

76
2ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

DIVISION DE INGENIERIA ELECTRICA, ELECTRONICA Y
EN COMPUTACION DE LA FACULTAD DE INGENIERIA

APLICACION Y PROTECCION DE BANCOS DE CAPACITORES EN ALTA TENSION

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A N :

RAMON HUERTA ZURITA

JOSE ANTONIO MEDINA GONZALEZ

JAIME OCARANZA MALDONADO

ASESOR:

ING. AUGUSTO O. HINTZE VALDES



MEXICO, D. F.

1992

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E

	Pag.
INTRODUCCION	1
CAPITULO 1	
DETALLES DE CONSTRUCCION Y CONTROL DE CALIDAD	
1.1 Fabricación de capacitores	5
1.1.1 Factores que afectan la confiabilidad	8
1.1.2 Factores que afectan la seguridad	10
1.1.3 Factores que afectan las pérdidas	11
1.1.4 Factores que afectan la economía	12
1.2 Pruebas y aseguramiento de calidad para capacitores de potencia modernos de alto voltaje	21
1.2.1 Parámetros importantes de un capacitor	22
1.2.1.a Parámetros de diseño	22
1.2.1.b Secuencia de fabricación	22
1.2.1.c Pruebas y control	23
1.2.2 El propósito de las diferentes pruebas	24
1.2.2.a Pruebas de rutina	25
1.2.2.b Pruebas tipo (o prototipo)	28
1.2.2.c Pruebas de producción	31
1.2.3 Programa de aseguramiento de calidad (PAC)	33
1.2.3.a PAC estandar	33
1.2.3.b Contenido del PAC	35
1.2.4 Pruebas de resistencia	38
1.2.4.a Capacidad para soportar transitorios	39

CAPITULO 2

LA APLICACION DE CAPACITORES EN DERIVACION

	Pag.
Introducción	40
2.1 Capacitor en derivación contra condensador	
síncrono	41
2.2 Localización en el sistema	41
2.3 Efectos básicos de los capacitores en derivación	46
2.3.1 Reducción de corriente de línea	46
2.3.2 Incremento del nivel de voltaje en la carga	50
2.3.3 Reducción de pérdidas	54
2.3.4 Incremento del factor de potencia	55
2.3.5 Reducción de carga en la fuente	56
2.3.6 Reducción de la demanda en los puntos de intercambio	57
2.3.7 Reducción de la inversión en el sistema por kW de carga	58
2.4 Cálculo y evaluación de los beneficios económicos de capacitores en derivación	59
2.4.1 Capacidad liberada en sistema y equipo	62
2.4.2 Limitación de la caída de voltaje	62
2.4.3 Limitación de capacidad térmica	65
2.4.4 Reducción de pérdidas en sistema y equipo	69
2.4.5 Aumento en los ingresos por voltaje elevado del sistema	71
2.4.6 Resumen de la evaluación de capacitores en derivación	72

	Pag.
2.5 Requisitos de los capacitores en derivación	
para el sistema	74
2.5.1 Estimación de la magnitud necesaria de	
reactivos del sistema	75
2.5.2 Ubicación de capacitores a lo largo del sistema	77
2.5.3 Localización de capacitores dentro de las	
secciones del sistema	89
2.5.4 Conexión eléctrica de capacitores en derivación	
a los sistemas de potencia	93
2.5.5 Bancos de capacitores fijos o con interruptor	94
2.5.6 Dispositivos de interrupción	95
2.5.7 Control de dispositivos de interrupción	96
2.5.8 Conexión y puesta a tierra de bancos de	
capacitores	98
2.6 Efectos contingentes de capacitores en derivación	
en los sistemas de potencia	102
2.6.1 Interferencia de teléfono	102
2.6.2 Efecto de capacitores en derivación en la	
estabilidad del sistema	103
2.6.3 Problemas de resonancia encontrados a los	
capacitores en derivación	105
2.6.4 Sobrevoltajes de resonancia directa	106
2.6.5 Operación de capacitores bajo condiciones	
anormales del sistema	107

CAPITULO 3

PROTECCION DE BANCOS DE CAPACITORES

	Pag.
Introducción	111
3.1 Fusible individual	112
3.1.1 Selección de las características de operación continúa y de fusión de un fusible	114
3.2 Cálculo de bancos de capacitores	117
3.2.1 Bancos con estrella flotante	120
3.2.2 Bancos estrella-estrella flotante	125
3.3 Ajuste de los relevadores de desbalance	130
3.4 Protección contra desbalance y falla dentro de un banco de capacitores	132
3.5 Tipos de protección con detectores de desbalance	133
3.5.1 Protección contra falla dentro del banco	134
3.5.2 Protección contra desbalance severo	135
3.5.3 Protección contra sobrevoltaje causado por falla en la unidad capacitor	135

CAPITULO 4

BANCO DE CAPACITORES SIN FUSIBLES

	Pag.
Generalidades	149
4.1 Antecedentes	149
4.2 Verificación del comportamiento de la unidad	
fallada	151
4.2.1 Corriente continua	151
4.2.2 Switcheo de capacitores	152
4.2.3 Pérdidas en los capacitores	153
4.2.4 Experiencia de campo	154
4.3 Construcción de bancos de capacitores sin	
fusibles	155
4.4 Características de los bancos de capacitores sin	
fusibles	159
4.4.1 Simplicidad	159
4.4.2 Protección contra efectos indeseables	159
4.4.3 Tamaño	160
4.4.4 Armado en campo	161
4.4.5 Pérdidas	161
4.4.6 Tamaño mínimo de banco	162
4.4.7 Energía paralela	163
4.5 Consideraciones de protección	163
4.6 Localización de una unidad capacitor dañada	
dentro de un banco de capacitores sin fusibles	166
4.7 Principios de diseño	168
4.7.1 Corriente de cadena	168

	Pag.
4.7.2 Máximo voltaje a la estructura	169
4.7.3 Establecimiento del potencial de la estructura.....	170
4.7.4 Selección de la unidad	170
4.7.5 Capacidad de la unidad	171
4.7.6 Protección	171
CONCLUSIONES	173
BIBLIOGRAFIA	175

I N T R O D U C C I O N

En la operación de los sistemas eléctricos de potencia de alta tensión se presentan, de vez en cuando, situaciones tales como una demanda anormal de reactivos, esto es, que dicha demanda sobrepasa la aportación que de ellos hacen algunos elementos de la red, obligando a los generadores a bajar su factor de potencia para suministrar los reactivos complementarios.

El costo de generar, transmitir y transformar los reactivos, en el camino a su consumo, invitan a realizar algunas consideraciones con respecto a los elementos que consumen estos reactivos, imponiendo la necesidad de localizar, operar y proyectar los equipos compensadores de tal forma que estos no alteren el funcionamiento normal del sistema al cual se conectan. Los mecanismos de compensación más empleados son los siguientes:

a) A niveles de voltaje industriales se utilizan motores síncronos que son capaces de proporcionar trabajo mecánico y al mismo tiempo actuar como una carga reactiva operando subexcitados o sobreexcitados, generalmente se usan para mejorar el factor de potencia de la instalación.

b) Utilización de condensadores síncronos. Dichos condensadores son máquinas síncronas diseñadas para que generando o absorbiendo reactivos de la red controlen el factor de potencia. Suelen ser de gran tamaño y capaces de proporcionar potencia reactiva elevada, sin embargo su uso implica una inversión inicial muy elevada y un mantenimiento costoso.

c) Utilización de compensadores estáticos. Los compensadores estáticos están integrados por capacitores, transformadores y tiristores, combinados de tal forma que proporcionan una rápida y continua compensación de reactivos; el principal problema de estos compensadores es el costo elevado de sus componentes de estado sólido (tiristores), ya que se proyectan especialmente para operar en altas tensiones.

d) Utilización de bancos de capacitores. Estos proporcionan la potencia reactiva de caracter capacitivo que sea necesaria, pudiendose instalar en bancos fijos o bancos formados por secciones fijas y secciones desconectables.

