deben ocurrir antes de que cualquier resonancia directa o ferresonancia como las anteriormente descritas, puedan causar voltajes anormales en el sistema. Si el problema aparece, condiciones correctivas tales como relocalización del banco de capacitores, aterrizamiento ya sea del transformador o el banco de capacitores, dependiendo del tipo de problema encontrado, retiro de los elementos de protección monofásicos de entre el banco de capacitores y el transformador, o el añadir una impedan -

cía de amortiguamiento tal como un reactor, usualmente eliminarán el problema de resonancia completamente.

## CAPITULO V

### PROTECCION Y SECCIONAMIENTO DE BANCOS DE CAPACITORES

#### 5.1. Protección del banco

La protección de una subestación de bancos de capacitores a menudo implica algunos elementos de protección como: fusibles individuales, alarma y disparo contra desbalance y arcos eléctricos del grupo, y protección contra fallas, todo esto en un esquema coordinado. La filosofía usual es que los fusibles individuales aislen las unidades falladas o las descargas en los terminales de las unidades individuales; la protección contra desbalance protegerá contra fallas dentro de un grupo serie y contra la exposición prolongada de las unidades de capacitores a sobrevoltajes; y la protección contra falla desconectará el banco de capacitores del sistema en el caso de un cortocircuito de línea a línea o de línea a tierra dentro del banco.

Los varios "niveles" de protección proveerán un grado de redundancia en la protección del banco de capacitores y del sistema. Estos "niveles" necesitan ser coordinados entre ellos y con el funcionamiento esperado del sistema.

Es conveniente empezar con la protección con fusibles de las unidades individuales, luego proceder a la protección contra desbalance y finalmente a la protección contra fallas. El énfasis en la minimización de daños sugiere que la protección responda tan rápido como sea posible para minimizar el daño producido por la falla. Por otra parte, las operaciones fijas que causan que la instalación de capacitor salga de servicio son también indeseables. Una protección apropiada resulta de la elección correcta de las unidades individuales de fusibles más rápidas, luego se coordina el resto de la protección con las características de estos fusibles y las restricciones del sistema.

## 5.2. Seccionamiento de bancos de alto voltaje

Empezaremos mencionando algunas técnicas útiles para el cálculo del ajuste de la protección de desbalance.

Considerando un sistema de unidades donde cada unidad individual de capacitores es una unidad de capacitancia, una unidad de impedancia y una unidad de conductancia, tendremos por ejemplo que, 15 tarros en paralelo con una unidad de voltaje aplicado transportaría 15 unidades de corriente; con dos unidades de voltaje transportaría 30 unidades de corriente, y así sucesivamente.

Así, la corriente a través de un grupo serie de capacitores es

el producto del número de capacitores en paralelo por las unidades de voltaje aplicado.

Para varios grupos series, el producto del número de capacitores y unidades de voltaje para cada grupo serie es igual a una constante (ya que la corriente es la misma en cada grupo serie). Por ejemplo, considerando dos grupos series de diez capacitores cada uno y, en los cuales un fusible ha operado en uno de los dos grupos series (figura # 5.1). Luego 10 unidades de voltaje sobre los 9 capacitores da un producto (corriente) de 90 y 9 unidades de voltaje sobre los 10 capacitores da un producto de 90. Nueve (9) unidades de voltaje sobre el grupo serie con 10 capacitores más 10 unidades de voltaje en el grupo serie con 9 capacitores da un total de 19 unidades de voltaje (figura # 5.2).  $9/19$  del voltaje está sobre las diez unidades y  $10/19$  sobre las 9 unidades. Hay que notar que el voltaje promedio por grupo serie sería 9.5 unidades, de tal manera que los  $10/19$  representan  $10/9.5$  del voltaje por unidad, o cerca del 5% de sobrevoltaje y que los 10 capacitores tienen solamente  $9/9.5$  de la corriente original dando una reducción en la corriente de cerca del 5%.

Esta técnica puede ser extendida a cualquier número de grupos series como se ilustra en la figura # 5.3 para tres grupos series. En esta manera, es útil para los cálculos en los bancos trifásicos conectados en estrella aterrizados donde cada fase

UNIDADES CAPACITORAS (Elementos luego de Operación del Fusible)		UNIDADES DE VOLTAJE Arbitrarias	PRODUCTO DEL VOLTAJE POR LAS UNIDADES (Unidades de Corriente Arbitraria)
9		10	90
10		9	90
		TOTAL 19	

FIGURA 5.1 Voltaje Arbitrario y Unidades de Capacitancia para determinar la División de Voltaje entre Grupos Serie.

UNIDADES CAPACITORAS		UNIDADES DE VOLTAJE	VOLTAJE PROMEDIO	VOLTAJE POR UNIDAD
9		10	9.5	$\frac{10}{9.5} \approx 1.05$
10		9	9.5	$\frac{9}{9.5} \approx 0.95$

CORRIENTE =  $\frac{9}{9.5}$  x CORRIENTE ORIGINAL EN LOS CAPACITORES

FIGURA 5.2 Uso de un voltaje arbitrario y Unidades de capacitancia para determinar el voltaje por unidad en los capacitores y su corriente.



puede ser considerada como un banco monofásico independiente; a los resultados se les puede añadir cuando sea requerido el ángulo de fase apropiada con respecto al neutro.

#### Bancos conectados en estrella no aterrizados

Para bancos trifásicos conectados en estrella no aterrizados, es conveniente considerar el instante en el ciclo eléctrico al cual la fase del banco de máximo interés está en el pico del voltaje positivo (1 por unidad). En ese instante, las otras dos fases están ambas a un voltaje de  $-1/2$  por unidad (figura # 5.4). Asumiendo que la fase de máximo interés sea la fase A, por análisis en ese instante, las fases B y C del banco pueden ser comparadas y conectadas a un voltaje de  $-1/2$  por unidad entre un extremo y el neutro del capacitor. La fase A es conectada a un voltaje de  $+1$  por unidad con respecto al neutro.

Así, en la figura # 5.5, un banco trifásico compuesto de un solo grupo serie con 10 capacitores por fase sería representado como un simple circuito serie empezando con 20 capacitores en paralelo a un voltaje por unidad de  $-0.5$ , y luego 10 capacitores en paralelo a un voltaje por unidad de  $+1$ .

Para este circuito simplificado, uno puede considerar 20 capacitores con una (1) unidad de voltaje para un producto de 20 y 10 capacitores con dos (2) unidades de voltaje para el mismo producto de 20. Así, 3 unidades de voltaje son equivalentes a 1.5 por unidad, resul -

## BANCO EN ESTRELLA NO ATERRIZADA (2 Grupos Series)

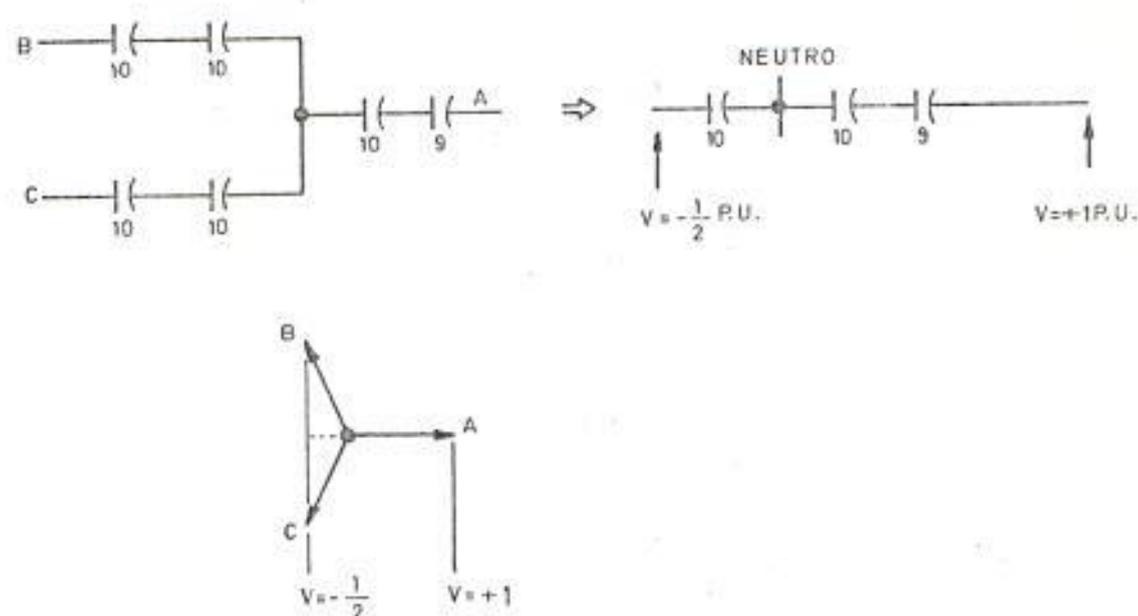


FIGURA 5.4 El Banco en Estrella no Aterrizado es Simplificado a un Divisor Monofasico

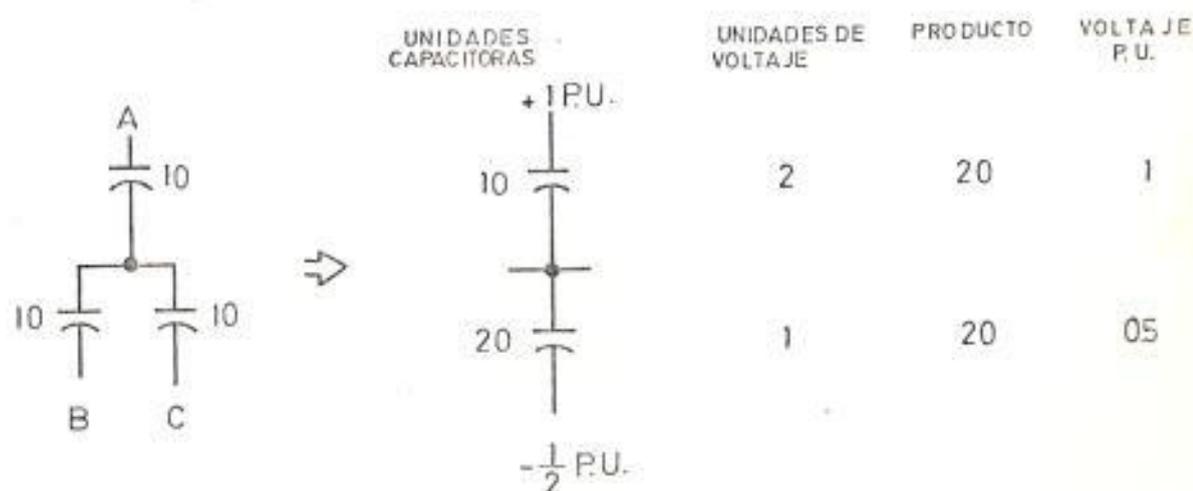


FIGURA 5.5 Un Grupo Serie de un Banco en Estrella No Aterrizado

tando en 1.0 por unidad sobre la fase de interés al voltaje pico y cero voltaje en el neutro como se esperaba.

A continuación se considerará que una unidad ha sido retirada de la fase de interés. El circuito (figura # 5.6) luego se convierte en 20 capacitores conectados entre -0.5 por unidad y el neutro, y 9 capacitores del neutro a +1 por unidad. Considerando 9 unidades de voltaje sobre los 20 capacitores para un producto de 180 y 20 unidades de voltaje sobre los 9 capacitores para el mismo producto de 180. Así, 29 unidades de voltaje es equivalente a un voltaje de 1.5 por unidad. Las 20 unidades de voltaje sobre la fase de interés representa:

$$\frac{20}{29} \times 1.5 = \frac{30}{29}$$

En voltaje por unidad sobre la fase de interés, o cerca del 3% de incremento de voltaje. Esto también representa un voltaje por unidad de 0.03 de neutro a tierra para propósitos de detección.

Considerando ahora un banco similar pero no aterrizado con dos grupos series de 6 capacitores cada uno con un (1) tarro fuera de uno de los grupos series en la fase de interés (figura # 5.7). La primera simplificación es poner en paralelo las fases B y C a un voltaje por unidad de -0.5 con respecto al neutro. Seis capacitores en serie con seis capacitores que están en paralelo, resulta en simplemente seis capacitores conectados a un voltaje de -0.5 por unidad con

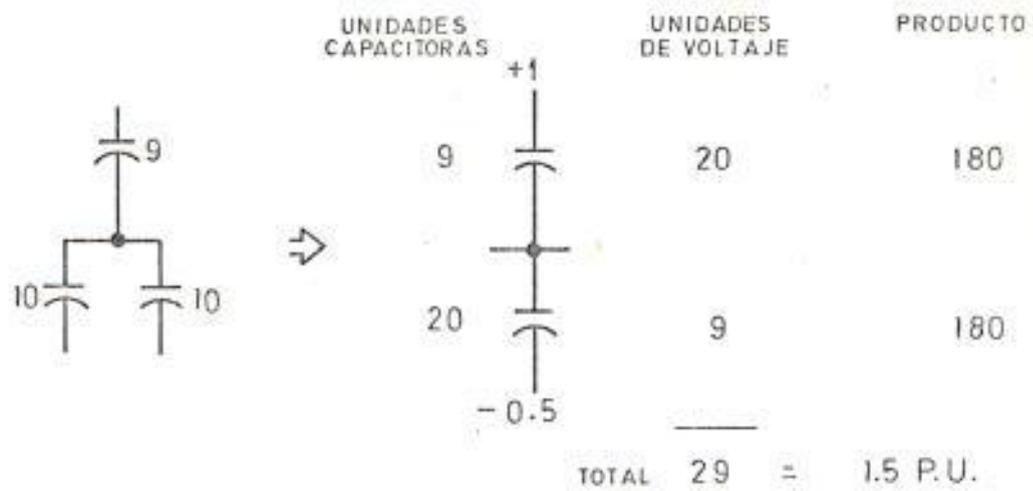


FIGURA 5.6 El Banco de la Figura 5.5 luego de ser Retirada una Unidad Capacitora de la Fase A.