El uso de capacitores de potencia comparado con el uso de otros medios de generación de potencia reactiva, implica entre otras, las ventajas de un bajo costo por kVAR instalado, un fácil manejo y un mantenimiento sencillo y barato que en muchos casos se hace prácticamente inexistente.

Esto último es el motivo de la aceptación universal que han tenido los capacitores de potencia en todos los sistemas de energía eléctrica, teniendo una demanda notablemente creciente.

Cabe mencionar que para utilizar los capacitores de potencia se requiere considerar una serie de factores durante su instalación, operación y protección que son muy importantes para no alterar el funcionamiento del sistema eléctrico al cual se conectan.

El desarrollo de la tecnología de los materiales que conforman un capacitor y de la ingeniería depositada en su construcción, ha abierto campos de análisis muy interesantes que impulsan a revisar los aspectos de aplicación y protección de los bancos de capacitores.

Este trabajo tiene el objetivo de proporcionar a los ingenieros que laboran en áreas relacionadas con la compensación de reactivos en los sistemas eléctricos de alta tensión, un conjunto de información sobre los bancos de capacitores en paralelo que va desde su fabricación y normas aplicadas, hasta una guía preliminar para su aplicación.

Además de analizar su comportamiento en condiciones normales de operación, los detalles de fabricación y de determinar el mejor sistema de protección propio y el del sistema al cual se conectan, también se pretende sintetizar lo más relevante en cuanto a los nuevos conceptos de los capacitores de potencia; esto último se refiere a la investigación y pruebas de bancos de capacitores sin fusibles, los cuales representan lo más reciente en cuanto a la compensación de reactivos de los sistemas eléctricos de potencia.

CAPITULO 1.

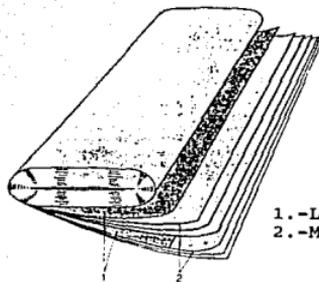
DETALLES DE CONSTRUCCION Y CONTROL DE CALIDAD.

1.1 Fabricación de Capacitores.

Un capacitor de potencia está formado por placas de aluminio de espesor delgado y por un dieléctrico que, normalmente, suele ser de películas delgadas de polipropileno en forma de lámina o una combinación de película de polipropileno y papel Kraft.

La hoja de aluminio y el dieléctrico se devanan dentro de una sección. En algunos diseños, una lengüeta de metal hace contacto con la hoja y lleva hacia afuera la conexión eléctrica para cada sección. En otros diseños, la conexión eléctrica se hace extendiendo la hoja más allá del final de la sección. Para capacitores de alto voltaje cada sección soporta normalmente un valor fijo alrededor de 1 a 2.5 kV. Varias secciones se conectan en una combinación serie-paralelo, con el fin de obtener el voltaje y la capacitancia requeridos.

Las combinaciones serie-paralelo de secciones se enrollan con un aislamiento, y se insertan dentro de una caja metálica, donde además se debe conectar un resistor de descarga entre los polos resultantes de las combinaciones serie-paralelo de los capacitores. Por separado, se ensambla un conector bushing en lo que será la tapa de la caja metálica mencionada soldándola herméticamente para que quede sellada excepto por un orificio para impregnación.



- 1.-Lámina de aluminio
- 2.-Material dieléctrico

FIGURA 1.1

La unidad se suelda en vacío, que se logra con altas temperaturas. En seguida, la unidad se rellena con un fluido dieléctrico y se sella. El vacío con altas temperaturas remueve la humedad y los materiales volátiles, además proporciona un medio adecuado para la impregnación y acabado de la unidad. El fluido dieléctrico llena todo el vacío, mejorando la distribución de voltaje, evitando el efecto corona y mejorando el funcionamiento térmico.

Cabe mencionar que cada sección individual es operada con un voltaje normal dentro de un rango de 1 a 2.5 kV.

El dieléctrico se forma por varias capas de material aislante, para que, de esta manera, alguna pequeña imperfección en una de las capas no resulte en un defecto del capacitor. Si se hace la sección de voltaje demasiado delgada, provoca que el espesor deseado de las láminas de dieléctrico individuales, sean tan delgadas que dificultan su respectivo manejo en el proceso de fabricación del capacitor. Si se hace la sección de voltaje muy amplia, resulta un grueso sandwich de dieléctrico y un incremento en la concentración de esfuerzos por voltajes en el filo de la

hoja de lámina. Esta concentración de esfuerzos tiende a incrementar el efecto corona y a reducir la capacidad del capacitor para soportar sobrevoltajes. La selección de la sección de voltaje es una optimización para dar una operación confiable en forma económica.

El fluido dieléctrico es un hidrocarburo (en algunos años fué de policlorinatobipenil), algunas empresas utilizan un fluido que es un tratamiento especial de isopropilbipenil.

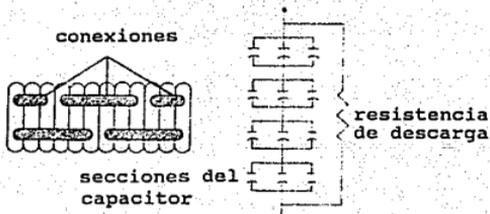


FIGURA 1.2

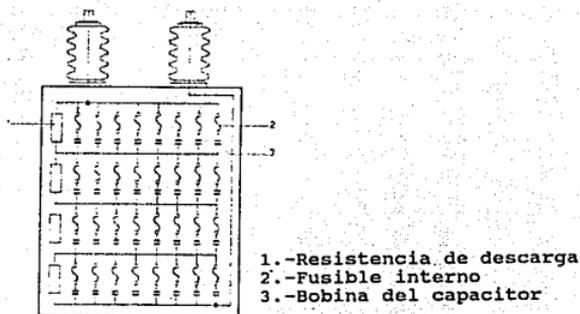
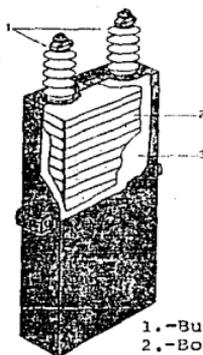


FIGURA 1.3



- 1.-Bushings
- 2.-Bobinas del capacitor
- 3.-Aislamiento de la caja

FIGURA 1.4

1.1.1 Factores que afectan la confiabilidad.

Casi todos los aspectos concebibles del diseño, manufactura y prueba tienen un efecto en la seguridad de la unidad capacitadora. Además, casi todos los aspectos aceptados de la aplicación y el medio ambiente tienen un efecto en la confiabilidad experimentada. La confiabilidad de la base dieléctrica del capacitor puede verse afectada por los esfuerzos promedios, por los efectos corona críticos y por un funcionamiento térmico .

La capacidad al esfuerzo promedio de un sistema dieléctrico para soportar el esfuerzo promedio depende de la capacidad y calidad de los materiales sólidos y líquidos utilizados así como de la correcta impregnación. La limpieza y control de la humedad durante la manufactura son importantes para evitar impurezas y daños al material durante la fabricación.

Estos factores se consideran más adelante, cuando se analiza el punto del Programa de Aseguramiento de Calidad PAC.

El comportamiento térmico de la unidad depende del calor generado en la misma, de la característica de transferencia de la unidad y de la capacidad térmica del sistema dieléctrico.

Las consideraciones térmicas pueden afectar la cantidad máxima de kVAR, que pueden ser suministrados en un contenedor de tamaño determinado. Una consideración térmica es el deterioro posible del sistema dieléctrico, a la temperatura puntual de operación máxima, debido a la contaminación, defectos de materiales, etc.