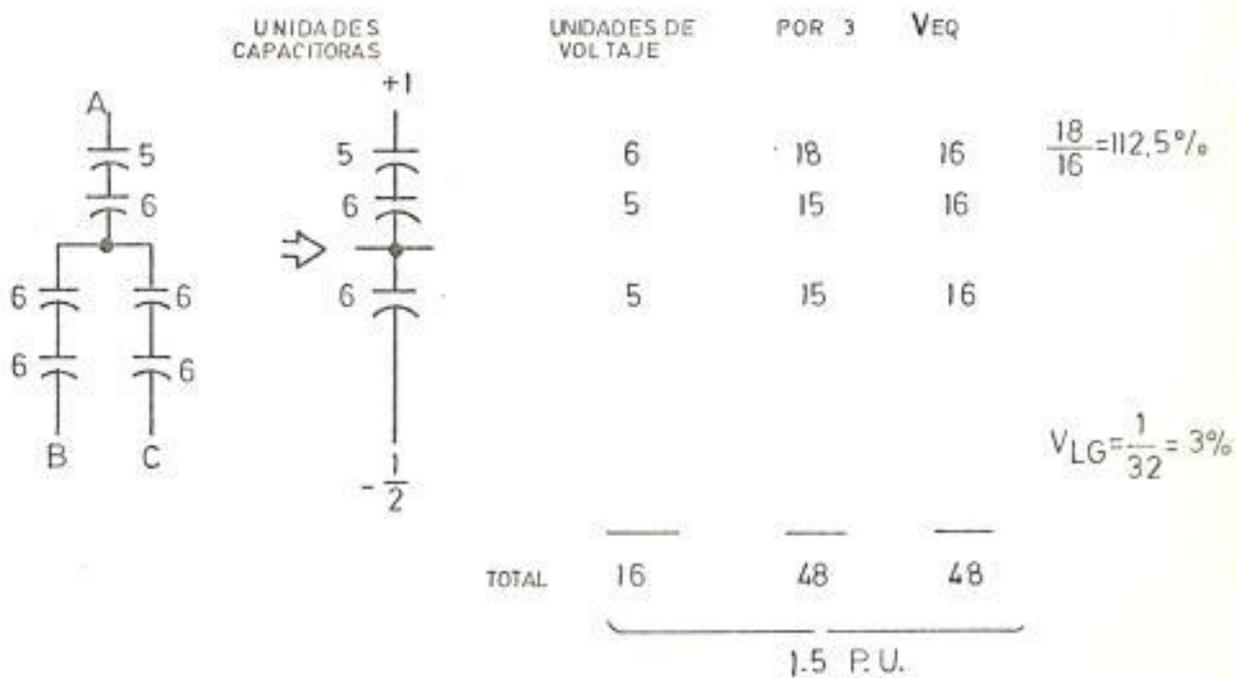


FIGURA 5.7 Un pequeño Banco en Estrella No Aterrizada da un 112,5% del Voltaje con una Unidad Capacitora Fuera, 3% del Voltaje de Linea a Tierra en el Neutro.

respecto al neutro. La fase de interés es representada por seis capacitores en serie con cinco capacitores conectados desde el neutro a un voltaje de +1 por unidad. Considere cinco unidades de voltaje sobre cada uno de los grupos de seis capacitores y seis unidades de voltaje sobre el grupo de cinco capacitores para un producto en cada caso de 30. Así, dieciseis unidades de voltaje son equivalentes a 1.5 por unidad. Las seis unidades de voltaje sobre el grupo serie de interés es igual a:

$$\frac{6}{16} \times 1.5 = \frac{9}{16} \text{ En por unidad}$$

Para un sobrevoltaje de:

$$\frac{\frac{9}{16} - \frac{1}{2}}{\frac{1}{2}} = \frac{1}{8} = 12.5\%$$

Así, una unidad fuera representa el 12.5 por ciento de sobrevoltaje sobre las unidades restantes. Cualquier banco en el que resulta tener más del 10% de sobrevoltaje sobre las unidades restantes cuando una unidad está fuera de servicio, se lo designa con el término de "tamaño mínimo del banco". Para tal instalación, más unidades de menor KVAC nominal o unidades de más alto voltaje (dan más capacidad de sobrevoltaje) usualmente serían consideradas. Para un sobrevoltaje del 12.5 por ciento sobre el grupo serie de interés, se debe considerar el voltaje en el neutro. El voltaje sobre la fase de interés es 11 unidades:

$$\frac{11}{16} \times 1.5 = \frac{16.5}{16} \text{ en por unidad}$$

El voltaje en el neutro es entonces:

$$\frac{16.5}{16} - 1 = \frac{0.5}{16} = \frac{1}{32} = 0.03 \text{ en por unidad (= 3\%)}$$

#### Bancos en Y-Y no aterrizados

Para un banco no aterrizado en estrella-estrella, la mitad balanceada del banco puede ser representada (figura # 5.8) como las tres ramas del banco en paralelo y conectada a una fuente de voltaje cero. La mitad desbalanceada del banco es representada en la misma manera como un simple banco en estrella no aterrizado, con una conexión adicional desde el neutro a través de la representación del banco balanceado a una fuente de voltaje cero (figura # 5.9).

Considerando la fase "A" de la mitad desbalanceada a ser la fase de interés. El neutro de esa fase puede ser representado como el voltaje que ocurriría si la fase de interés no estuviera conectada, en serie con los cinco terminales que no son de interés y en paralelo al punto neutro como se ilustra en la figura # 5.10. Así, para dos bancos iguales, el voltaje del neutro es determinado por el divisor de voltaje de -0.5 por unidad a través de dos unidades de capacitancia al punto neutro y luego a través de tres unidades de capacitancia a voltaje cero. Con las dos unidades de capacitancia teniendo tres u-



FIGURA 5.8 Simplificación del Neutro de un Banco Trifásico Balanceado

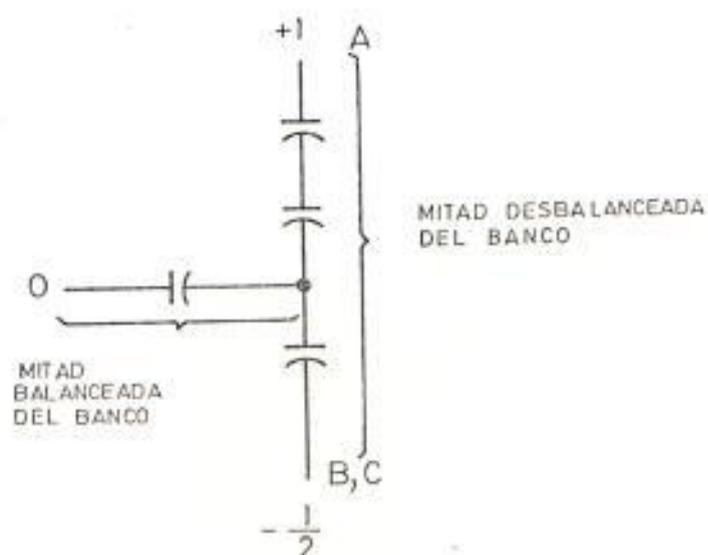


FIGURA 5.9 Combinación de Partes Balanceadas y Desbalanceadas de un Banco Estrella No Aterrizado.

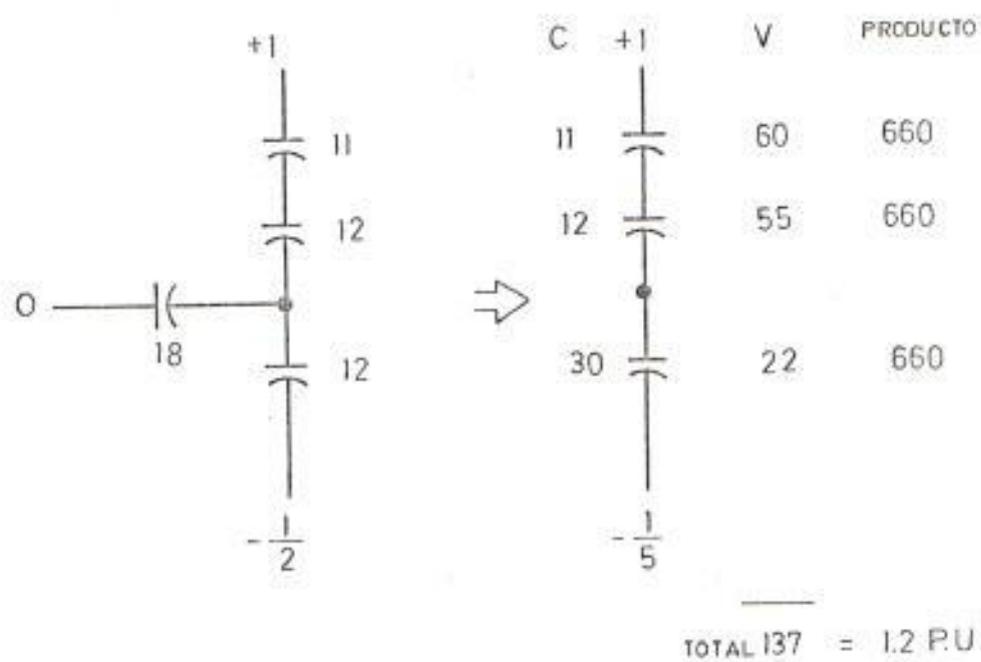


FIGURA 5.10 Más Simplificaciones de la Figura 5.9 para dos Bancos Iguales, 12 Unidades Capacitoras por Grupo Serie, 1 Fusible Fuera en un Grupo

nidades de voltaje para un producto de seis y tres unidades de capacitancia, teniendo dos unidades de voltaje para el mismo producto, el voltaje en el neutro resultante es  $2/5$  de  $-0.5$  en por unidad, para  $-0.2$  en por unidad.

Los voltajes en la fase de interés puede ahora ser investigada conectando  $-0.2$  en por unidad a través de una capacitancia igual a la suma de las capacitancias de las tres ramas de la parte balanceada del banco en paralelo con las dos ramas que no son de interés en la parte desbalanceada del banco (o cinco unidades de capacitancias) al neutro y así en serie con la fase de interés a  $+1$  por unidad. Este es un simple divisor de voltaje similar a la situación monofásica primero descrita.

Para el banco estrella-estrella, la corriente en el neutro entre las dos mitades es de interés para el ajuste del relé. Un estimado razonable de esta corriente es  $0.5$  de la corriente que fluiría a tierra si el neutro del banco fuera aterrizado.

Una representación más segura puede ser obtenida de la siguiente manera (figura # 5.11).

El neutro de la mitad balanceada del banco puede ser representado como una fuente de voltaje cero conectada en serie con la suma de las tres capacitancias de las ramas al punto neutro como antes (equivalente Thevenin). Similarmente, el voltaje en el neutro de la mitad

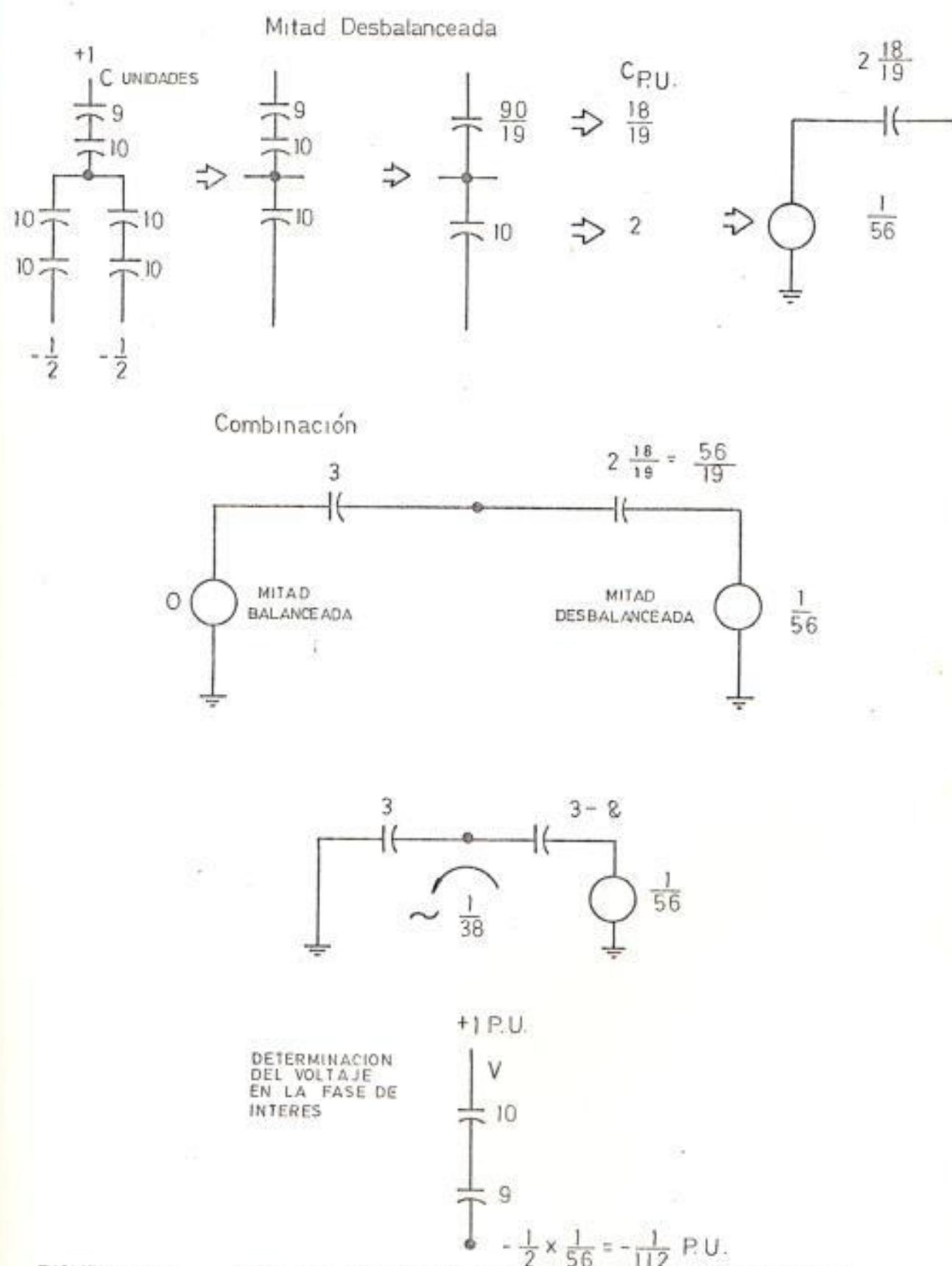


FIGURA 5:11

Determinación de la Corriente del Neutro en un Banco Estrella-Estrella No Aterrizado, 2 Grupos Series, 10 Unidades Capacitoras por Grupo Serie, una Unidad Capacitora Fuera.

desbalanceada del banco puede ser calculada como si la mitad balanceada no existiera. Luego, el neutro de la mitad desbalanceada puede ser representado como ese voltaje, el cual ocurriría a falta de la mitad balanceada en serie con la combinación en paralelo de las capacitancias en las tres ramas de la mitad desbalanceada a su punto neutro (también equivalente Thevenin). La corriente entre los puntos neutros es luego calculada determinando la corriente que fluiría entre los neutros si ellos fueran conectados juntos. Hay que notar que entre las dos fuentes de voltaje, existen dos grupos de capacitores en serie. Uno de los grupos está formado por los tres terminales del capacitor balanceado. El otro está formado por las tres ramas del capacitor desbalanceado, las cuales son solamente un poco menor que las tres ramas de ese capacitor antes de que se vuelva desbalanceado. El error de usar la capacitancia balanceada para la mitad desbalanceada del banco es usualmente pequeña. Simplificando entonces, la corriente en el neutro es estimada como el voltaje, el cual ocurriría en el neutro de la mitad desbalanceada del banco estrella-estrella en ausencia de la otra mitad, aplicado a través de una capacitancia igual a las tres ramas de la una mitad del capacitor en paralelo en serie con la capacitancia de las tres ramas de la otra mitad del capacitor en paralelo. Para cuando las mitades son iguales, la capacitancia efectiva es simplemente la mitad de la capacitancia de las tres ramas de la mitad del banco en paralelo. Si a cada rama se asume que tiene una capacitancia de uno por unidad, luego la capacitancia efectiva para este cálculo es  $3/2$  en por unidad. Si el voltaje que ocurriera en el neutro es, por ejemplo, 0.05 en

por unidad; luego la corriente que fluiría en el neutro es  $3/2$  veces 0.05 ó 0.075 veces la corriente normal en cada mitad del banco.

#### Ajuste del relé de desbalance

El mínimo ajuste del disparo para un relé de desbalance es establecido por la cantidad de voltaje o corriente en el punto de sensado con el máximo sobrevoltaje permitido sobre las unidades restantes después de la operación del fusible. Por ejemplo, para un banco conectado en estrella aterrizado formado por tres grupos series, con un sobrevoltaje del 10% sobre el grupo serie en el cual los fusibles han operado, habrá una reducción del 5% en el voltaje sobre cada uno de los otros dos grupos en esa fase, resultando en un cambio neto del 5% en la corriente en la fase para una corriente de 0.05 en por unidad en el neutro. Así, el disparo del relé deberá ser ajustado para un 5% de la corriente de fase nominal.

Durante la operación del fusible, a todo la corriente de fase se la considera que va a través de la unidad fallada. El grupo serie que contiene la unidad fallada es considerado completamente cortocircuitado con un voltaje cero. Así, para el caso de la estrella aterrizada con tres grupos series, cada uno de los grupos series no fallados tendrán una y media veces el voltaje normal y la corriente de fase será una y media veces la normal. La corriente resultante en el neutro será la mitad de la corriente de fase normal.

Si el "pickup" del relé es ajustado para un 5% de la corriente de fa

se, luego la corriente durante la operación del fusible es:

$$\frac{0.05}{0.05} = 10 \text{ veces el "pickup" del relé.}$$

De las características de despeje total del fusible, el tiempo para que la unidad de fusible individual opere con 1.5 veces la corriente de fase normal a través de un fusible puede ser determinada. El tiempo de retardo del relé es ajustado de tal manera que el fusible operará un poco antes de que el relé dispare. Usualmente las corrientes transientes dentro de una unidad fallada aceleran la operación del fusible, creando un margen adicional entre las operaciones del fusible y del relé, de tal manera que usualmente no se requiere ni un poco de margen o margen adicional alguno. El tiempo de retardo del relé debe ser mantenido tan corto como sea posible para minimizar los daños en el caso de un arco externo que no sea protegido con los fusibles.

El ajuste de los esquemas de regulación con relés usando algunos de estos es clara con ajuste independiente del "pickup" y del tiempo de retardo. Algunos relés son ajustados para solamente nivel del "pickup"; las características inherentes del relé (inercia, etc.) intentan proveer una coordinación satisfactoria para una apropiada acción del fusible, pero evitando un excesivo tiempo para arcos externos dentro de un grupo serie. Ambos tipos de relés han dado muchos años de operación confiable. El error más común en la aplicación son los

ajustes con tiempo de retardo excesivos para los relés con ajustes - de retraso separado.

#### Protección contra fallas

La protección contra sobrecorriente normal es usualmente requerida - para aislar un banco de capacitores rápidamente en el caso de una fa lla de fase a fase o de fase a tierra dentro del banco de capacitores. Esta protección deberá ser sin un recierre automático a fin de evitar voltajes y corrientes transientes excesivos, los cuales pueden ser asociados con la conexión dentro de un banco cargado.

Los ajustes del relé o la capacidad de los fusibles del banco deben proporcionar un más rápido aislamiento de posibles fallas sin que causen operaciones indeseadas debido a transientes.

#### Relés interruptores automáticos

El elemento instantáneo proporciona una rápida operación para fallas de fase a fase o de fase a tierra. Ajustes extremadamente bajos de este relé pueden resultar en disparos indeseables en el arranque del capacitor o las corrientes transientes del sistema. El mínimo ajuste para el elemento instantáneo depende de la "velocidad" de este elemento.

Algunos fabricantes de relés pueden tener recomendaciones para sus

relés específicos.

Ajustes en el rango de dos veces a cuatro veces la corriente de fase normal son usualmente apropiados; los relés electrónicos o estáticos tienden a ser ligeramente más sensitivos que los relés electromecánicos.

Alguna protección de respaldo para el relé de desbalance puede ser obtenida del elemento de retardo de tiempo. El elemento de retardo de tiempo es ajustado con algún pequeño margen sobre la máxima corriente normal esperada en la fase. Por ejemplo, con un banco conectado en estrella aterrizado, la máxima corriente de fase puede ser esperada a ser tan alta como el 135% de la nominal.

El elemento de retardo de tiempo podría tener un mínimo "pickup" del 150 al 175% de la corriente de fase nominal (los capacitores no tienen requerimientos de sobrecarga ni energización de cargas en frío).

El retardo de tiempo entonces sería coordinado con el retardo de tiempo del relé de desbalance y con las características de fundido de las unidades de fusibles individuales, de tal manera que sea esperado que los fusibles operen primero, el relé de desbalance operaría en un corto tiempo si el fusible falló en despejar la falla, luego el elemento de retardo de tiempo del relé de sobrecorriente despejaría la falla después de un muy corto tiempo, si el relé de desbalance falló en disparar el interruptor automático.

Para bancos de alto voltaje con muchos grupos series, el tiempo de retardo requerido en el relé de sobrecorriente es muy corto. Para este caso, algunos grupos series deben ser cortocircuitados antes del "pickup" del relé de sobrecorriente. No hay necesidad de esperar a la protección de desbalance para operar.

#### DISPOSITIVOS DE INTERRUPCION

##### Interruptores automáticos

Los interruptores automáticos de todos los tipos han sido ampliamente usados con los bancos de capacitores en paralelo y su funcionamiento ha sido generalmente bueno. La particular ventaja del uso de un interruptor automático para este efecto, es la capacidad del interruptor para también proporcionar protección contra cortocircuitos de la instalación de capacitores. Las únicas áreas específicas de desventaja en el uso de los interruptores automáticos para la conexión y desconexión de bancos de capacitores pueden ser en la severidad del funcionamiento mecánico debido a posibles requerimientos de operación frecuente, y el posible incremento en los costos de mantenimiento, lo cual podría ser necesario (comparado a un interruptor automático funcionando estrictamente para protección de fallas, o a un interruptor de capacitores diseñado específicamente para este tipo de frecuente funcionamiento). La severidad del funcionamiento mecánico debido a la operación frecuente impondría un esfuerzo relativamente grande sobre los interruptores automáticos de alto voltaje que

sobre los interruptores de nivel de distribución debido al bajo porcentaje de requerimientos de operación mecánica para los interruptores de 121 KV para arriba y aún aquellos de 38 hasta 72.5 KV.

Muchos interruptores magnéticos de aire, de 5 y 15 KV, ya sea que se encuentren en el interior o el exterior de la cabina de distribución, están en servicio como dispositivos de interrupción de capacitores.

A niveles de voltaje de distribución y subtransmisión, los interruptores automáticos de aceite también son usados para la conexión y desconexión de capacitores.

A niveles de voltaje de transmisión, 121 KV para arriba, los interruptores automáticos con y sin aceite, los de explosión o los de SF<sub>6</sub>, son empleados para la interrupción de bancos de capacitores. Los interruptores de explosión o los de SF<sub>6</sub> son particularmente capaces para funcionar en la conexión y desconexión de capacitores debido a que su resistencia de interrupción, o esfuerzo, es provisto de la energía almacenada y por tanto independiente de la magnitud de la corriente a ser interrumpida, en contraste general a algunos diseños de interruptores automáticos de aceite.

Con el fin de aumentar sus capacidades de recuperación del dieléctrico, particularmente para la interrupción de bajas corrientes o de corrientes capacitivas, los diseños de los interruptores automáticos de aceite pueden incorporar bombas operadas con resorte o pistones

para limpiar el área de contacto con aceite limpio durante la operación de apertura. Esta acción incrementa la capacidad de soporte de voltaje a través de los contactos durante el período de tiempo entre  $t_1$  y  $t_2$  y más allá en una operación como la de la figura # 5.12, reduciendo la probabilidad de ocurrencia de los "restrikes".

Otros medios usados para mejorar la habilidad de conexión y desconexión de capacitores de los interruptores automáticos (medios generalmente usados solamente en algunos interruptores de aceite, pero actualmente adaptables a cualquier tipo de dispositivo de interrupción) es la inserción de un resistor durante la operación de apertura para producir efectivamente una interrupción de dos pasos, con la consiguiente reducción del esfuerzo de voltaje a través de los contactos de cada paso. Una aplicación típica de estos resistores es en los interruptores de 121 y 145 KV, donde son montados en paralelo con éstos.

El funcionamiento eléctrico de tales resistores durante la interrupción de una corriente capacitiva ya fue mostrado. En la separación de los contactos en " $t_0$ " un arco es iniciado entre los contactos principales. Al tiempo " $t_1$ " la corriente principal  $I_c$  es interrumpida en su próxima corriente cero. El resistor es luego insertado dentro del circuito y una corriente  $I_{rc}$  continúa a través del interruptor con una magnitud reducida y una relación de factor de potencia adelantado con el voltaje del sistema. El voltaje del capacitor  $E_c$  es reducido, de lo que podría haber sido en el caso de no usar resistor, imponiendo un bajo voltaje a través de los contactos principa-

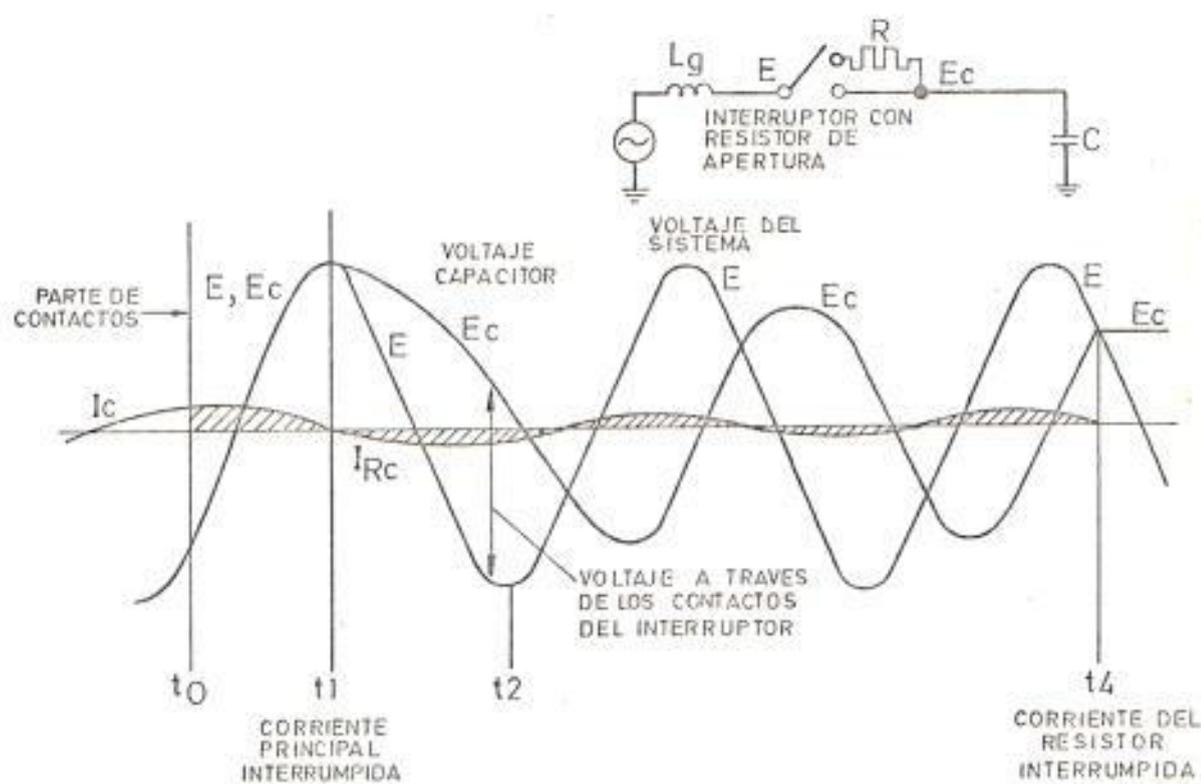


FIGURA 5.12

FIGURA 5.12 Fenómeno de voltaje y corriente durante la interrupción de la corriente capacitiva cuando hay resistores de apertura

les en el período alrededor del tiempo  $t_2$ , reduciendo o eliminando la oportunidad de ocurrencia de un "restrike". Si un "restrike" ocurre, los futuros transientes de voltaje serán más pequeños ya que el resistor reduce el voltaje a través de los contactos principales, y por lo tanto, el diferencial de voltaje sobre los cuales los transientes de "restrike" están basados.

La magnitud de voltaje que aparece a través de los contactos principales en el tiempo  $t_2$  es una función del valor relativo del resistor y la reactancia capacitiva del banco. Por ejemplo, para un banco de capacitores aterrizado, una relación de  $R/X_c$  de aproximadamente 2.11 resultará en un voltaje pico  $E_{lg}$  de 1.0 por unidad a través de los contactos principales al tiempo  $t_2$ .

En un arreglo típico, como el mostrado esquemáticamente en la figura # 5.12, el continuo desplazamiento del contacto móvil resulta en la interrupción completa de la corriente  $I_{rc}$  al tiempo  $t_4$ , dejando una carga parcial de voltaje atrapada sobre los capacitores  $E_c$  después de  $t_4$ . Si los "restrikes" ocurren al contacto marcado, los transientes de voltaje serán generalmente de menor consecuencia debido al amortiguamiento proporcionado por el propio resistor.

#### Interruptores de capacitores

En adición a los muchos bancos de capacitores que son conectados y desconectados por interruptores automáticos, diremos que existe tam-

bién un gran número de grandes bancos que son controlados por elementos de interrupción específicamente diseñados para esta función y usualmente tienen muy poca o no tienen capacidad de interrupción de fallas. Aunque los interruptores de aceite y de gas (SF<sub>6</sub>) son empleados, la mayor proporción de estos mecanismos usados exclusivamente para la interrupción de bancos de capacitores son cortacircuitos con interruptores de vacío. Los cortacircuitos con interruptores de vacío han sido usados para la conexión y desconexión de bancos de capacitores por más de 15 años y se ha trabajado mucho en su desarrollo y mejorándose también su aplicación inicial.

Estos dispositivos de interrupción han sido desarrollados para que trabajen de una manera económica y segura, por lo que brindan un largo servicio con mínimo mantenimiento.

Las unidades interruptoras para la conexión y desconexión de capacitores usadas actualmente son básicamente bastante simples en su construcción, consistiendo de un par de contactos en una envoltura de vidrio o cerámica con los contactos móviles teniendo un arreglo de fuelles para permitir su movimiento. Hay una pantalla metálica rodeando la apertura del área de contacto, ya sea flotando eléctricamente o conectada a un contacto, para prevenir la condensación del vapor metálico sobre la pared del interruptor.

Las características más importantes de estos dispositivos que usan interruptores de vacío para la conexión y desconexión de bancos de

capacitores son su rápida recuperación del dieléctrico, su efectiva eliminación de los "restrikes", y su gran capacidad de operación de vida mecánica que permite un largo servicio bajo condiciones de operación frecuente requerida.

Debido a que los interruptores de vacío para capacitores tienen muy poca o ninguna capacidad de interrupción de cortocircuitos, otros medios pueden ser aplicados con éstos para proteger a los bancos contra cortocircuitos. Generalmente estos medios han sido ya sea fusibles de poder principales o interruptores de respaldo, los que son empleados actualmente. Un arreglo que ha incrementado su uso en los recientes años es la aplicación de un cortocircuito para desconectar el primer paso de un banco de varios pasos (con otros pasos desconectados por interruptores de vacío) y proveer protección contra falla para todo el banco. En estos casos, el cortocircuito debe tener la capacidad para interrumpir el banco total combinado, al menos bajo la condición de tener una o más fases falladas.

### 5.3. Seccionamiento de bancos de bajo voltaje

Para la protección de bancos de capacitores con fusibles individuales se deben tener en cuenta tres consideraciones:

- 1.- La elección entre fusibles de expulsión y los limitadores de corriente.
- 2.- Características de fundido continuo y de derretimiento.

3.- Tener en cuenta las curvas de ruptura de los tanques.

Analizando:

1.- Las unidades fusibles para los capacitores individuales están usualmente divididas en fusibles de expulsión (o no limitadores de corriente) y los fusibles limitadores de corriente. Como lo dice su nombre, los fusibles limitadores de corriente tienen la habilidad de limitar la cantidad de energía que va a una unidad de capacitor fallada desde el sistema de potencia o de las unidades en paralelo. Los fusibles de expulsión usualmente conducirán la corriente de falla y de descarga hasta una corriente de frecuencia normal cero después del punto de fusión, y estos fusibles esencialmente no limitan la corriente de descarga de las unidades en paralelo ni la entrada de energía del sistema de potencia más allá de la que normalmente ocurriría en un medio ciclo de la corriente de frecuencia de falla.

Los fusibles de expulsión son normalmente menos caros que los fusibles limitadores de corriente y pueden ser usados si estas tres condiciones se dan:

1.- La corriente obtenible del sistema a una unidad fallada esté dentro de la capacidad de cortocircuito del fusible, y dentro de la capacidad de soporte de ruptura del

tanque de la unidad del capacitor para medio ciclo de la corriente de falla.

- 2.- La energía obtenible de las unidades en paralelo esté dentro de la capacidad de ruptura del tanque de una unidad fallada, usualmente estimada en 10 kilojoules. (El fusible puede ser capaz de descargar 30 kilojoules o más sin dañarse; y es usualmente sólo empleado a energía en paralelo de 10 kilojoules ( 3000 KVAC) debido a la posibilidad de ruptura del tanque de la unidad fallada).
- 3.- Que se tenga un espacio adecuado para los gases de ex - pulsión. Los fusibles de expulsión simples no son normalmente usados con equipos de capacitores instalados - en subestaciones cerradas.