Para detectar posibles defectos, algunas empresas realizan una prueba del factor de potencia a altas temperaturas a todas las unidades capacitadoras, además de las pruebas de rutina requeridas por las normas. Esta prueba del factor de potencia con altas temperaturas revelará contaminación en el fluido o materiales dieléctricos defectuosos. El comportamiento de la unidad ante el corona depende de los extremos de las hojas y de otras no uniformidades.

Los fluidos actualmente usados por los fabricantes tienen excepcional resistencia dieléctrica (resistencia al efecto corona) operando sobre los rangos de temperatura de los capacitores de potencia. Mediante un adecuado diseño, los fabricantes reducen considerablemente la concentración de esfuerzos por voltaje en las orillas de las hojas. Esto hace que el esfuerzo crítico baje mucho, cercano al esfuerzo promedio.

El ciclo y técnica de impregnación son extremadamente importantes para asegurar un acabado de impregnación con el objeto de reducir el efecto corona.

Además de la integridad básica del dieléctrico, la fabricación del capacitor requiere preocupación permanente en el resto de la construcción, ésta se ve afectada por:

- Integridad de las soldaduras
- Durabilidad de los terminados
- Calidad de la soldadura
- Preparación para el embarque

1.1.2 Factores que afectan la seguridad.

La seguridad, como la confiabilidad, es afectada tanto por las características inherentes de la unidad capacitadora como por el medio ambiente (sobrevoltajes, temperaturas excesivas, protección, etc.), en donde el capacitor opere.

Probablemente, el factor más importante para determinar la seguridad es la confiabilidad ya discutida.

Si una unidad no falla es poco probable que se le rompa su contenedor (caja), situación que causaría un riesgo al ambiente o al personal en los alrededores. Otra característica de seguridad que frecuentemente se toma en cuenta (y es necesaria), es el resistor de descarga que reduce el voltaje en un capacitor de alta tensión desde el valor pico del voltaje nominal a 50 volts en 5 minutos o menos (norma de E.U.). Esta resistencia de descarga reduce la probabilidad de choque debido al contacto accidental con un capacitor desenergizado.

Se ha hecho una cantidad importante de pruebas de ruptura de la caja para reducir la probabilidad y violencia de la ruptura en el caso de falla del capacitor. Como resultado de estas pruebas, se han hecho muchos cambios que incluyen:

a) Incrementos en el tamaño de la terminal conectora para evitar la vaporización de las terminales durante corrientes de falla del sistema.

b) Adición de un soporte interno, para mantener las partes sólidas en la caja en el caso de una ruptura violenta, la cuál abriría el fondo de la unidad.

1.1.3 Factores que afectan las Pérdidas

Las pérdidas de energía en un capacitor son determinadas por las pérdidas del dieléctrico, el calentamiento de la resistencia de descarga y por las pérdidas del conductor (láminas) I R.

Recientemente, se han reducido las pérdidas en el dieléctrico del capacitor por el mejoramiento en los materiales usados en los mismos. La película de polipropileno y el fluido impregnante tienen muy bajas pérdidas dieléctricas sobre el rango de temperatura de operación de los capacitores de potencia. Los fluidos impregnantes no polares no solamente tienen mejores pérdidas, sino que también proporcionan un capacitor con mucho menos variación en la capacitancia y pérdidas con la temperatura.

Las pérdidas en la resistencia de descarga están limitadas por el requerimiento para reducir a 50 volts en 5 minutos o menos. Esto fija el valor más alto de la resistencia de descarga, que es aceptable para capacitores de un voltaje dado y por lo tanto la cantidad mínima de calor que será generada por esta resistencia. Las pérdidas $I^2 R$ del conductor se afectan por el diseño del capacitor, el número y localización de los tabs, etc.

1.1.4 Factores que afectan la Economía.

Los kVA capacitivos que pueden obtenerse a partir de un volúmen dado son:

$$kVAC = 1000 (2 \times 3.1416 f) E_o K v \left(\frac{kV}{t} \right)^2$$

donde:

f: frecuencia nominal

E_o: permeabilidad del espacio libre

K: constante dieléctrica efectiva

v: volúmen del dieléctrico

kV: voltaje RMS aplicado al capacitor en kV

t: espesor del dieléctrico

Esta fórmula no incluye el volúmen de la hoja delgada de metal, arrollamiento, etc. El gran adelanto que se ha hecho en años pasados para identificar materiales, que pueden operar a esfuerzos más altos (kV/t) tales que aún con una constante dieléctrica (K), ligeramente más baja, se ha podido incrementar la capacitancia en un volúmen dado.

El arrollamiento del extremo de la hoja (diseño de anillo corona) utilizado por algunos fabricantes reduce la concentración de esfuerzos y permite utilizar los materiales dieléctricos con un esfuerzo promedio ligeramente más alto mejorándose la confiabilidad.

En el estado actual del arte, los capacitores con dieléctricos de papel-película se pueden fabricar en un volumen ligeramente más pequeño que los capacitores " todos de película " de la misma confiabilidad.

Al seleccionar capacitores para una aplicación dada se necesitan considerar cuatro parámetros:

- a) Voltaje
- b) Corriente
- c) kVAC
- d) Temperatura ambiente.

a) **VOLTAJE**

El límite de aplicación de sobrevoltaje recomendado esta ilustrado en la figura 1.5. Esta figura aplica el voltaje a través del elemento activo del capacitor (NOTA: Observe para unidades no conectadas a la caja el nivel básico de impulso se aplica al aislamiento entre el elemento activo y la caja. El NBI para unidades conectadas a la caja se refiere solamente al esfuerzo del bushing o boquilla).

Algunas de las circunstancias que han conducido a extender los límites recomendados incluyen:

1.- El reencendido en los interruptores (breakers) del capacitor produce voltajes en exceso de los límites de impulso recomendados.

2.- Elevación del voltaje a través de los reactores que, conectados en serie con el capacitor, se usan para disminuir el corto circuito o sintonizarlo a una frecuencia determinada, y que produce un voltaje continuo por encima del valor recomendado.

3.- La protección de bancos de capacitores trifásicos conectados en estrella flotante, con fusibles que agrupan a varias unidades, ha provocado que, durante un corto circuito en una de las unidades, se tengan sobrevoltajes en las unidades de las fases sin falla que exceden límites recomendados.

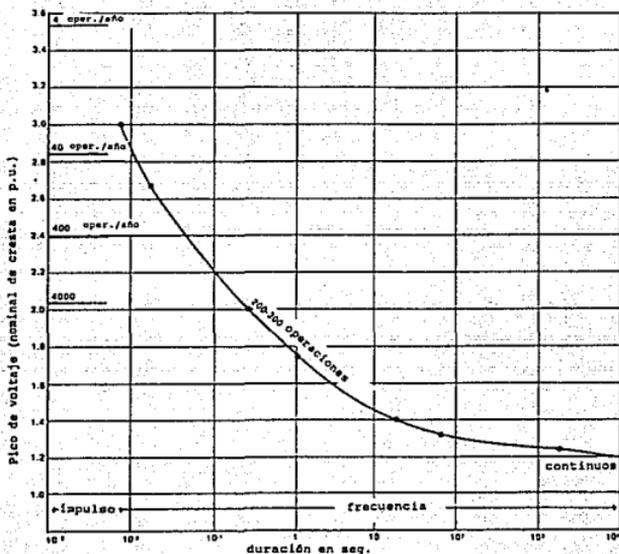
4.- Si el voltaje del bus de la subestación se mantiene continuamente por arriba del nominal en los bancos con varios grupos serie, el incremento de voltaje, debido a la pérdida de algunas unidades en un grupo serie, puede dar origen a un voltaje por encima del recomendado.

En una aplicación conservadora, se considera el voltaje aplicado máximo (incluyendo cualquier incremento al pico del voltaje por armónicas) más el desbalance máximo permitido.

5.- La presencia de armónicas. Además de provocar corriente excesiva y sobrecarga térmica, también pueden incrementar los voltajes de pico a pico a través del capacitor, en cantidad suficiente para producir descargas parciales internas y una rápida degradación del dieléctrico.

Tales aplicaciones pueden ocurrir cuando los capacitores paralelo se aplicasen como filtros de potencia, en la base de los requerimientos de frecuencia fundamental y sin considerar las corrientes armónicas momentáneas y continuas.

Los voltajes aplicados por arriba de los límites de aplicación recomendados exponen a la unidad al daño. Según la importancia en que se considere la confiabilidad de una instalación, se deberán evitar los voltajes por encima de los límites de aplicación recomendados para hacer mínimos los riesgos de un posible incremento en la probabilidad de falla.



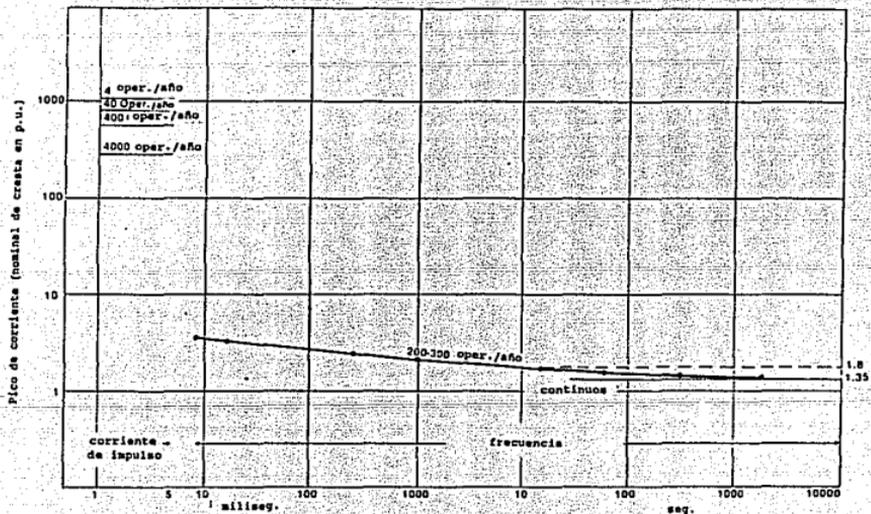
Guía de aplicación de sobrevoltajes en capacitores

FIGURA 1.5

b) CORRIENTE

El límite de aplicación recomendado de sobrecorriente para las unidades capacitivas está mostrado en la figura 1.6. Esta aplicación de sobrecorriente se tiene considerada en los comités de normalización de NEMA e IEEE. Aunque se reconoce que las recomendaciones pueden cambiar en un futuro próximo.

También la capacidad de sobrecorriente de los fusibles, interruptores (circuit breaker), buses, TC's, etc. usada en los bancos de capacitores puede no ser siempre la misma que la capacidad de sobrecorriente de las unidades capacitivas. Esta es



Guía de aplicación de sobrecorrientes en capacitores

FIGURA 1.6

la razón por la que las aplicaciones que caen en el área sombreada de la figura 1.6 deben ser verificadas con el fabricante del equipo. Las situaciones más frecuentes para las cuales se deben considerar las sobrecorrientes son:

- Instalaciones con rectificadores grandes.
- Hornos de arco o soldadoras grandes.
- Instalaciones grandes con equipos controlados con SCR.
- Filtros sintonizados
- Condiciones de resonancia del sistema
- Bancos de capacitores pequeños que frecuentemente operan en paralelo con grandes bancos.

La experiencia indica pocos problemas para la unidad capacitor debida solamente a la corriente.

Los problemas más comunes atribuidos a la corriente, han sido fusibles fundidos y TC's quemados debido a las sobrecorrientes armónicas.

Las unidades capacitoras son más comúnmente limitadas por los kVAC totales que por la corriente solamente.

c) kVAC

Los kVAC totales continuos en una unidad capacitora se deben limitar a 1.35 veces los nominales. Para determinar los kVAC totales, se deben considerar los siguientes factores:

- Los voltajes del sistema (como un por ciento del nominal)
- La capacitancia de la unidad como un porcentaje de la nominal (límites normales de 0 a +15%) y
- La cantidad de corrientes armónicas

Las condiciones del sistema que pueden conducir los kVAC que se entregan en exceso, son esencialmente las mismas de la lista del inciso de la corriente, con la excepción de la conmutación.

Este tipo de instalaciones generalmente traerán como resultado la selección de unidades capacitadoras, en un voltaje nominal más alto para cubrir tanto los requerimientos de voltaje como los de potencia (kVAC). Una falla al "deratear" las unidades en forma apropiada ha conducido a aplicar unidades que exceden los límites recomendados de kVAC que a su vez, origina temperaturas excesivas.

d) TEMPERATURA AMBIENTE

Se intenta que las unidades capacitadoras individuales sean estables térmicamente a 46 °C y se proyectan para una temperatura ambiente promedio anual no mayor de 35 °C.

Unos límites más realistas para equipos son entre 35 y 40 °C para el día más caluroso esperado en el sitio y con un promedio anual de 20 a 25 °C.

La instalación de bancos de capacitores grandes en el interior de edificios en climas cálidos (y en especial aquellos cerca de hornos grandes) necesita una cuidadosa consideración de la temperatura ambiente. El calor disipado por las propias unidades se puede agregar al de la temperatura ambiente en una área cerrada. En aquellas aplicaciones en que se tiene alta temperatura, se recomienda utilizar un relevador que proporciona alarma y disparo.

En la unidad capacitadora, el voltaje, la corriente, los kVAC y la temperatura ambiente se consideran importantes para evitar la vulnerabilidad de las unidades capacitadoras y la falla del equipo. Evitar que la unidad falle es el primer y más importante paso para minimizar la probabilidad de la ruptura de la caja del capacitor.

1.2 Pruebas y aseguramiento de calidad para capacitores de potencia modernos de alto voltaje

Cuando se lleva a cabo la construcción de capacitores de potencia; para obtener un buen servicio, libre de disturbios, durante muchos años de operación de bancos que tienen altas densidades de potencia; es necesario considerar los aspectos específicos que, para este tipo de equipo eléctrico, se tienen a la mano. Las condiciones que deben asegurar tal servicio son las siguientes:

- 1) Una especificación apropiada por parte del usuario.
- 2) El fabricante deberá realizar un diseño óptimo por unidad y por banco basado en las especificaciones y en reportes de prueba actualizados y confiables, que han de estar conectados con la experiencia de servicio en campo y, finalmente, también deberá incorporar una protección selectiva por unidad y por banco.
- 3) El fabricante debe implementar un comprensible y efectivo Programa de Aseguramiento de Calidad (PAC) para proporcionar una producción uniforme. Dentro de este programa se deberán llevar a cabo las pruebas específicas.
- 4) El fabricante debe tener las bases para sus diferentes diseños establecidos por largas pruebas de resistencia a las diferentes condiciones de servicio.

Esta parte se enfocará en los incisos 3) y 4), es decir, en la forma de asegurar una calidad óptima de las unidades de capacitores de un diseño ya determinado y en como establecer los parámetros de diseño con pruebas de resistencia.

1.2.1 Parámetros importantes de un capacitor

Para entender los problemas específicos que existen en el diseño, fabricación y control de calidad de los capacitores de potencia, a continuación se hace una lista corta con los parámetros de diseño y fabricación más importantes.

1.2.1 a. Parámetros de diseño

- Esfuerzo dieléctrico alto, en el orden de 50-55 Vrms/micromts a través de la película a voltaje nominal.

- Una delgada hoja de relleno, aproximadamente 30 micromts para un dieléctrico de 1500 V, generalmente formado por 2 películas.

- Ampliar áreas aisladas, aproximadamente 500 m² en una unidad de 250 kVAR con elementos de 1500 V.

- Unidades de gran tamaño, es decir, entre 250-300 kVAR a 60 Hz.