Para limitar la corriente de falla y la energía descargada desde las unidades en paralelo a la unidad fallada, los fusibles limitadores de corriente tienden a reducir la probabilidad de ruptura del tanque para una unidad fallada comparado con uno de expulsión simple, que es un fusible no limitador de corriente.

- 2.- Selección de las características de fundido continuo y de - rretimiento

Los fusibles de las unidades individuales necesitan ser capaces de transportar continuamente tanto la corriente nominal del capacitor y la sobrecorriente debido a las tolerancias de fabricación de la unidad, el sobrevoltaje del sistema y el equipo de desbalance de voltaje del capacitor, y las corrientes armónicas.

Los factores de 1.25 por la corriente nominal de los bancos no aterrizados y de 1.35 por la corriente nominal de los bancos aterrizados, usados para la aplicación de los interruptores automáticos, son usualmente adecuados para especificar el requerimiento de corriente continua para los fusibles individuales de las unidades de capacitores. Estos factores usualmente proveen un completo margen adecuado; los standard para las tolerancias de fabricación y las corrientes armónicas son abundantes.

La selección de las características de fundido del fusible es un acuerdo entre la posibilidad de ruptura del tanque para una unidad fallada y la operación "indeseable". Las características de fundido rápido tienden a reducir la energía dentro de la unidad fallada, pero también incrementa la probabilidad de una operación del fusible debido a los transientes.

Algunas operaciones indeseables son probablemente relacionada

das con fusibles defectuosos, ajustes impropios, etc. Las operaciones indeseadas en estos fusibles no son probablemente muy afectadas por la capacidad de éstos.

Por años la guía de aplicación de standares de capacitores de los fabricantes han sugerido un "factor de fundido" de 1.65, lo bastante grande como para evitar las operaciones indeseables.

Para las subestaciones de bancos de capacitores en el sistema, los transientes desde el sistema debido a una conexión o desconexión, descargas eléctricas, etc., no han sido una mayor causa de operaciones indeseables del fusible de las unidades individuales. Las fallas de arcos eléctricos dentro de un banco de capacitores, que persistan pueden causar muchas operaciones "indeseables". También, bajo algunas condiciones, la falla de un capacitor puede conducir a la operación indeseada de un fusible cercano. Esta probabilidad es pequeña cuando los fusibles paralelo en un grupo serie son colocados en pareja con otros. El muy ocasional reemplazo de fusibles por fallas de arcos eléctricos en la barra en un banco de capacitores (esperado a ser poco frecuente) parece ser un pequeño precio para una mejor protección total de ruptura del tanque. La acción limitadora de corriente de un fusible sobre una unidad fallada tiende a limitar la capacidad de descarga a los fusibles sobre las uni

dades adyacentes, reduciendo la probabilidad de operaciones de otros fusibles, particularmente donde éstos son colocados en pareja con otros.

Donde las unidades individuales de fusibles estén apropiadamente coordinadas con la protección de desbalance, llevándolas a tiempos de fundido rápido permitirá a la protección de desbalance tener menos tiempo de retraso, resultando un rápido disparo para cualquier falla por arcos eléctricos dentro del banco de capacitores. Esta reducción en el tiempo disminuye el tiempo al cual los fusibles están sujetos a los transientes asociados con las fallas de arco en la barra y de esta manera se reduce la probabilidad de operación indeseada. Aparentemente no ha habido un incremento sustancial en las operaciones indeseables durante el período de reducción de la dimensión de los fusibles desde el valor de fundido original de 1.65 al valor de 1.35, ni del cambio de tiras fusibles "T" a "K" en los fusibles limitadores de corriente. La experiencia sugiere que para aplicaciones usuales, un factor de fundido de 1.35 es satisfactorio, y que algunos cambios pueden ser posibles con factores de fundido un poco más bajos.

Cuando se instala un banco por primera vez, es deseable revisar que todos los fusibles estén ajustados y que no tengan un aparente daño físico. La mayor parte de las opera -

ciones indeseables parecen ocurrir en los comienzos de la operación de la instalación de capacitores.

El empleo de tiras fusibles de diferente capacidad o de diferentes tipos de fusibles limitadores de corriente en un grupo serie puede llevar a la operación indeseada de algunos de los fusibles más rápidos en el caso de que una falla afecte uno de los fusibles más lentos.

3.- Para seleccionar los fusibles basándonos en las curvas de ruptura de los tanques algunos principios deberán ser observados, éstos son:

1.- La tira fusible debe ser capaz de transportar continuamente el 135% de la corriente nominal del capacitor.

2.- La caja fusible debe tener la suficiente capacidad de interrupción para manejar exitosamente la corriente de falla obtenible.

3.- La tira fusible debe soportar, sin dañarse, la corriente transiente normal durante la energización o desenergización. Similarmente, ésta debe soportar la corriente de descarga de las unidades durante un corto entre terminales.

4.- Para bancos conectados en estrella no aterrizados donde

la máxima corriente de falla es limitada a tres veces - la corriente de línea normal, la tira fusible debe despejar en cinco minutos a 95% de la corriente de falla - obtenible.

5.- Para una protección efectiva del capacitor, la máxima corriente de falla no debe exceder de los siguientes valores:

A. Capacitores con película dieléctrica tipo R

100 KVAR - 4000 amperios

150 KVAR - 5000 amperios

B. Capacitores con papel dieléctrico convencional

25 y 50 KVAR - 4000 amperios

100 KVAR - 5000 amperios

6.- Las características de despeje tiempo-corriente de las tiras fusibles deben coordinar con las curvas de ruptura del tanque del capacitor.

Para cualquier instalación de capacitores, el principio 1 establece la capacidad de corriente continua de la tira requerida, mientras que, los principios 2 y 3 definen la región en la cual la parte de alta corriente del fusible debe caer.

El principio 4 establece la región en la cual la parte de baja corriente del fusible debe caer. El principio 5 define la corriente máxima permitida a través de un capacitor - cortocircuitado, en base a las limitaciones de diseño de una unidad y al tiempo mínimo de despeje reconocido de un fusible de expulsión.

Las curvas de ruptura del tanque son esenciales para la correcta selección de los fusibles para la protección de sobrecorriente de cualquier instalación de capacitores. La selección del fusible es basada en la probabilidad de ruptura del tanque indicada por las curvas y la característica de tiempo de despeje máximo de una tira fusible. Este principio fundamental ha sido desarrollado para asegurar una operación segura de los equipos del capacitor. Esto, sin embargo, no implica que los capacitores fallen frecuentemente. Por el contrario, las estadísticas de servicio de los capacitores indican que las fallas anuales son menos que el 0.1% de todas las unidades.

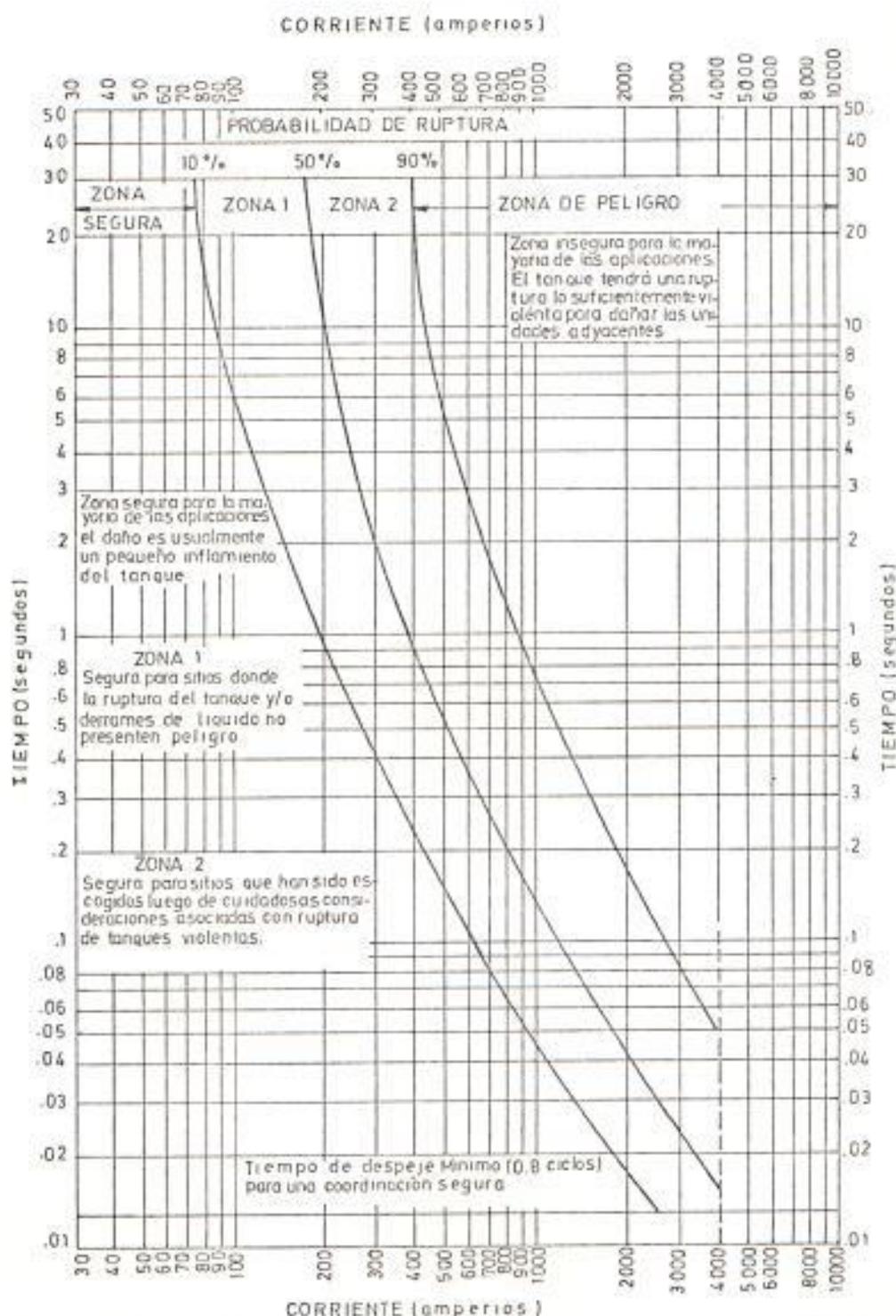
Cuando un arco, causado por una falla en el dieléctrico, ocurre dentro de un capacitor, una reacción empieza. El líquido dieléctrico y el material aislante se descomponen, y por ello se genera un gas. Desde que los capacitores son herméticamente cerrados, la presión del gas puede aumentar lo suficiente para reventar el tanque. La magnitud y la du

ración de la corriente durante el arco determina el grado de daño al capacitor, y las curvas de ruptura del tanque ilustran la probabilidad de ruptura del tanque para varias relaciones de corriente y tiempo. La coordinación de la característica de despeje de la tira fusible con la curva de ruptura del tanque, por lo tanto, tiende a prevenir la completa falla de una unidad como el posible daño de unidades adyacentes.

Las curvas de ruptura del tanque dadas por los fabricantes facilitan la selección de los fusibles para capacitores. Divididas en cuatro zonas, las curvas indican el grado de seguridad posible. La característica de despeje de la tira y la máxima corriente de cortocircuito obtenible en el banco establece la zona de operación.

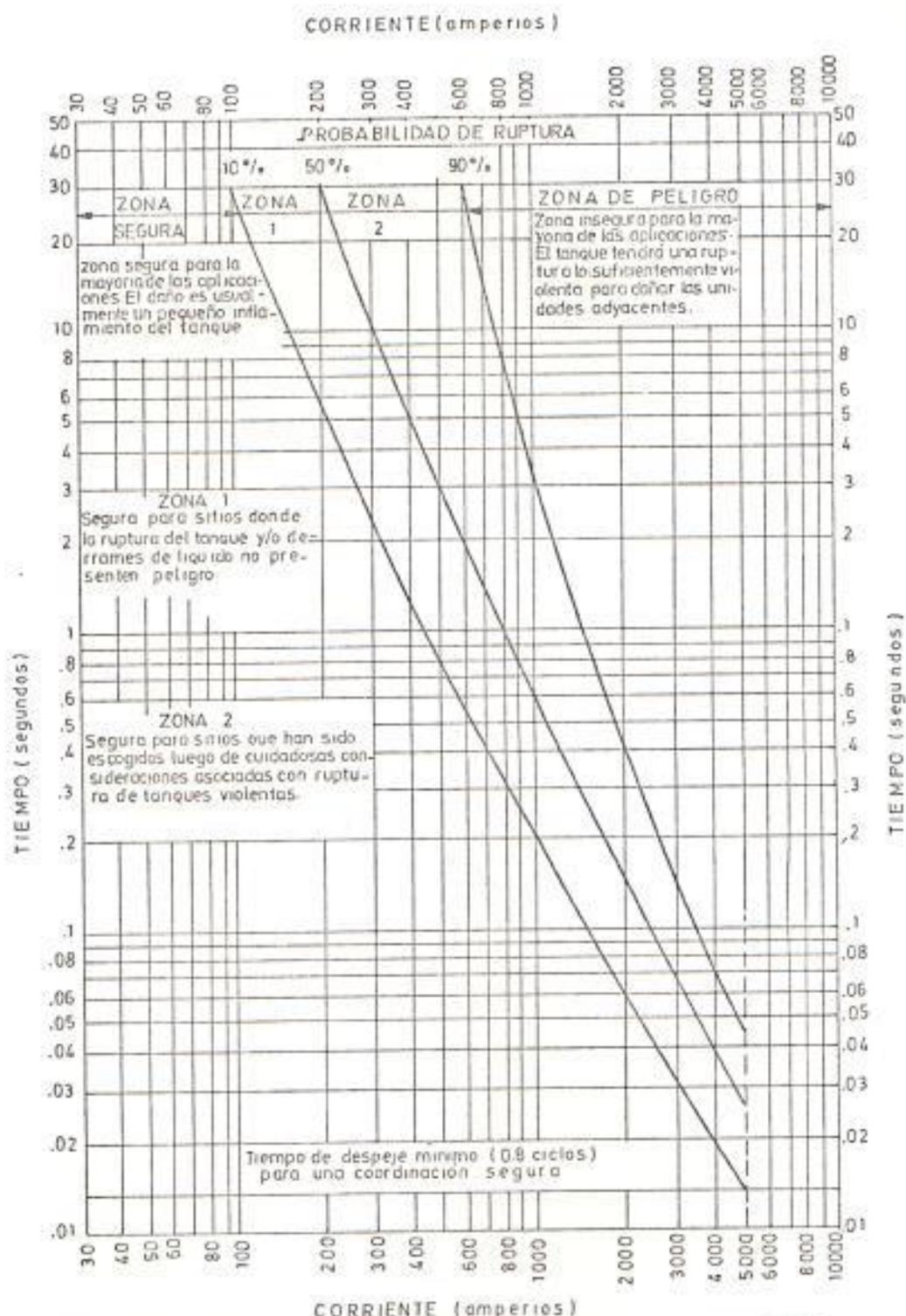
Las curvas mostradas en la curva # 5.1 son para capacitores que emplean un papel dieléctrico de 25 y 50 KVAR, y la curva # 5.2 es para unidades con papel dieléctrico de 100 KVAR. El mismo juego de curvas es aplicable para las unidades que emplean películas tipo "R", sólo que la figura # 1 se usa con unidades que tienen películas dieléctricas de 100 KVAR, y la figura # 2 se aplica a unidades de 150 KVAR.

Las empresas eléctricas tienden a seleccionar un tipo de tira EEI-NEMA para todas las aplicaciones de protección con



**CURVA 5.1** Corriente de cortocircuito en amperios RMS (para tiempos menores a un ciclo se debe emplear amperios asimétricos RMS)

Corriente vs. tiempo para unidades capacitivas que han sufrido rupturas debido a la presión del gas causada por arcos internos. Para unidades de 25 y 50 KVAR con papel dielectrico y unidades de 100KVAR con pelicula tipo R.



**CURVA 5.2** Corriente de cortocircuito en amperios RMS (para tiempos menores a un ciclo se debe emplear amperios asimétricos RMS)  
Corriente vs. tiempo para unidades capacitivas que han sufrido rupturas debido a la presión del gas causada por arcos internos. Para unidades de 100 KVAR con papel dieléctrico y unidades de 150 KVAR con película tipo R.

fusibles. En algunos casos, un análisis de la aplicación de las tiras tipo K y T para la protección con fusibles de los capacitores puede ser emprendido. Generalmente este análisis indicará que la tira "T" ofrece marcadas ventajas sobre la tipo "K" en la protección con fusibles de capacitores.

Las curvas de tiempo de máximo despeje para las tiras "T" y "K" de igual capacidad tienen los mismos 300 segundos o valores de corriente bajos. Para altas corrientes, sin embargo, las curvas se separan indicando que las tiras "K" despejan en menos tiempo que las tiras tipo "T" de igual capacidad.

Lo que da como resultado, que la tira "K" es considerada como una tira "rápida". La más grande separación ocurre en las partes de alta corriente de las curvas, lo cual indica que las tiras "T" que son lentas, tienen una gran capacidad para soportar arranques de gran magnitud y de corta duración además de transientes de descargas. Esta habilidad es especialmente importante en la protección con fusibles de bancos conectados en estrella no aterrizados en los cuales la parte de baja corriente de la curva de la tira fusible es fijada por los principios 1 y 4.

Porque las partes de alta corriente de las tiras "K" y "T"

son muy coincidentes, una tira "K" debe ser escogida de mayor capacidad que una tira "T".

Por lo tanto, para satisfacer el principio 3 pertinente al soporte del transiente, ya sea una tira "K" o "T" sería satisfactoria, pero la tira "K" debería de ser de mayor capacidad. Esta tira "K" de mayor capacidad, luego no interrumpiría corrientes de falla bajas tan rápido como la tira "T" de menor capacidad. Consecuentemente, la ventaja de una rápida interrupción de las corrientes bajas, particularmente importante para bancos no aterrizados conectados en estrella, se perdería si las tiras "K" de mayor capacidad son empleadas.

Como un ejemplo de esta diferencia unas tiras 25K y una 15T tienen valores muy coincidentes en los valores de alta corriente a 0.8 ciclos, mientras, que los valores de baja corriente difieren con cerca de 20 amperios a los 300 segundos. La selección de la tira 15T en vez de la 25K aseguraría que el principio 2 que trata del manejo de las corrientes obtenibles de falla sería satisfactorio, tan bien como el principio 3. En adición, la tira 15T se aproximaría mucho más al principio 1, el cual cubre la capacidad de corriente continua. De manera similar, la tira "T" satisficaría los requerimientos de interrupción del principio 4.

Un análisis, por lo tanto, parecería indicar que la tira "T"

generalmente es más favorable para una adecuada protección con fusible de los bancos de capacitores. Por supuesto, que excepciones aparecen en cualquier generalización. La excepción para el uso de la tira "T" ocurriría si la zona de operación de esta tira fuera menos segura que la de la tira "K" como cuando es usada en bancos conectados en triángulo o con bancos con neutro aterrizado.

Se puede decir entonces que la protección con fusibles del grupo es algunas veces usada para proporcionar protección contra fallas de los bancos de la subestación. Estos fusibles deben ser capaces de soportar continuamente la máxima corriente esperada en el banco. Debido al muy largo retardo de tiempo para pequeñas sobrecorrientes, los fusibles son esencialmente sólo útiles para despejar fallas de línea a línea y de línea a tierra en equipos de capacitores protegidos individualmente con fusibles.

Los fusibles son dimensionados para evitar operaciones indeseables. Para fusibles de menor capacidad (hasta cerca de 65 amperios), el tamaño escogido de éstos para la protección con fusible del grupo de los equipos instalados en los postes, son también apropiados para la protección de fallas de los equipos de la subestación.

Para fusibles de mayor capacidad, será muy poca, si alguna

sobredimensión es requerida para evitar las operaciones indeseables. Los fusibles con una capacidad continua de corriente en el rango de 1.25 (para bancos no aterrizados) ó 1.35 (para bancos aterrizados) a 1.65 veces la corriente de fase nominal son usualmente apropiados.

Como comentarios se puede mencionar que algunos usuarios emplean bancos de capacitores con neutro flotante y grupo series múltiples sin protección contra desbalance. La filosofía general es que el mantenimiento de rutina identificará los fusibles que han operado antes de que el desbalance se vuelva excesivo. Desafortunadamente, una falla de arco externa puede persistir dentro del banco por un período sustancial de tiempo antes de convertirse en una falla de línea a línea o de línea a tierra y se dispare el banco por sobrecorriente. Durante este tiempo, las corrientes transientes y los sobrevoltajes pueden dañar muchas unidades de capacitores y fusibles (daño tanto evidente como oculto), causar ruptura del tanque, y crear una gran preocupación entre aquellos que no reconocen esta posibilidad.

Es también deseable chequear los relés de protección de la instalación de capacitores en el mantenimiento rutinario. Una señal de error apropiada dentro del primario o secundario del PT o CT causará que el interruptor automático o el interruptor del capacitor se disparen. Los transientes de alta frecuencia han dañado ocasionalmente la protección de desbalance, protección

la cual, por su propia naturaleza debe ser ocasionalmente ajustada muy sensitivamente.

Los capacitores de calidad con una apropiada y debida proteccion de ajuste tendran y proporcionaran muchos años de funcionamiento confiable. Lo que se ha tratado en esta parte de la tesis es la coordinacion de las unidades de fusibles, proteccion de "desbalance", y proteccion contra fallas y se sugiere una técnica de cálculo para facilitar la coordinacion apropiada.

## CAPITULO VI

### ESTRUCTURAS REQUERIDAS

Tomando en cuenta el factor de sobrevoltaje actualmente existente en el sistema y el factor de la temperatura ambiente de la ciudad de Guayaquil, se ha decidido dejar un margen de seguridad en el diseño del banco de capacitores, por lo que se ha escogido aproximadamente 72 KV como el voltaje a considerarse en el sistema, para un banco conectado en estrella aterrizada.

Con estos datos podemos realizar un estudio de las estructuras requeridas por el banco de capacitores y aunque parecería un poco complicado el determinar el diseño de un banco, debido a las muchas variaciones ya sea, en el grupo de las unidades, en el arreglo del grupo o en el tamaño según los KVAC de la unidad capacitadora; se intentará entonces esbozar un procedimiento lógico y directo de diseñar la estructura requerida, sin tener en cuenta el tamaño total del banco. - Donde el banco más pequeño consistiría de tres unidades de capacitores y el más grande podría, teóricamente contener un número infinito de unidades capacitadoras.

Desarrollando el procedimiento en una serie de pasos, podemos decir entonces que:

Paso 1. Este paso consiste en la determinación del tipo de conexión eléctrica sea ésta en triángulo, en estrella o doble estrella no aterrizada o en estrella aterrizada.

Esta selección debe ser hecha por el usuario y se tienen que tomar en cuenta consideraciones como el tipo de protección del banco, la corriente de falla que se tenga y el mínimo tamaño del banco.

En nuestro estudio, como ya lo hemos mencionado, esta conexión será en estrella aterrizada, por acomodarse a las condiciones del Sistema Guayaquil.

Paso 2. En este paso se determina los KVAC trifásicos del banco y el voltaje de línea a línea.

Se escogerá el mínimo KVAC para la capacidad del banco y un voltaje de 72 KV de línea a línea por los factores considerados en el principio del capítulo.

Paso 3. Aquí se determinará el voltaje de la unidad capacitadora individual basándonos en la lista de voltajes estándares que da NEMA, mostrada en la tabla 6.1.

En este caso, la selección también debe ser realizada por el usuario el cual debe considerar factores como la experiencia de operación a varios niveles de voltaje de sus unidades y el de poder en determina

KV del Sistema	Grupos Serie	Voltios Unidades*	KV del Sistema	Grupos Serie	Voltios Unidades*	KV del Sistema	Grupos Serie	Voltios Unidades
4.1	1	2400	47.8	2	13800	87.2	21	2400
4.7	1	2770	47.9	10	2770	87.2	7	7200
7.2	1	4160	49.5	3	9540	91.1	19	2770
8.3	2	2400	49.8	12	2400	91.4	22	2400
8.3	1	4800	49.8	6	4800	91.4	11	4800
9.5	2	2770	49.8	4	7200	92.0	8	6640
11.5	1	6640	49.8	2	14400	92.0	4	13280
12.4	3	2400	50.4	7	4160	92.3	7	7620
12.4	1	7200	51.7	3	9960	93.6	13	4160
13.1	1	7620	52.7	11	2770	95.6	23	2400
13.7	1	7960	52.7	4	7620	95.6	4	13800
14.3	3	2770	54.0	13	2400	95.9	20	2770
14.4	2	4160	55.1	4	7960	96.5	7	7960
14.4	1	8320	57.5	5	6640	98.7	5	11400
16.5	1	9540	57.5	12	2770	99.1	6	9540
16.6	4	2400	57.6	8	4160	99.7	24	2400
16.6	2	4800	57.6	4	8320	99.7	12	4800
17.2	1	9960	58.1	13	2400	99.7	8	7200
19.1	4	2770	58.1	7	4800	99.7	4	14400
19.7	1	11400	59.2	3	11400	100.7	21	2770
20.7	5	2400	62.3	15	2400	100.8	14	4160
21.5	1	12470	62.3	5	7200	100.8	7	8320
21.6	3	4160	62.3	13	2770	103.5	9	6640
23.0	2	6640	64.7	3	12470	103.5	6	9960
23.0	1	13280	64.8	9	4160	103.5	3	19920
23.9	1	13800	65.9	5	7620	103.9	25	2400
23.9	5	2770	66.0	4	9540	105.5	22	2770
24.9	6	2400	66.5	16	2400	105.5	8	7620
24.9	3	4800	66.5	8	4800	107.9	5	12470
24.9	2	7200	67.1	14	2770	108.8	26	2400
24.0	1	14400	68.9	5	7960	108.8	15	4160
26.0	2	7620	69.0	6	6640	108.8	13	4800
27.0	2	7960	69.0	4	9960	110.2	8	7960
28.0	6	2770	69.0	3	13280	110.3	23	2770
28.0	4	4160	69.0	2	19920	112.2	27	2400
28.0	2	8320	70.6	17	2400	112.2	9	7200
29.0	7	2400	71.7	3	13800	115.0	10	6640
33.0	2	9540	71.9	15	2770	115.0	5	13280
33.0	8	2400	72.0	10	4160	115.1	24	2770
33.0	4	4800	72.0	5	8320	115.2	16	4160
34.0	3	6640	74.8	9	4800	115.6	7	9540
36.0	5	4160	76.7	16	2770	118.4	6	11400
38.3	8	2770	79.1	6	7620	224.4	9	14400
39.5	3	7620	80.5	7	6640	230.0	20	6640
41.5	10	2400	82.6	5	9540	230.0	10	13280
43.1	2	12470	83.1	10	4800	230.5	16	8320
45.7	11	2400	86.3	4	12470	232.7	20	4800
46.0	2	13280	86.4	6	8320	234.3	17	7960

TABLA 6.1 Voltajes de Circuitos.

do momento intercambiar las unidades capacitadoras con otras instalaciones.

Donde este voltaje de la unidad capacitadora individual es el que determinará el número de grupos series de capacitores por fase, teniendo también efecto en el tamaño mínimo del banco.

En la tabla 6.1 vemos entonces los diferentes voltajes con que las unidades son fabricadas, abriéndose una serie de oportunidades que tiene el usuario para armar su banco de capacitores según sus necesidades.

Paso 4. En esta parte se calculará el número de grupos series de unidades capacitadoras por fase.

Para colocar este número de grupos serie por fase simplemente se divide el voltaje de línea a neutro (tierra) o el voltaje de fase a fase en un sistema conectado en triángulo para el voltaje de la unidad capacitadora individual escogida en el paso 3.

En la tabla 6.1 se listan una serie de voltajes para sistemas conectados en estrella, tanto aterrizados como no aterrizados, y se definen además los voltajes de las unidades capacitadoras individuales como el número de grupos serie por fase. Es decir, el propósito de la tabla es ilustrar las posibles combinaciones de los voltajes estándares dados por NEMA para las unidades capacitadoras y el número de gru-

pos series por fase para un voltaje dado del sistema.

Para el voltaje de 72 KV escogido para el sistema vemos que tenemos dos posibilidades: el de usar unidades capacitoras con voltaje nominal de 4160 voltios en un arreglo de 10 grupos serie o el de usar unidades capacitoras de 8320 voltios en arreglo de 5 grupos serie. - Las cuales serían las más convenientes para nuestros propósitos.

Paso 5. En este paso se calcula el número de unidades capacitoras - por grupo serie y los KVAC de la unidad capacitadora. También se realiza una prueba para el tamaño mínimo del banco.

Para calcular el número mínimo de unidades capacitoras por grupo serie es necesario determinar el efecto del voltaje sobre las unidades que permanecen conectadas en el grupo serie cuando un capacitor en e se grupo serie falla.

Como ya sabemos por lo visto en los anteriores capítulos, las unidades de capacitores individuales no deben ser operadas continuamente con voltajes en exceso del 10% sobre su voltaje nominal y por lo tan to es deseable conocer qué voltajes serán encontrados en un grupo se rie luego de la operación de fusibles, cuando el sistema está en su más alto nivel de voltaje de operación. Por lo que solo se ha consi derado conveniente graficar la figura 6.1 en la que se muestra el in cremento en el voltaje sobre las unidades que permanecen conectadas en el grupo, luego de una falla que ha desconectado unidades en este

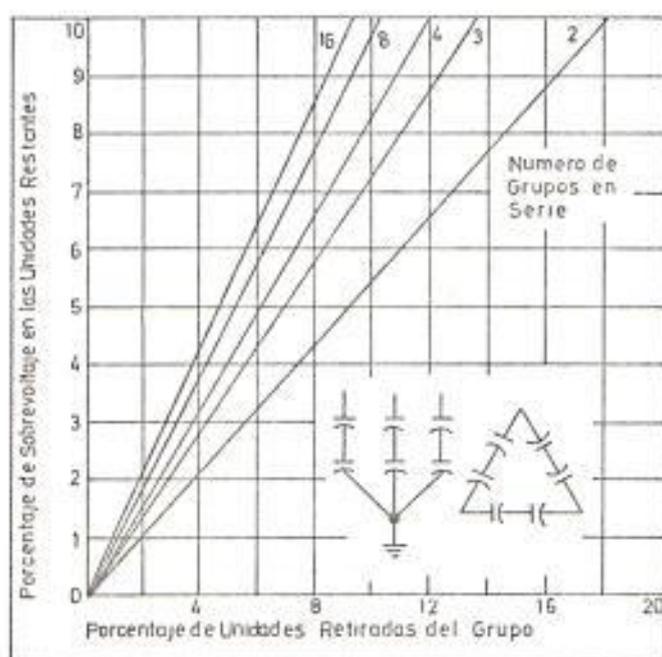


FIGURA 6.1

FIGURA 6.1 Porcentaje de sobrevoltaje en las unidades que permanecen conectadas en el grupo

mismo grupo.

Esta figura está dada para bancos conectados en estrella aterrizada o en delta, y para unidades de capacitores que tienen el mismo voltaje y KVAC nominales.

La tabla 6.2 ha sido preparada para simplificar la determinación del número de unidades capacitoras por grupo serie, y se muestra los mínimos KVAC del banco con un sobrevoltaje del 10% de las unidades capacitoras, y está basada en el número de grupos series determinado en la tabla 6.1.