1.2.1 b. Secuencia de fabricación.

Sin incluir los controles en proceso, los capacitores se fabrican siguiendo los pasos siguientes:

- Los materiales sólidos dieléctricos y las hojas electrodo de aluminio se enrollan en una máquina devanadora especial para formar un elemento que debe tener dimensiones determinadas y estrictas.

- Los elementos se apilan uno arriba del otro junto con un entreelemento aislante y/o en grupo serie aislante para formar un paquete de dimensiones especificadas.

- Luego se interconectan los elementos del paquete. Se hacen también las conexiones a los tableros que contienen los elementos fusibles individuales, a las resistencias de descarga, a los bushings, etc.

- Uno o dos de esos paquetes forman generalmente el interior de una unidad capacitadora y se le rodeará con aislamiento externo al contenedor.

- Este paquete, casi completo, se coloca dentro del contenedor metálico, que después será equipado con las terminales y bushings. Un pequeño agujero en el contenedor será ahora la única entrada al interior de la unidad.

- La unidad es expuesta, a continuación, a un proceso de secado en vacío y con calor. Cuando este completamente seca, será llenada e impregnada con un líquido adecuado que, previo a este proceso de llenado, se ha tratado y probado separadamente.

- Después de eliminar la grasa y probar contra fugas, se llevan a cabo las pruebas eléctricas de rutina.

- Una vez pintados y equipados con abrazaderas o herrajes de conexión, placas con datos, etc., pueden también ser montadas en racks, las unidades quedan listas para embarque.

1.2.1 c. Pruebas y control.

De la lista de los parámetros de diseño y de los pasos de fabricación es obvio que para tener un buen capacitor de potencia, de uniforme y alta calidad, se debe mantener un diseño bien establecido, un buen control de materias primas, un proceso de fabricación estrictamente supervisado y un sistema de control y pruebas muy seguro.

El sistema tradicional para asegurar la calidad de las unidades de capacitores de potencia ha sido:

- Exponer cada unidad terminada a una secuencia de pruebas de rutina.
- Controlar el diseño de una unidad exponiendo algunas unidades a varias pruebas de tipo independiente.
- Exponer algunas unidades terminadas (muestras) a algunas pruebas especiales.

Recientemente se han agregado las medidas siguientes:

- Supervisión y control de todas las etapas de fabricación con un programa de aseguramiento de calidad.
- Exponer las unidades con defectos de diseño y/o a las unidades fabricadas de acuerdo a procesos diferentes a pruebas severas de resistencia para establecer los parámetros que tendrán en las diferentes condiciones de servicio.

La introducción de Programas de Aseguramiento de Calidad (PAC) y de pruebas de resistencia ha hecho disminuir la importancia de las pruebas de control de producción y también ha hecho posible evitar la repetición de (cuando menos algunas) pruebas tipo.

1.2.2 El propósito de las diferentes pruebas.

Como resultado de muchas décadas de experiencia, se han desarrollado las diferentes pruebas y medidas de control de calidad.

Las normas internacionales de IEC y de NEMA han logrado hacer que las pruebas de rutina y las pruebas tipo de capacitores sean más o menos uniformes en todo el mundo.

Para entender la necesidad de una prueba de resistencia y de un PAC, es necesario entender el propósito de las diferentes pruebas de rutina, pruebas tipo y pruebas de control de calidad.

Debe, de algún modo, quedar claramente establecido que, aún si cierta prueba de rutina o tipo sea de importancia o sin importancia, se llevará a cabo siempre la prueba que sea requerida en una norma nacional.

1.2.2 a. Pruebas de rutina.

Las pruebas eléctricas de rutina constan de la siguiente serie:

- Medición de bajo voltaje.
- Prueba de alto voltaje a través del dieléctrico.
- Prueba de voltaje de CA entre bushing y contenedor.
(solo en unidades que tienen el contenedor aislado).
- Medición de la resistencia de descarga.
- Medición de la capacitancia y del factor de pérdidas a voltaje nominal.

NOTA: Cada unidad es rutinariamente probada respecto a hermeticidad contra fugas, generalmente en un horno, durante algunas horas.

El propósito de esta serie de pruebas de rutina es:

-Descartar las unidades que tienen valores medidos fuera de los límites de tolerancia, o que no soportan los voltajes aplicados.

-Obtener la capacitancia individual y los valores del factor de pérdidas en cada unidad.

Algunos comentarios a las pruebas de rutina son:

1) Debido a la delgada hoja de relleno dieléctrico y a las grandes áreas aisladas se debe esperar un cierto porcentaje de falla por imperfecciones de fabricación y los puntos que al azar aparecen en el dieléctrico sólido.

El porcentaje de falla es un índice muy impreciso para juzgar la calidad de un diseño, del material y de la fabricación de una producción de unidades iguales. El probar firme y selectivamente durante la fabricación reducirá el índice de fallas en las pruebas de rutina que se reduciría también si la prueba de alto voltaje se hiciera con corriente alterna ($2.15 \times V_n$) en lugar de con corriente directa ($4.3 \times V_n$) que son usualmente las dos opciones normalizadas.

Habrá también menos unidades que fallen cuando éstas tengan un relleno grueso de dieléctrico y así un incremento de voltaje más alto. Tal dieléctrico será, sin embargo, más sensible a sobre voltajes, especialmente a temperaturas de operación bajas.

2) También, el factor de pérdidas medido en las pruebas de rutina, si no es extremadamente alto, en la mayoría de las veces es un criterio engañoso para la no aceptación de una unidad.

Esto se aplica especialmente a los capacitores "todos de película" y los de dieléctrico mezclado, que tienen un muy buen margen a la inestabilidad térmica o a temperaturas del dieléctrico para las que habrá riesgo de deterioro de los materiales.

Los valores del factor de pérdidas medido en las pruebas de rutina son, por otra parte, tan irregulares y altos, como los valores medidos en igualdad de condiciones después de 20 horas en servicio a voltaje nominal, (ver figura 1.7).

Todas las pérdidas se miden con voltaje nominal a temperaturas de $25 \pm 2^\circ \text{C}$ en el dieléctrico. El factor de pérdidas medido después de 20 horas de servicio ha sido marcado como 100% para cada unidad probada. Las pérdidas ohmicas (resistencias de descarga, fusibles internos y conectores internos) quedan incluidas en las pérdidas totales de la unidad.

La dificultad para medir valores de pérdidas del orden de 0.2 watts/KVAR (en capacitores "todos de película") también es una cosa que hay que tomar en cuenta.

Para obtener una precisión de ± 0.05 watts/kVAR se requiere el control perfecto de una muy completa calibración y de las condiciones de prueba.

3) En la serie normalizada de las pruebas de rutina, existe un detalle de falta de control de la rigidez de las conexiones internas.

1.2.2 b. Pruebas tipo (o prototipo)

Las pruebas tipo consisten en varias pruebas separadas, a que han de ser sometidas unidades de cada diseño diferente.

Las pruebas tipo son de acuerdo a IEC70:

- a) Determinación de pérdidas a temperaturas elevadas
- b) Prueba de estabilidad térmica
- c) Prueba de voltaje de CA seco y humedo entre terminales y contenedor (para unidades con contenedor aislado)
- d) Prueba de voltaje de impulso entre terminales y contenedor (para terminales con contenedor aislado)
- e) Prueba de descarga
- f) Prueba de ionización

Las unidades con fusibles internos deben exponerse, de acuerdo a la IEC593 a:

- g) Prueba de perforación de elemento

En principio, NEMA prescribe las mismas pruebas tipo sólo que las pruebas de estabilidad térmica y la de ionización se hagan en forma ligeramente diferente. NEMA tiene además dos pruebas:

- h) Prueba de caída de voltaje
- i) Prueba de resistencia dieléctrica

El propósito de las pruebas tipo es controlar que las unidades sean adecuadas para las condiciones de servicio especificadas.