Así por ejemplo, si en nuestro caso empleáramos unidades capacitoras de 8320 voltios en un arreglo de 5 grupos series, conectadas en estrella aterrizada, tendríamos entonces según la tabla 6.2 que el número mínimo de unidades capacitoras por grupo serie con un sobrevoltaje del diez por ciento es 9, y el número mínimo de unidades capacitoras por banco trifásico es 135, así:

KVAC 3 $\phi$ mí-	=	Número de gru-	x	Número mínimo x 3 fases x KVAC de
nimo del ban-		pos series por		de unidades
co		fase		capacitoras
				por grupo se-
				rie
				la uni-
				dad ca-
				pacito-
				ra

$$\text{KVAC } 3\phi \text{ mínimo} = 5 \frac{\text{Grupos serie}}{\text{fase}} \times 9 \frac{\text{Unidades capacitoras}}{\text{Grupo serie}}$$

NUMERO DE GRUPOS SERIE	CONEXION " Y " NO ATERRIZADA		CONEXION " Y " 0 " Δ " ATERRIZADA	
	NUMERO MINIMO DE UNIDADES POR GRUPO	NUMERO MINIMO DE UNIDADES POR BANCO TRIFASICO	NUMERO MINIMO DE UNIDADES POR GRUPO	NUMERO MINIMO DE UNIDAD, POR BANCO TRIFAS.
1	4	12	1	3
2	8	48	6	36
3	9	81	8	72
4	9	108	9	108
5	10	150	9	135
6	10	180	9	162
7	10	210	10	210
8	10	240	10	240
9	11	297	11	297
10	11	330	11	330
11	11	363	11	363
12	11	396	11	396
13	11	429	11	429
14	11	462	11	462
15	11	495	11	495

TABLA 6.2 Kvac mínimo del banco empleando un sobrevoltaje del 10% en las unidades capacitadoras.

$$x \text{ 3 Fases } x \frac{\text{KVAC}}{\text{Unidad capacitadora}} = 135 x \frac{\text{KVAC}}{\text{Unidad capacitadora}}$$

Donde las unidades capacitoras monofásicas vienen con KVAC nominales de 50 KVAC, 100 KVAC, 150 KVAC y 200 KVAC, y como ya hemos mencionado en el capítulo dos de las nuevas unidades capacitoras son de 300 KVAC y 400 KVAC.

Del estudio de flujo de carga, sabemos que los KVAR máximos del banco de capacitores son 11.000 KVAR, tamaño del banco que causa, según la norma ya mencionada en el capítulo uno, una variación del 5/8 por ciento del voltaje en la barra donde está conectado este banco.

Otra limitación ya establecida es según el tamaño mínimo del banco por su configuración, en nuestro caso, en que estamos planeando usar unidades capacitoras de 8.320 voltios, este tamaño es: 135 x KVAC/unidad capacitadora.

Para realizar el diseño de este banco, debemos tener en cuenta dos reglas prácticas que nos permiten certificar ciertas condiciones de diseño.

Regla 1. Cada grupo serie debe contener un número igual de unidades capacitoras.

Regla 2. El número de unidades por fase debe ser enteramente divisi

ble para el número de grupos serie.

Para nuestro caso, empleando unidades capacitadoras de 100 KVAR, tendríamos que nuestro banco mínimo sería:

$$\text{KVAC } 3 \text{ } \phi \text{ mínimo} = 135 \times 100 = 13.500 \text{ KVAR}$$

Es decir, estamos sobre los 11.000 KVAR limitados por la norma. Si empleáramos unidades capacitadoras de 50 KVAR, tendríamos:

$$\text{KVAC } 3 \text{ } \phi \text{ mínimo} = 135 \times 50 = 6.750 \text{ KVAR}$$

Con lo que estamos muy abajo del valor deseado.

Por lo tanto tendremos que aumentar el número mínimo de unidades del banco.

Por la regla 1 nuestro banco trifásico de 11.000 KVAR empleando unidades capacitadoras de 50 KVAC debe cumplir que:

$$\frac{11.000 \text{ KVAC}}{3 \text{ Fase}} \div \frac{50 \text{ KVAC}}{\text{Por unidad}} = 73.33 \text{ Unidades Fase}$$

Lo cual no es posible, por tanto debemos arreglar el tamaño del banco. Considerando un valor de 10.500 KVAR, que en nada nos afectaría el límite dado por la norma, tendremos por la regla 1 que:

$$\frac{10,500}{3} \frac{\text{KVAC}}{\text{Fase}} \cdot \frac{50}{7} \frac{\text{KVAC}}{\text{Por unidad}} = 70 \frac{\text{Unidades}}{\text{Fase}}$$

Por la regla 2, tendremos:

$$70 \frac{\text{Unidades}}{\text{Fase}} \div 5 \frac{\text{Grupos serie}}{\text{Fase}} = 14 \frac{\text{Unidades}}{\text{Grupo serie}}$$

Es decir el número de unidades capacitadoras para este diseño del banco trifásico es de 210.

La opción de realizar el diseño del banco de capacitores empleando unidades capacitadoras de 4.160 voltios en un arreglo de 10 grupos serie por fase, no es considerado en este análisis, porque evidentemente es más costoso.

Pero si revisamos la tabla 6.1, y disminuyendo el voltaje de 72 KV que hemos considerado, a un valor que no afectaría la confiabilidad de nuestro diseño como es 71.7 KV, vemos que tenemos la alternativa de tener un banco que emplee unidades capacitadoras de 13.800 voltios en un arreglo de 3 grupos serie por fase.

Analizando esta opción, y ayudándonos por la tabla 6.2, vemos que los KVAC trifásicos mínimos del banco serían de:

$$\text{KVAC } 3 \phi \text{ mínimo} = 72 \times \frac{\text{KVAC}}{\text{Unidad capacitadora}}$$

Si usáramos unidades capacitadoras de 150 KVAC, tendremos:

$$\text{KVAC } 3 \text{ } \emptyset \text{ mínimo} = 72 \times 150 = 10.800 \text{ KVAR}$$

Lo que se aproxima a nuestro banco ideal de 11.000 KVAR.

Revisando si cumple, las dos reglas anteriormente mencionadas, tendremos por la regla 1:

$$\frac{10.800}{3} \frac{\text{KVAC}}{\text{Fase}} \div 150 \frac{\text{KVAC}}{\text{Por unidad}} = 24 \frac{\text{Unidades}}{\text{Fase}}$$

Por la Regla 2:

$$24 \frac{\text{Unidades}}{\text{Fase}} \div 3 \frac{\text{Grupos serie}}{\text{Fase}} = 8 \frac{\text{Unidades}}{\text{Grupo serie}}$$

Es decir sí es factible, y aparentemente este último arreglo es mejor que el anterior.

Paso 6. En este paso se seleccionará las unidades de montaje individuales, donde estas unidades de montaje son definidas como las estructuras mismas de montaje que contienen un grupo serie o grupos serie (con un máximo de dos grupos serie por unidad de montaje).

Estas unidades de montaje están diseñadas para permitir a los capacitores ser colocados en un arreglo de posición vertical, el cual es

un diseño convencional, o colocar a los capacitores en un diseño de arreglo borde con borde.

Estas unidades de montaje también están diseñadas para varios niveles de voltajes de las unidades capacitores, pudiendo aceptar capacitores de uno o dos terminales, siendo estas unidades de montaje fabricadas ya sea de acero galvanizado o aluminio.

El único inconveniente que se presenta es que unidades capacitores de dos terminales no son recomendadas para usarse en un arreglo borde con borde.

En la tabla 6.3 se ilustran los tipos, niveles de voltaje y arreglos de barra para los diversos tipos de aplicaciones.

Para seleccionar aproximadamente una unidad de montaje se debe tener conocido los datos que nosotros hemos obtenido de los pasos anteriores, así:

	Opción 72 KV	Opción 71.7 KV
Número de grupos series	5 (Paso 4)	3
Voltaje de la unidad capacitadora	8320 (Paso 3)	13.800
Número de capacitores por grupo serie	14 (Paso 5)	8
Diseño convencional o borde a borde	Convencional	Convencional

De la tabla 6.3, para diseño convencional se puede escoger entre las

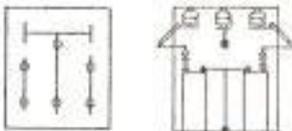
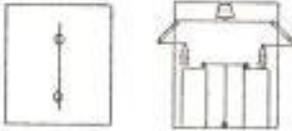
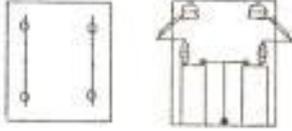
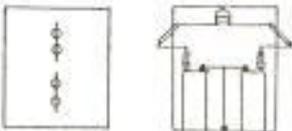
FI: GU: RA:	ARREGLO DE BARRA Y VISTA DE ELEVACION	APLICACION PRINCIPAL	No DE GRUPOS SERIES POR UNID. DE ALMA- CENAJE	MAXIMO NUMERO DE UNID. DE ALMA- CENAJE EN UN ARREGLO VERTICAL	VOLTAJE DE LA UNIDAD CAPACI- TORA ( Kv )	CAPACIDAD DE LA UNIDAD DE ALMA- CENAJE
A		Barra 3φ para usar con bancos pequeños con no mas de un grupo serie por fase.	1	2	2.4 8.0	36 unidades 3φ a máximo. 6 unidades 3φ mínimo. 12 unidades 1φ a máximo. 2 unidades 1φ mínimo.
B		Barra 1φ para usar con bancos que necesitan un grupo serie por unidad de almacenamiento.	1	3	2.4 8.0 8.0 14.4	48 unidades por grupo serie máximo. 6 unidades por grupo serie mínimo. Se aplica para ambos voltajes.
C		Doble barra para usar con bancos que requieren 2 grupos serie por unidad de almacenamiento.	2	3	2.4 8.0	48 unidades por unidad de almacenamiento máximo. 6 unidades por unidad de almacenamiento mínimo ó 20 unidades por grupo serie máximo. 3 unidades por grupo serie mínimo.
D		Barra de partición igual para usar con bancos que requieren 2 grupos serie por unidad de almacenamiento.	2	3	8.0 14.4	36 unidades por unidad de almacenamiento máximo. 6 unidades por unidad de almacenamiento mínimo ó 18 unidades por grupo serie máximo. 3 unidades por grupo serie mínimo.

TABLA 6.3 Diseño convencional de capacitores instalados en posición vertical.

figuras A, B, C, D o E. Vemos que para nuestro caso podemos escoger entre el diseño de una barra (figura B) o el diseño de barra de partición igual (figura D).

Para realizar una selección de entre la figura B o la figura D, debemos considerar primero la configuración del montaje (lo cual veremos en el paso 7).

Analizando estas dos figuras:

Figura B. Una barra.

El arreglo de la unidad de montaje de una sola barra requiere 1 grupo serie por unidad de montaje. Para el caso de 72 KV la lista de materiales sería: 15 unidades de montaje (una barra), 14 unidades - capacitores de 8.320 voltios en cada unidad de montaje (5 unidades - de montaje por fase).

Viendo gráficamente su arreglo en la figura 6.2, se observa que en este diseño habrán arreglos más altos que otros en una misma fase y que seleccionando el diseño de una sola barra se tendrá un montaje a normalmente largo.

Hay que anotar que en la gráfica no se muestran los aisladores.

Figura D. Barra de partición igual.

El arreglo de barra de partición igual tiene capacidad para 2 grupos serie por fase. En el caso de 72 KV para contener los 5 grupos series por fase se requerirá del siguiente material: 9 unidades de montaje (barra de partición igual), 28 unidades capacitadoras de 8.320 voltios en cada unidad de montaje (3 unidades de montaje por fase, sin embargo una de estas unidades de montaje solo tendrá un grupo serie en vez de dos).

Viendo gráficamente su arreglo en la figura 3, se observa entonces que el uso del diseño de la barra de partición igual da como resultado un banco el cual requiere un espacio mínimo.

También en este caso, en la gráfica no se muestran los aisladores.

Se ha escogido en esta tesis el diseño de unidades de montaje con barra de partición igual, es decir el de la figura D.

Analizando la opción de 71.7 KV con la figura D que es la más conveniente, vemos que para contener los 3 grupos serie por fase se requiere el siguiente material: 6 unidades de montaje, 16 unidades capacitadoras de 13.800 voltios en cada unidad de montaje (2 unidades de montaje por fase, sin embargo una de estas unidades de montaje solo tendrá un grupo serie en vez de dos).

Vemos su arreglo en la figura 6.4, con lo que la dimensión requerida para la opción de 71.7 KV es todavía menor que la de la opción de 72 KV.

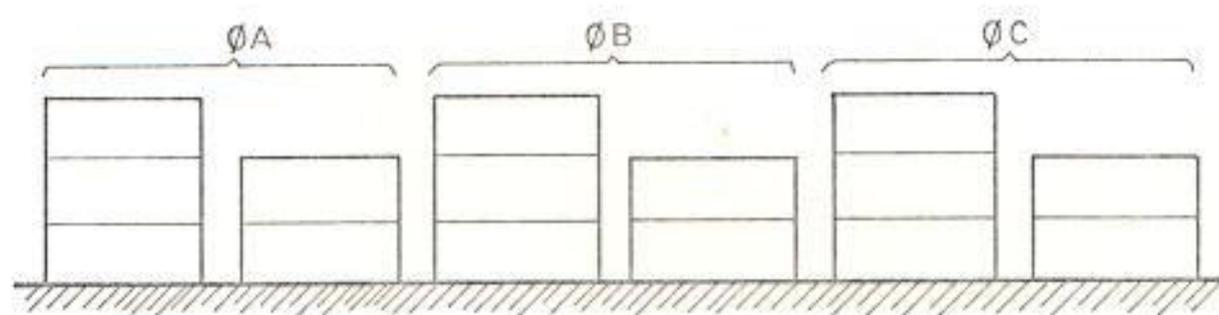


FIGURA 6.2

FIGURA 6.2 Arreglo de la figura B de la Tabla 6.3 para cinco grupos serie

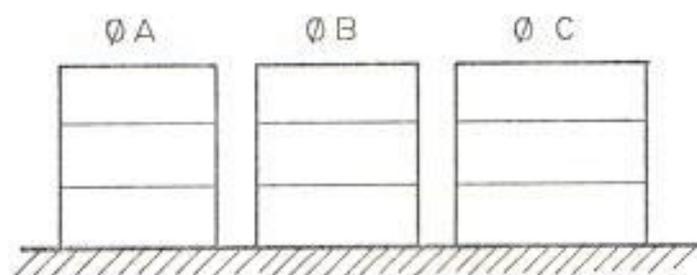


FIGURA 6.3

FIGURA 6.3 Arreglo de la figura D de la Tabla 6.3 para cinco grupos serie

Es de mencionar que en la gráfica no se muestran los aisladores.

Paso 7. En esta parte se indica el arreglo de la unidad de montaje, y se ha creído conveniente mostrar la figura 6.5 como modo de ilustración y para definir la terminología.

Para el caso de la opción de 71.7 KV, en que se escogió el diseño de la figura D, tendremos el arreglo mostrado en la figura 6.6.

Vemos que tenemos 3 arreglos verticales en total, con un arreglo vertical por fase, empleando 6 unidades de montaje convencionales con diseño de barra de partición igual, y de una sola hilera.

Para el caso de 72 KV, en que se escogió el diseño de la figura D, tendremos entonces que el arreglo según la figura 6.7 será:

Vemos que tenemos entonces 3 arreglos verticales en total, con un arreglo vertical por fase, usando 9 unidades de montaje convencionales con diseño de barra de partición igual, y de una sola hilera.

Paso 8. En este paso se verá cómo se selecciona el aislamiento entre las unidades de montaje individuales.

Como información general se puede mencionar que los aisladores entre las unidades de montaje son requeridos ya que la estructura misma de estas unidades de montaje se encuentran usualmente energizadas. Ade

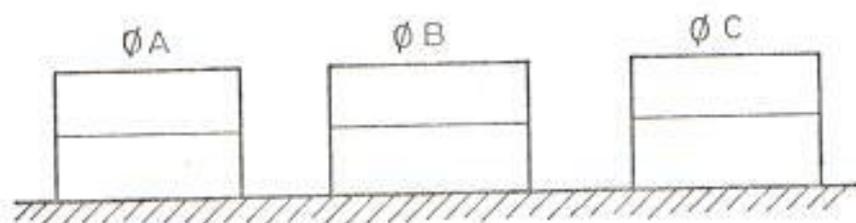


FIGURA 6.4

FIGURA 6.4 Arreglo de la figura D de la Tabla 6.4 para tres grupos serie

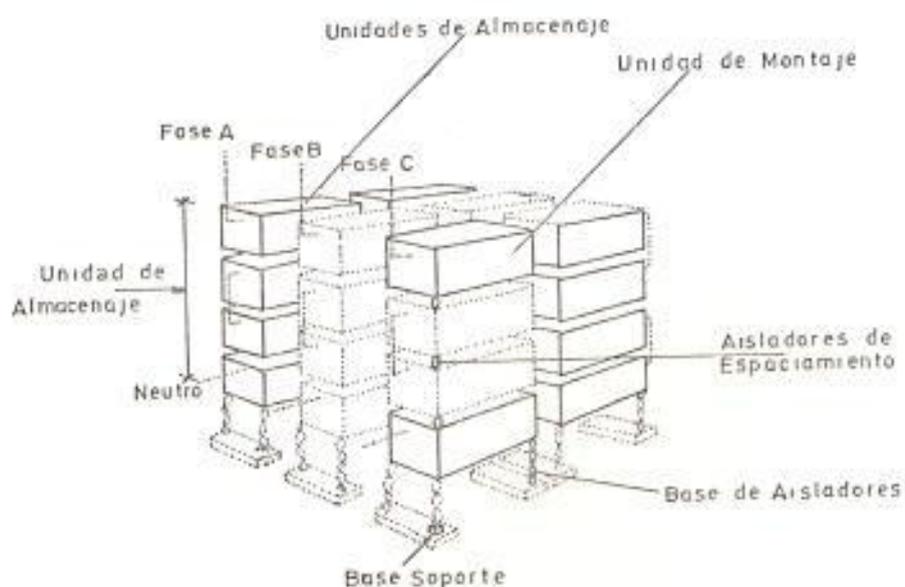


FIGURA 6.5

FIGURA 6.5 Arreglo del banco de capacitores

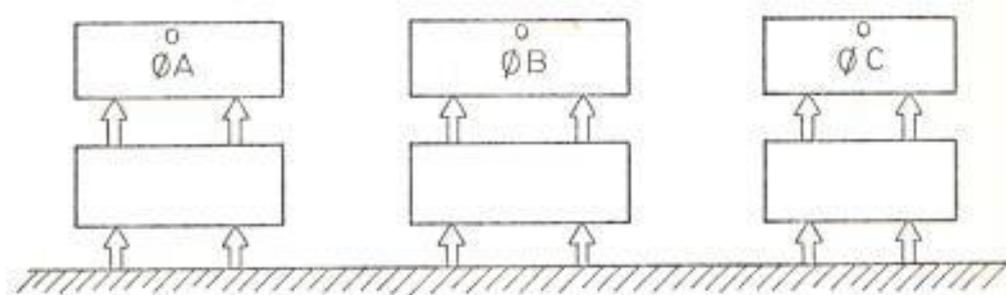


FIGURA 6.6

FIGURA 6.6 Diseño del banco con la opción de 71.7 Kv

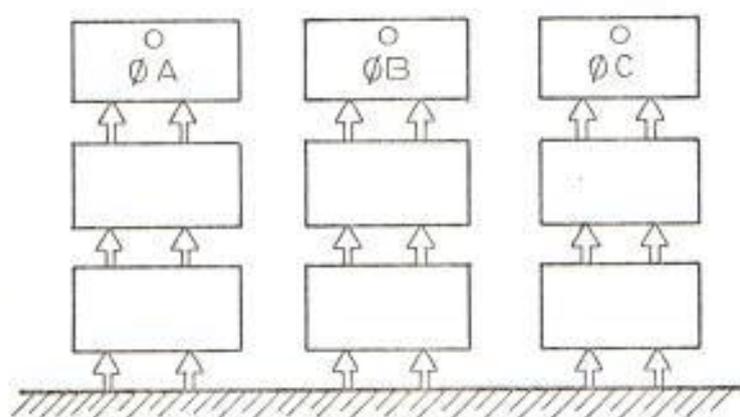


FIGURA 6.7

FIGURA 6.7 Diseño del banco con la opción de 72 Kv

más un aislamiento entre la tierra misma y el arreglo vertical de la unidad de montaje también puede ser necesitado. Por lo que se dará entonces, un método simple para determinar cuando estos aisladores - son necesitados; empezando por una definición de la terminología, ten dremos que:

Aisladores de espaciamiento, son los aisladores montados entre unida des de montaje. Aisladores de base, son los aisladores montados entre la parte baja del arreglo y la base de soporte.

Es conveniente para determinar los aisladores que se necesitarán, di bujar un esquema del arreglo del montaje mostrando las unidades capa citoras, la estructura de la unidad de montaje y la bomba de la uni dad de montaje.

Como regla se debe tener en cuenta que las conexiones del neutro y la fase deben terminar en barras aisladas.

Para nuestro caso en que tenemos 72 KV de línea a línea, empleando u nidades capacitores de 8.320 V, con unidades de montaje de diseño de barra de partición igual, con 14 capacitores por grupo serie y 5 gru pos series por fase, mostramos el esquema en la figura 6.8.

Vemos entonces que el aislamiento de la base en nuestro sistema es - trella aterrizada será igual al aislamiento de la última unidad capa citora, es decir:

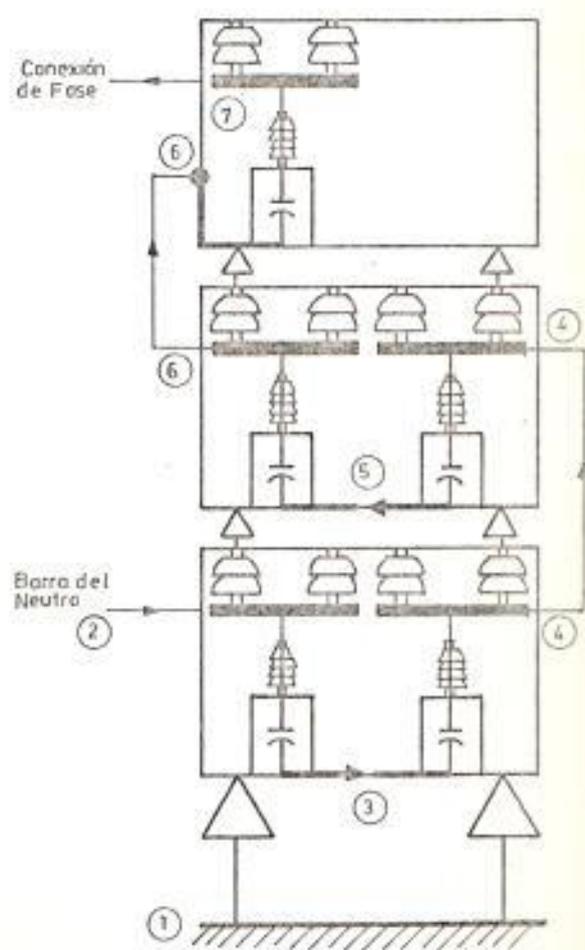
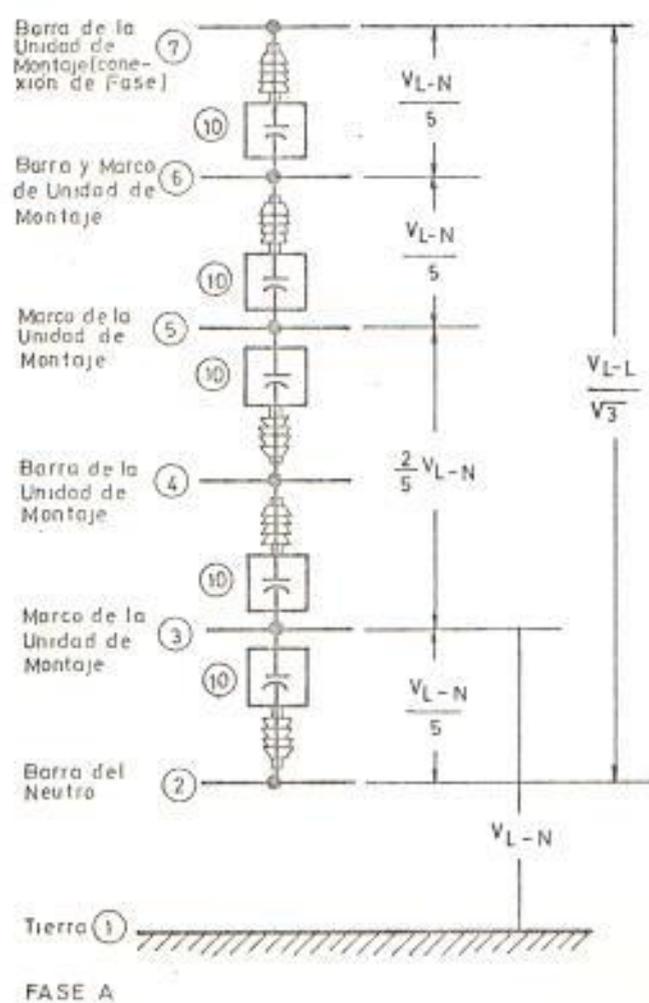


FIGURA 6.8  
FIGURA 6.8 Esquema típico para la opción de 72 Kv

$$\text{Aislamiento} = \frac{V_{LN}}{5} = \frac{72/3}{5} = \frac{41.6 \text{ KV}}{5} = 8.3 \text{ KV}$$

Es decir podemos usar aisladores de 15 KV.

Es conveniente mencionar que si hubiera sido un sistema estrella no aterrizado, el aislamiento de la base debe ser el voltaje completo de línea a línea del sistema.

Para calcular los aisladores de espaciamento:

Desde la unidad de montaje de la parte baja hasta la mitad de la unidad de montaje, será:

$$\text{Aislamiento} = \frac{2}{5} LN = \frac{2}{5} (41.6) = 16.64 \text{ KV}$$

Es decir se pueden usar aisladores de 23 KV.

Para los aisladores desde la mitad de la unidad de montaje a la unidad de arriba, será:

$$\text{Aislamiento} = \frac{1}{5} LN = \frac{1}{5} (41.6) = 8.3 \text{ KV}$$

Es decir podemos usar aisladores de 15 KV.

Por lo que los materiales por fase a usarse son:

- 4 aisladores de 15 KV para la base
- 4 aisladores de 15 KV para espaciamento
- 4 aisladores de 23 KV para espaciamento

Si escogiéramos la otra opción, es decir el de usar unidades capacitadoras de 13.800 voltios en un arreglo de 3 grupos serie, según la figura 6.9, vemos que los aisladores para la base como de espaciamento serán de 15 KV, así la lista de materiales por fase sería:

- 4 aisladores de 15 KV para la base
- 4 aisladores de 15 KV para espaciamento

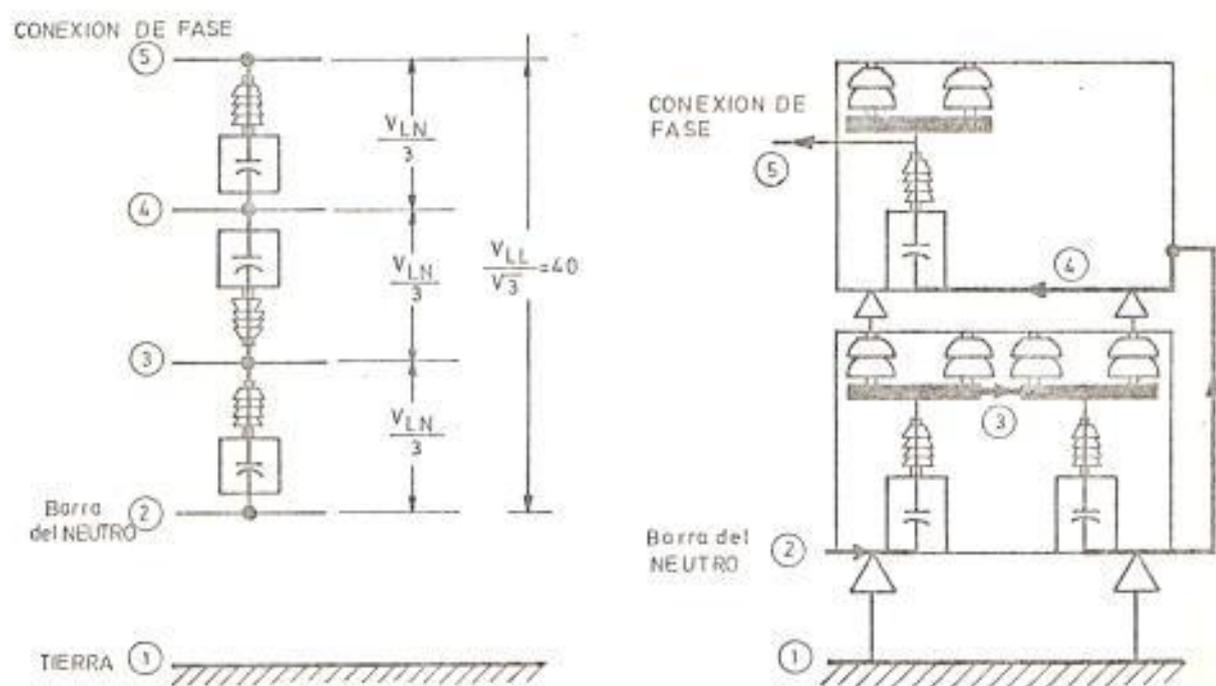


FIGURA 6.9

FIGURA 6.9 Esquema típico para la opción de 71.7 Kv

## CAPITULO VII

### ANALISIS DE COSTOS

#### 7.1. Determinación del costo de todos los componentes

Como se puede observar del capítulo anterior, se nos presentan dos posibilidades, el de escoger un banco de capacitores trifásico empleando unidades capacitoras de 8.320 voltios nominales y 50 KVAR de capacidad en un arreglo de 5 grupos serie por fase considerando un voltaje de 72 KV o de diseñar nuestro banco de capacitores trifásico empleando unidades de 13.800 voltios nominales y 150 KVAR de capacidad en un arreglo de 3 grupos serie por fase a un voltaje de 71.7 KV.

Partiendo de estas dos oportunidades que tenemos de armar nuestro banco, se ha creído conveniente y práctico, hacer la lista de materiales a usarse de cada posibilidad, mostrando a su vez los precios respectivos con el objeto de determinar los costos.

Con relación a los precios, se ha considerado útil el mostrarlos en moneda norteamericana, es decir en dólares; para que de esta manera la vigencia de este capítulo se mantenga en un futuro cercano.