COMENTARIOS A LAS PRUEBAS TIPO

1) La prueba de voltaje de CA y de voltaje de impulso revisa que el aislamiento al contenedor soporte los niveles de voltaje de prueba establecidos para la clase de aislamiento seleccionada.

2) La prueba de estabilidad térmica de acuerdo con IEC y con NEMA es de poca importancia para capacitores "todos de película" y de dieléctrico mezclado, que actualmente tienen un gran margen para inestabilidad térmica.

Durante las pruebas de resistencia, el diseño de la unidad será expuesto a esfuerzo medio más grande.

3) La medición de pérdidas a temperaturas elevadas (generalmente medidas al final de la prueba de estabilidad térmica) se puede usar solamente como verificación de que no se ha excedido el determinado nivel contractual de pérdidas máximas para esta condición específica o prueba.

4) La prueba de descarga es un control de que el diseño de la unidad soportará las fuerzas electromagnéticas que pueden ocurrir durante transitorios en servicio.

Nota: El nivel de voltaje de descarga de acuerdo a la edición nueva de IEC70 y de acuerdo a normas para fusibles internos de IEC593 se ha incrementado de $2.0 \times V_n$ a $2.5 \times V_n$ para unidades de alto voltaje (mayor a 660 volts).

5) La prueba de ionización o de descarga parcial casi no da información si se hace con un capacitor estandar debido al alto nivel de disturbio ambiental. Si la prueba se realiza en una unidad modelo pequeña, se obtendrá más información.

Nota 1: El concepto de una unidad modelo por esta prueba podría ser una unidad de tamaño estandar en la que sólo se conectan unos cuantos elementos.

Nota 2: Las presentes recomendaciones de IEC para la serie de pruebas y las pruebas requeridas están en estudio y posiblemente se cambien en un futuro próximo.

6) La prueba de caída de voltaje (NEMA) es de poco valor ya que la resistencia de descarga fué medida en la prueba de rutina.

7) La prueba de ajuste de voltaje de corriente directa (NEMA) a $6.25 \times V_n$ siempre quiere decir que existe una cierta probabilidad de perforación en una unidad que previamente solo ha sido probada a $4.3 \times V_n$ con CD, o probada a $2.5 \times V_n$ de CA. Ver figura 1.8.

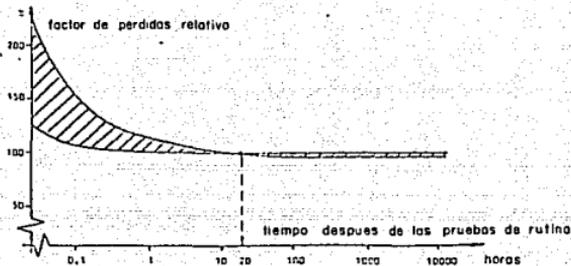
El diagrama indica que el riesgo de una perforación es en promedio alrededor de 7.5% cuando se prueban unidades a $6.25 \times V_n$ cuando éstas han pasado previamente la prueba de $4.3 \times V_n$.

Tal prueba no tiene ningún significado a menos que se le combine con un porcentaje de fallas permitido.

8) Las pruebas tipo para fusibles internos deben ser consideradas como necesarias de acuerdo a IEC593.

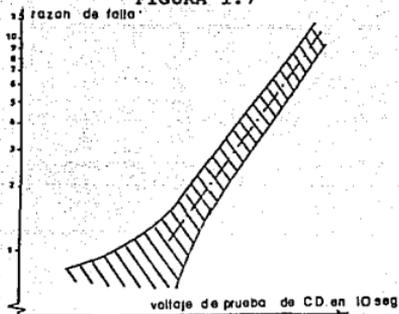
Nota: En la edición nueva de IEC70 se requiere que el fusible externo sea conectado en el circuito de potencia durante algunas de las pruebas tipo. Los fusibles externos deben ser probados de acuerdo a IEC549.

Cuando se usan los resultados de unas pruebas tipo como un criterio para la aceptación de una entrega, también se debe requerir que el control de la producción sea tal que todas las unidades se consideren idénticas.



Variación del factor de pérdidas con el tiempo en servicio para capacitores "todos de película"

FIGURA 1.7



Razón de falla como una función del voltaje de prueba de C.D. aplicado para unidades diseñadas y probadas con $4.3 \times V_n$ de C.D.

FIGURA 1.8

1.2.2 c. Pruebas de producción

La prueba de producción no está normalizada y generalmente se hace en unas cuantas unidades que han pasado las pruebas de rutina. Los resultados exitosos de tal prueba son frecuentemente utilizados para aceptar varias unidades idénticas producidas al mismo tiempo con las unidades probadas, es decir, las unidades pertenecen al mismo grupo o lote.

Como no existen normas la especificación para tales pruebas de grupo se basan en la experiencia de producción de cada fabricante y, si el cliente especifica algo, es con base en la experiencia de campo con unidades o bancos similares que, muy frecuentemente, han comprado a otros fabricantes.

Otro de los problemas, con esa prueba, es como definir un "grupo" o lote. Capacitores con datos idénticos, que pertenecen al mismo pedido pueden especialmente si el pedido es grande, ser producidos con material (películas, papel, impregnantes) proporcionados en diferentes envíos y algunas veces también de diferentes proveedores. Los capacitores se secan e impregnan en diferentes autoclaves durante un tiempo largo.

La definición más usada de un grupo es, sin embargo, una autoclave o algunas autoclaves que se usan simultáneamente.

Como sólo unas pocas unidades en un lote se pueden exponer a la prueba de grupo es esencial que el control de producción sea tal que todas las unidades que pertenecen a ese lote realmente sean fabricadas en forma uniforme. En este caso las pruebas de grupo pueden consistir en:

- Medición de pérdidas aproximadamente a 90 ° C de temperatura del dieléctrico de 2 unidades de cada autoclave (prueba no destructiva).

- Exposición de unas cuantas unidades por año a pruebas de resistencia (pruebas destructivas).

1.2.3 Programa de Aseguramiento de Calidad (PAC)

De lo que se ha establecido antes, es bastante obvio que es imposible entresacar por pruebas todas las posibilidades de falla durante servicio futuro para cada unidad capacitadora.

Para asegurar una calidad alta, uniforme y reducir al mínimo la probabilidad de futuras fallas durante el servicio, se debe mantener un estricto control de los materiales y del proceso de fabricación cuando se producen los capacitores de potencia.

También es muy importante que todas las unidades con las que se experimente sean de la misma uniforme calidad ya que los resultados de las pruebas a que se van a exponer estas unidades formarán la base para unidades de la producción y/o la base para la aceptación de un número de unidades.

Para asegurar que todas las pruebas y el control sean realizados y que los remedios finales sean con ejecución y con informes apropiados debe haber un programa de aseguramiento de calidad (PAC).

1.2.3 a. PAC estandar

Los fabricantes de capacitores tienen un PAC de acuerdo a normas y se caracteriza por:

i) Se divide en cuatro niveles que dependen de la complejidad del producto. Los factores de producción para determinar el nivel correcto de un cierto producto son:

- a) Complejidad del proceso de diseño
- b) Madurez del diseño
- c) Artículo o características de servicio

- d) Complejidad de fabricación
- e) Seguridad (en caso de falla)
- f) Economía (en caso de falla)

Cada producto será calificado de acuerdo a cada uno de estos seis factores de evaluación. La calificación total determina en cual de los cuatro niveles se encuentra el producto. El nivel 1 se usa para los productos más complejos (una planta generadora grande y completa) y el nivel 4 para los productos menos complejos (materia prima, resistencias producidas en cantidad, etc). Para la fabricación de unidades de capacitores de potencia y de bancos de capacitores de alto voltaje se aplican los niveles del PAC siguientes:

- El nivel 4 se usa para la materia y componentes
- El nivel 3 se usa para la fabricación de las unidades de capacitores y para la mayoría de los bancos de capacitores.
- El nivel 2 se usa para bancos muy grandes, en los que se incluye equipo de protección, interruptores, etc.

ii) Se requiere documentación respecto a lo siguiente:

- 1) Documentos del programa de calidad
- 2) Registros
- 3) Funciones del sistema

El número de artículos a cubrir en cada materia y/o lo extenso de cada artículo se reduce para productos menos complejos.

iii) El PAC da el sistema administrativo para asegurar que una prueba control se lleve a cabo y se registre en forma apropiada y dice como actuar en caso de que el equipo bajo prueba no se comporte como se espera.

iv) El PAC no especifica cuales pruebas o controles han de hacerse o llevarse a cabo para un cierto producto. Es enteramente responsabilidad del fabricante si no se especifica esto en un contrato.

v) El PAC especifica que todo el equipo de medición sea calibrado frecuentemente. La impedancia del instrumento o dispositivo determina la frecuencia de calibración.

vi) El PAC requiere también que los subcontratistas que entregan materia prima y componentes importantes sigan dicho programa y que se les haga auditoría técnica.

1.2.3.b Contenido del PAC

Un programa de aseguramiento de calidad para la fabricación de capacitores de potencia debe contener, como mínimo, lo siguiente:

i) Materia prima y componentes.

Para todas las compras de materiales deben utilizarse especificaciones escritas. Algunos materiales (película de polipropileno, hojas de aluminio, líquido impregnante, etc) requiere de especificaciones especiales. Para otros materiales (tornillos y tuercas estandar) se usan especificaciones normalizadas.

Deben existir instrucciones de como probar y aceptar los materiales a su recepción.

Las especificaciones e instrucciones también deben decir como transportar y almacenar estos materiales y como marcar los materiales rechazados y los aprobados.

Se deben hacer auditorias a los subcontratistas que entregan materiales importantes, como papel, película impregnante, etc.

ii) Fabricación.

Solo se debe permitir la entrada a la planta el material aprobado. Los parámetros de limpieza y de aire acondicionado para cada área de manufactura deben ser de control diario.

Se deben tener instrucciones de fabricación, no solamente para los procesos de fabricación importantes (bobinado, ensamblado de elemento, secado, impregnado, etc), sino también para otras actividades mas ordinarias (soldadura, pintura, etc), donde debe quedar claramente especificado tanto la distribución del sitio de trabajo como las herramientas que han de utilizarse.

En determinadas etapas de fabricación se deben ejercer controles probando todos los articulos (por ejemplo: probar el secado de un elemento) o por muestreo (por ejemplo: control de las conexiones soldadas). El porcentaje de muestreo se debe determinar de acuerdo a la complejidad e importancia del artículo revisado y de acuerdo a los resultados de otros controles ejercidos previamente.

El porcentaje de muestreo se debe incrementar cuando trabajen obreros nuevos en la producción.

Los controles también incluyen revisión si los instrumentos utilizados en el proceso y aquellos ajustes específicos utilizados (por ejemplo corriente y velocidad en las máquinas de soldar). Para los procesos de secado e impregnación, se debe tener por fuerza control de temperatura-tiempo y de vacío-tiempo. Se deben usar frecuentes puntos de revisión durante todo el

proceso y en el caso de que algún artículo no cumpla los requisitos en un punto cualquiera de revisión se deben ejecutar remedios preordenados.

El líquido impregnador se debe revisar primero en extensas pruebas de recepción de materiales y luego durante las diversas etapas de tratamiento del proceso tal como filtrado, desgasificación y adición de resinas epoxicas. Antes de cada carga de impregnante, se debe hacer una revisión final.

Todas las fallas y errores de fabricación y los resultados de las pruebas de rutina deben ser, de inmediato, revisadas, investigadas y evaluadas.

iii) Estadísticas.

Para controlar la calidad de la producción, la mayor parte de las pruebas del PAC, de las acciones de remedio, los reportes de las diferentes etapas de producción, con inclusión de las pruebas de rutina, se deben examinar a intervalos regulares. Esto hace tener control continuo de la calidad de todas las etapas de la producción e introducir inmediatamente cambios en una operación o un control más extenso.

Como un PAC nunca será de naturaleza estática, estas estadísticas también servirán de guías, independientemente de cuándo y cómo el PAC sea mejorado.

1.2.4 Pruebas de resistencia.

Durante los últimos 15 años, el diseño de las unidades capacitor se ha cambiado completamente debido a lo siguiente:

- Película como reemplazo del papel en el dieléctrico.
- Nuevos líquidos impregnantes.

Estas nuevas composiciones dielectricas han hecho posible incrementar el esfuerzo eléctrico a través del dieléctrico y también han dado factores de pérdidas más bajos que, juntos, han conducido al uso de densidades de potencia más altos y así más potencia por unidad capacitor.

Para poder introducir y entregar unidades de alta potencia, con alta probabilidad de larga vida sin disturbios, los diseños de capacitores deben ser expuestos a pruebas muy intensas llamadas pruebas de resistencia.

Es muy obvio que para recibir una respuesta de una prueba de resistencia, dentro de un tiempo razonable, el capacitor tiene que ser sometido a grandes esfuerzos. Es muy importante que al esfuerzo de prueba aplicado (voltaje, temperatura, etc) no se le permita causar cualquier fenómeno irreal en el capacitor, por ejemplo, un deterioro térmico del dieléctrico debido a temperaturas en un punto.

Por experiencia, tiene que ser necesariamente fundamentada la prueba a un capacitor en los siguientes dos aspectos para una larga expectativa de servicio.

-De ese modo el dieléctrico puede soportar un gran número de transitorios sin sufrir daño permanente. Debido a la naturaleza

de los dieléctricos impregnados estos requieren aguantar con mayor frecuencia interconectados con el servicio a bajas temperaturas.

-De este modo el dieléctrico no presenta deterioro durante una larga exposición a altos esfuerzos y temperatura cuando es sometido a sobrevoltajes transitorios.

1.2.4 a. Capacidad para soportar transitorios.

Cada vez que un capacitor paralelo se energiza aparece un transitorio de 1.7 a 1.9 veces el voltaje nominal. Este transitorio tiene normalmente una frecuencia de 5 a 15 veces la frecuencia de la red (50 a 100 veces, en caso de haber bancos en paralelo) y se amortiguará dentro del primer medio ciclo de la frecuencia de la red.

El voltaje transitorio aparecerá por lo tanto como un voltaje unipolar a través del dieléctrico que lo somete a esfuerzos. Como un capacitor normalmente deberá tener un pequeño voltaje residual remanente cuando se energiza, tales transitorios suceden, para la mayoría de los capacitores, con intervalos más bien grandes.

La mayoría de los dieléctricos se diseñan por razones económicas, en caso de que por determinada temperatura aparezcan descargas parciales cuando se aplica un voltaje de 1.8 veces el voltaje nominal. Esto es aceptable siempre y cuando el dieléctrico tenga la capacidad para restablecerse cuando se le exponga a un valor fijo de voltaje antes de que el próximo transitorio aparezca.

CAPITULO 2

LA APLICACION DE CAPACITORES EN DERIVACION

Introducción

Cuando se conectan capacitores en paralelo o derivación en un sistema eléctrico, forman una fuente estática de corriente reactiva. Esto se usa para complementar el sistema de generación, que no siempre puede suministrar prácticamente o económicamente, el total de la carga reactiva.

Teóricamente, toda la carga tanto real como reactiva debe ser proporcionada por el sistema de generación, aunque se reconoce que el alto voltaje requerido para mantener un alto flujo de VARS, incrementa las pérdidas e incrementa la capacidad requerida creando una situación intolerable tanto en la operación como en la economía.

Por esto los capacitores en derivación demuestran ser un elemento invaluable entre los equipos eléctricos, ya que son una fuente de corriente reactiva, la cual puede ser instalada cerca de la carga. Esto permite una apreciable reducción de la corriente en el sistema, que conduce a un incremento en el nivel de voltaje de la carga y a un decremento en las pérdidas en la línea, ya que se elimina la carga reactiva requerida por el sistema en un alto porcentaje.