Determinando los costos del arreglo del banco con unidades de 13.800 voltios, tenemos:

CANTIDAD	MATERIAL	PRECIO/UNIDAD (\$)	TOTAL (\$)
72	Unidad capacitadora 13.800 V, 1 terminal, 150 KVAC	400	28.800
6	Unidad de montaje de acero galvanizado	1.660	9.960
12	Aisladores para base 15 KV, 110 KV BIL	290	3.480
12	Aisladores para espaciamiento 15 KV, 110 KV BIL	245	2.940
72	Cajas fusibles 8 KV CXP tipo expulsión, 10.000 amperios a- simétricos de interrupción	41	2.952
1	Cuchillos de aire para puesta a tierra trifásica	2.700	2.700
3	Pararrayos 48 KV RMS	1.800	5.400
3	Transformadores de potencial 15 KV/120 V, 150 KV BIL	880	2.640
1	Equipo para detección de des- balance	6.600	<u>6.600</u>
			\$ 65.472

Para el arreglo del banco usando unidades de 8.320 V, la lista de materiales será:

CANTIDAD	MATERIAL	PRECIO/UNIDAD (\$)	TOTAL (\$)
210	Unidades capacitadoras de 8320 V, 1 terminal, 50 KVAC	145	30.450
9	Unidades de montaje de acero galvanizado	2.900	26.100
12	Aisladores para base 15 KV, 110 KV BIL	290	3.480
12	Aisladores para espaciamento 15 KV, 110 KV BIL	245	2.940
12	Aisladores para espaciamento 23 KV, 150 KV BIL	315	3.780
210	Cajas fusibles 20 KV CXP tipo expulsión, 4.000 amperios a- simétricos de interrupción	52	10.920
1	Cuchilla de aire para puesta a tierra trifásica	2.700	2.700
3	Pararrayos 48 KV RMS	1.800	5.400
3	Transformadores de potencial 15 KV/120 V, 150 KV BIL	880	2.640
1	Equipo para detección de des- balance	6.600	<u>6.600</u>
			\$ 95.010

Una vez dadas las listas de materiales para nuestras dos opciones, es necesario mencionar cierta información técnica y de construcción adicional:

- 1 - Las unidades de montaje en ambos casos, no son de iguales dimensiones; ya que para la primera lista, la unidad de mon

taje deberá poder almacenar dos grupos serie, pero con 8 unidades capacitadoras cada grupo serie, y en el segundo caso, deberá la unidad de montaje poder almacenar también dos grupos serie, pero ahora con 14 unidades capacitadoras por cada grupo serie.

El material con que están construídas estas unidades de montaje, se lo ha escogido de acero galvanizado para ambos casos, por resultar más económico que el diseño de construcción de aluminio.

Además, estas unidades de montaje incluyen: los elementos necesarios para colocar ya sea los aisladores de base o los aisladores de espaciamento; las provisiones necesarias para realizar todas las conexiones del neutro o tierra; la barra con un aislamiento de 15 KV, para nuestro caso, donde se colocarán los aisladores de las unidades capacitadoras; la necesaria infraestructura para almacenar estas unidades; y los materiales necesarios de barraje para interconectar estas unidades de montaje.

- 2 - Se ha escogido cajas fusibles CXP de tipo expulsión por ser los más adecuados, convenientes y económicos para nuestro caso que tenemos el banco conectado en estrella aterrizada y con más de dos grupos series por fase. Además de que, en ninguno de los dos casos, la energía de las unidades en pa-

ralelo adyacentes que se descarga a través de la unidad fallada, excede los 10.000 vatios-segundos (por ejemplo, 3100 KVAC según NEMA). Otra conveniencia de estas cajas fusibles es que usan tiras fusibles standard de tipo K, las cuales son cambiables y las aceptan de hasta 100 amperios.

- 3 - El equipo de control para detección de desbalance incluye - la cabina intemperie la cual puede ser montada ya sea en una estructura de aluminio o de acero galvanizado, relés de voltaje para alarma o disparo del circuito interruptor, un pararrayo, calentadores y bloque de conexiones aislado para el circuito de control.
  
- 4 - En lo referente a la parte de construcción correspondiente a la obra civil, es decir la construcción de la base de concreto donde irá asentada la estructura del banco de capacitores con su consiguiente empleo de materiales como cemento, piedra, etc., y lo concerniente a mano de obra, no ha sido considerado en esta determinación de costos, debido a que la diferencia del valor entre ambas alternativas no es significativa, y para propósitos de un análisis comparativo este costo puede ser omitido.

#### 7.2. Evaluación y análisis comparativo

En épocas actuales, donde la tasa de inflación sube mes a mes,

las empresas de cualquier tipo tratan de solucionar sus problemas con eficiencia y sobre todo con efectividad, pero todo al menor costo posible.

Haciendo una comparación de los costos de ambas alternativas, se puede ver que existe una diferencia significativa entre la una alternativa y la otra, afortunadamente la ventaja la lleva el diseño que ofrece la oportunidad de poder ser ampliado a un futuro cercano, también a menor costo.

Y es que el diseño que emplea unidades capacitadoras de 8.320 voltios, tiene la desventaja de ocupar más espacio físico con respecto al arreglo que emplea unidades capacitadoras de 13.800 voltios que es más compacta; por lo que un aumento en la capacidad del banco en una proyección futura acarrearía más costos en la primera alternativa que en la segunda.

Ahora, como el arreglo de unidades capacitadoras de 8.320 voltios usa capacitores de 150 KVAC y el arreglo del banco que emplea capacitores de 13.800 voltios los usa de 150 KVAC, se podría decir que una manera de disminuir el tamaño de la primera alternativa sería de emplear también unidades de 100 KVAC por ejemplo, pero como hemos visto en los capítulos anteriores donde se analiza la parte técnica, el poder obtener un tamaño mínimo del banco trifásico de capacitores de aproximadamente 11.000 KVAC utilizando unidades capacitadoras de 8.320 voltios y de 100 KVAC a

carrearía serios problemas a la confiabilidad del banco, ya que cada grupo serie tendría un número de unidades capacitadoras menor al mínimo establecido por razones técnicas.

También, por razones puramente económicas se ha escogido unidades capacitadoras con voltaje de fabricación standard, es decir son capacitores fabricados en serie, y comercializados por las diferentes casas de fabricación de elementos eléctricos como la General Electric, la Westinghouse, Sangamo, etc., lo que se quiere decir es que son unidades que pueden ser encontradas fácilmente en cualquier mercado y tal vez con diferencias de precios dependiendo de la casa que las fabricó; en vez de haber diseñado el banco, con unidades capacitadoras con un voltaje no standard, lo cual implicaría el de haber tenido que solicitar a una determinada casa la fabricación de esta unidad, lo que traería como consecuencia el de tener unidades capacitadoras de un costo de fabricación alto, y con la seria limitación de no poderlas conseguir fácilmente ya sea para cambiar una unidad fallada o para expansiones futuras del banco.

El conectar nuestro banco trifásico de capacitores en estrella aterrizada, también incide en los costos de una manera ventajosa, ya que si nuestro proyecto se lo hubiera diseñado para ser conectado en estrella no aterrizada, por ejemplo los aisladores de base deberán tener un aislamiento que soporte el voltaje completo de línea a línea, es decir en nuestro caso se hubiera te-

nido que escoger aisladores que soporten los 69.000 voltios. Ve mos entonces que para nuestras dos alternativas, los aisladores deben soportar o tener un aislamiento solo para 15.000 voltios, lo que constituye un beneficio incremental en nuestro análisis.

Ambas alternativas han sido diseñadas considerando un voltaje del sistema de aproximadamente 72 KV, dato que como se ha mencionado antes, fue escogido tomando en cuenta los sobrevoltajes que existen en el Sistema Guayaquil en determinadas horas y días de la semana; además también en el cálculo del diseño del banco se consideró un número mínimo de unidades capacitores por grupo serie trabajando con un sobrevoltaje de diez por ciento. Es decir, todo esto nos proporciona un margen de confiabilidad de buen funcionamiento del banco ante alguna situación crítica de las condiciones del sistema, en lo que respecta a sobrevoltaje.

En lo referente a la calidad de la protección del banco, podemos decir que en ninguno de los dos diseños se tendrá una gran cantidad de energía almacenada en los capacitores en paralelo, por lo que el empleo de fusibles de tipo expulsión es suficiente en vez de usar los fusibles limitadores de corriente.

Se añade a esto la protección de desbalance, que también es suficiente para nuestro banco conectada en estrella aterrizada.

Es decir, en este aspecto de protección del banco, ambas alter-

nativas presentan iguales características, por lo que en nuestro análisis deberán tomarse en cuenta otros factores para la decisión del diseño del banco.

Otro factor que es igual en las alternativas presentadas, es que considerando las características ambientales y meteorológicas de la ciudad de Guayaquil, en la que no se presentan condiciones de vientos huracanados ni de descargas atmosféricas severas, además de condiciones de densidad relativa del aire, de humedad de lluvia y de contaminación atmosférica que permiten que los costos de estructura del banco sean menores con respecto del caso en que estas condiciones mencionadas estuvieran presentes de manera más crítica.

Por lo que también es necesario tener más elementos de análisis para la decisión del diseño del banco.

Otro factor a considerarse es el que como la mayoría de los tipos de montajes del banco de capacitores emplean a la estructura misma de las unidades de montaje como parte del circuito eléctrico, deben entonces tomarse algunas precauciones para prevenir que el personal de manera accidental pueda tocar estas estructuras mientras el banco esté energizado.

La alternativa de utilizar estructuras de elevación, en las cuales los aisladores de base y las unidades de montaje son insta-

ladas encima de estas estructuras de elevación, lográndose de esta manera que todas las partes energizadas queden fuera del alcance accidental del personal, fue descartada por factores puramente económicos. Aunque la alternativa del diseño del banco que emplea unidades capacitadoras de 50 KVAR es la más costosa, por la necesidad de usar una mayor cantidad de estructuras de elevación.

Pero considerando que como estos bancos de capacitores serían instalados ya sea en los patios de la subestación de las plantas de generación, o en la subestaciones de reducción ubicadas en diferentes partes de la ciudad, a las que solo tienen acceso personal especializado, se cree que una solución alternativa a estas costosas estructuras de elevación es la de cercar el banco con una malla metálica, la puerta de la cual podría estar interconectada con los medios de desconexión del banco, es decir que cada vez que la puerta es abierta, el banco de capacitores será retirado del servicio.

Como se puede ver esta alternativa es más económica y como en ambos diseños esto implica un costo similar, no fue considerada en la primera parte de este capítulo.

Hay que anotar también, que algunas veces ambas soluciones son consideradas para el mismo banco sobre todo de manera particular cuando otros aparatos además del banco de capacitores de -

ben ser instalados dentro del área mallada.

Hay un costo adicional que debe ser considerado, que es el que por estadísticas es esperado que durante los cinco primeros años de funcionamiento del banco se tenga un porcentaje alto de unidades falladas debido a fallas de funcionamiento, este porcentaje disminuye considerablemente hasta los diez años de funcionamiento del banco, volviendo a aumentar desde los diez hasta los quince años.

Aunque este es un valor adicional con carácter estadístico, debe ser también seriamente analizado.

Se han mencionado varios aspectos, tanto técnicos como económicos, que se han considerado los más importantes en esta evaluación y análisis comparativo de las alternativas de diseños del banco de capacitores. Estos elementos son suficientes para poder entonces tomar la decisión de cuál arreglo elegir y es en el siguiente apartado de conclusiones y recomendaciones, en donde se mencionará esta decisión.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De todo el estudio anterior se pueden determinar algunos criterios:

- Que ambas alternativas, presentan en su parte técnica una igualdad de condiciones que permite una operación segura aún en condiciones de disturbios en el sistema.
- Una de las ventajas que presenta el diseño que emplea unidades capacitadoras con voltaje de fabricación de 13.800 voltios, con respecto al arreglo que utiliza capacitores de 8.320 voltios, es que ocupa menos espacio físico. Factor que viéndolo desde el punto de una expansión en el futuro del banco de capacitores, constituirá en el aspecto económico un ahorro de dinero para la Empresa.
- El aspecto económico, es decir el costo de un proyecto siempre ha tenido un gran peso en la toma de decisiones; en nuestro caso también la tendrá, ya que el diseño que usa capacitores de 13.800 voltios es mucho menos costoso que la otra alternativa, y esto sumado a los dos criterios expuestos anteriormente nos lleva a tomar la decisión que el arreglo de banco de capacitores que tiene las mayores ventajas es el arreglo que utiliza unidades capacitadoras a un voltaje de 13.800 voltios y con una capacidad de 150 KVAR.

Una vez efectuada nuestra decisión, veremos qué ventajas se pueden

obtener de este arreglo para solucionar algunos problemas que se presentan en el Sistema Guayaquil.

La ciudad de Guayaquil adolece en determinadas horas del día, sobre todo en las madrugadas y en determinados días, sobre todo los fines de semana, de sobre voltajes, que afectan muy seriamente el buen servicio que se desea mantener en todo momento.

Como también se han producido problemas de bajo voltaje, en condiciones de máxima carga, conjuntamente con problemas de entrega de potencia -por determinado motivo- de parte del Sistema Nacional Interco -nectado.

El empleo de este diseño de banco de capacitores, porporciona un buen medio de disminuir estos inconvenientes. Si este banco de capacitores fuera instalado en una de las plantas de generación que tiene la Empresa Eléctrica del Ecuador Inc., por ejemplo en la Planta Estero Salado, se podría entonces disminuir la cantidad de potencia reactiva generada, bajar las derivaciones de los transformadores de elevación de la posición en que actualmente se encuentran y conectar al sistema nuestro banco de capacitores para compensar así la potencia reactiva que se ha dejado de generar. De esta manera se podrá controlar de una manera más efectiva, cualquier sobrevoltaje que pudiera ocurrir, ya que bastaría desconectar el banco para mejorar el voltaje del sistema, o la de poder mejorar un nivel de bajo voltaje, conectando el banco.

Más aún, se recomienda que la instalación del banco de capacitores no solo sea de un arreglo sino que conste de varios arreglos, para que de esta manera podamos conectar o desconectar estos capacitores por pasos, lo cual da mayor maniobrabilidad al sistema y mayor control sobre el voltaje.

También se sugiere que este banco se lo instale en varios sitios estratégicos a lo largo de la ciudad, sitios que pueden ser las subestaciones de reducción existentes que tengan operador, para de esta manera dar aún mejor manejo del voltaje y rapidez en la conexión o desconexión de estos bancos de capacitores, cuando así las condiciones del sistema lo requieran. Se ha mencionado anteriormente sobre la complejidad que existe en el control del voltaje debido a que este control se lo realiza con la barra de 69 KV. En esta tesis se plantea entonces la alternativa de usando bancos de capacitores a nivel de 69 KV, conectados en las barras de generación y/o las subestaciones, tener un medio de controlar el voltaje del sistema y por ende mejorar el factor de potencia.

Como estos bancos de capacitores son conectados y desconectados manualmente en nuestro estudio, se recomienda entonces una mejor alternativa para ejercer este control, que es la de emplear un microprocesador. Elemento con el cual se pueden manejar variables múltiples. Queda por tanto abierta esta alternativa de estudio.

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

1. HARDER J. Capacitor Bank Protection, Westinghouse Electric Corporation. Abril 1980, South Dakota.
2. HARDER J., McCLAIN R., MERCIER G., Minimizing Capacitor Case Rupture - An Overview, Westinghouse Electric Corporation. Abril 1979, Chicago.
3. HARDER J. Power Capacitor Construction, Capacity and Protection, Westinghouse Electric Corporation. Marzo 1981, Palo Alto.
4. HARDER J. Optimum Shunt Capacitor Group Fusing, Westinghouse Electric Corporation. Enero 1976, Nueva York.
5. HARDER J. Industrial Power Capacitors - Estimating the Energy Cost Savings, Westinghouse Electric Corporation. Abril 1983, Chicago.
6. HARDER J. Some Fundamentals of Capacitor Applications on Distribution Systems, Westinghouse Electric Corporation. Diciembre 1977, South Dakota.
7. WESTINGHOUSE, Price List 39-410, Westinghouse Electric Corporation. Octubre 1979, Bloomington.

8. SANGAMO, POWER CAPACITOR. Application Measurement and Control, Sangamo Electric Company, 15th Annual Power Seminar, 1973.
9. MCGRAW EDISON, Economics and Applications of Shunt Capacitors on Utility Systems, McGraw Edison. Power System.
10. ALLAN GREENWOOD, Electric Transients in Power Systems, Wiley Interscience, 1971.
11. MAC DOUGALL F., Design and Application of Substation Capacitor Equipment, The Line 79/1.
12. CIURRO N. Calculation of Capacitor Unbalanced Delta Connection, The Line 76/3.
13. BURRAGE L. Fusing Practices to Protect Shunt Capacitors, The Line 78/3.
14. HAGER G. Evaluation of Capacitor Applications, The Line 77/4.
15. WESTINGHOUSE, SHUNT CAPACITORS. Application to Electric Utility Systems, Westinghouse Electric Corporation. Marzo 1982.