2.1 Capacitor en derivación contra condensador síncrono.

En general, se podría obtener el mismo efecto con un condensador síncrono conectado en el bus de carga. Sin embargo, el tamaño económico de las máquinas síncronas prohíbe su uso cerca de las cargas reactivas a menos que las cargas sean grandes y altamente concentradas.

Una comparación entre el capacitor en derivación y el condensador síncrono se muestra en la tabla 2.1.

El uso de condensadores síncronos se ha reducido en forma importante en los últimos años ya que los costos/kVAR obtenidos por fuentes rotatorias ha ido aumentando y el costo/kVAR de los capacitores ha estado disminuyendo. Otras ventajas importantes de los capacitores en derivación se muestran en la tabla 2.1.

2.2 Localización en el sistema.

La ubicación óptima de un banco de capacitores en el sistema de potencia sólo se puede determinar con un análisis completo y exhaustivo del sistema de potencia, tanto desde el punto de vista económico como del de operación. Sin embargo, la mayoría de quienes planean el sistema, no buscan la aplicación óptima de los capacitores. Inicialmente, cuando una compañía requiere de compensación reactiva instalará bancos fijos o con interruptores en alimentadores de distribución. Los bancos de capacitores varían en tamaño desde 150 hasta 1800 kVAR y se montan en poste en bastidores prealambrados. Una instalación típica se muestra en la figura 2.2.

En donde se requieren bancos de capacitores de este tipo, pero es indeseable ubicarlos en la parte superior de un poste, componentes similares se montan en apoyos dentro de cajas metálicas como se muestra en la figura 2.3

En lugares donde la carga de una subestación de distribución esta suficientemente concentrada, tal como grandes edificios de oficinas o donde las cargas industriales emanan directamente de la subestación, se puede instalar un banco con interruptor en la barra colectora de la subestación. Estos pueden ser bancos de tipo interior o intemperie, véase la figura 2.4, y comúnmente varían en tamaño de 600 a 10800 KVAR, o aún más.

Tres cuartas partes de la carga reactiva de un sistema de potencia típico proviene de los requisitos de magnetización del cliente. El beneficio máximo de la aplicación de capacitores se obtendrá cuando la fuente reactiva se ubica tan cerca como sea posible de la carga reactiva. Esto no significa en forma categórica que todos los capacitores se deberán localizar en los alimentadores de distribución. El sistema de potencia mismo, en su equipo de generación, transformación, transmisión y distribución, crea una gran carga reactiva. En particular, el sistema de transmisión, operando a plena carga y a factores de potencia abajo de la unidad, puede en muchos casos usar compensación reactiva directamente al voltaje de transmisión, para:

- 1.- Compensar su propia carga reactiva.
2. Compensar en los circuitos de distribución los VARS acumulados de la carga.

La instalación de capacitores en los sistemas de distribución, tanto del tipo de poste como del tipo subestación es comúnmente el primer paso para elevar a la unidad el factor de potencia de un sistema eléctrico. Una vez que se alcanza la saturación a este nivel, determinado por el voltaje con baja carga y por economía, la instalación de capacitores para abastecer corriente reactiva se lleva al nivel de voltaje de transmisión y subtransmisión. La instalación de grandes bancos de capacitores de alto voltaje tale como la de la figura 2.5, comienzan a ser común en los sistemas eléctricos mexicanos, aunque el tiempo de ingeniería y las precauciones que acompañan a una aplicación de este tipo esta más comprometida que la requerida en los bancos de voltaje más bajo.

TABLA 2.1

FACTORES DE APLICACION	CONDENSADORES	CAPACITUR EN DERIVACION
Capacidad de voltaje	Requiere transformador arriba de 18 kV	Aplicable directamente a cualquier clase de voltaje
Capacidad KVA	Minimo tamaño economico 15000 KVAR	Disponible en unidades de 50 KVAR en adelante
Control	Control sin etapas completamente ajustable	Generalmente con desconexión en etapas grandes y discretas
VARS de salida	Varia inversamente con el voltaje terminal	Varia directamente con el cuadrado del voltaje terminal
Efecto sobre la regulación de voltaje	Regulación de voltaje instantáneo	Unidades con interrupción, proveen regulación retardada en etapas
Suministro de VARS por retardo	Suministro inherente hasta 50% de la capacidad	No suministra
Instalación	Complicada y costosa, su ubicacion algunas veces prohíbe su uso	Muy simple y adaptable, no presenta problemas de localización
Mantenimiento	Costoso como cualquier maquina rotatoria	Nada de mantenimiento
Protección contra fallas interna	Depende de los relevadores normales y del tamaño de la maquina	Fusibles individuales y protección de desbalance dependiendo del tamaño
Protección contra fallas externa	Interruptores y relevadores asociados con equipos sincronicos	No requiere
Función en emergencias del sistema y KVAR adicionales	Se obtiene KVAR adicionales por corto tiempo con excitacion creciente	La producción de KVAR varia con el cuadrado del voltaje del sistema
Corrección del parpadeo de luz	Costo generalmente alto para justificar una unidad pequeña, puede ser utilizado para corrección de grandes cargas	No se puede interrumpir en forma rapida para ser efectivo
Corrección del F.P.	Desafiado costoso para justificar su uso	El bajo costo de instalacion lo hace práctico
Ayuda para la estabilidad del sistema	Automáticamente ayuda al sistema durante oscilaciones por el suministro de VARS	La producción varia con el cuadrado del voltaje terminal

Como el costo/kVAR es más alto en los capacitores de baja tensión, la corrección del factor de potencia en la carga ha sido una parte relativamente pequeña del total de capacitores instalados. Sin embargo, los estudios económicos han indicado, que hay ciertas ubicaciones en donde las características de la carga y la capacidad liberada de transformador justificará el uso de unidades secundarias. Estos son generalmente capacitores monofásicos tipo poste conectados en la acometida.

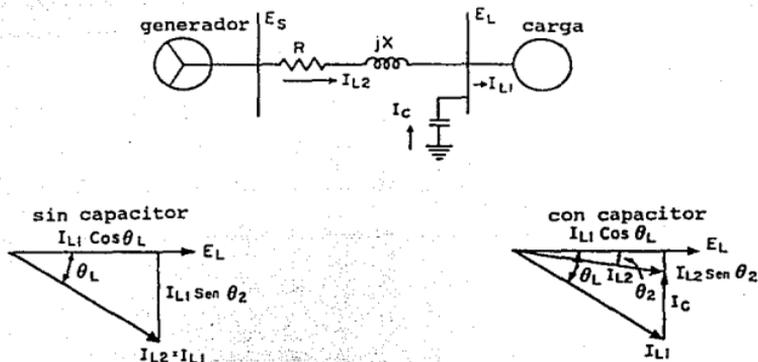


Diagrama vectorial donde se muestra el efecto del capacitor en derivación

FIGURA 2.1

Se ha usado un capacitor secundario diferente por algún tiempo en sistemas de redes de bajo voltaje, en donde los requisitos especiales de entradas cerradas subterráneas y la sumersión hacen imposible el uso de unidades normales. Además, las altas densidades de carga encontradas en redes secundarias

generalmente dictan el uso de bancos en la bóveda de transformadores de la red para el beneficio económico máximo.

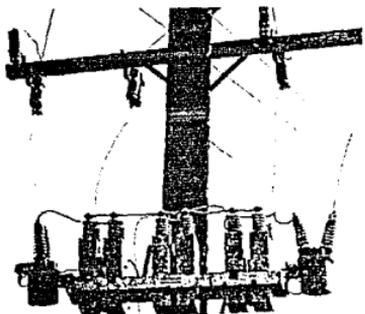


FIGURA 2.2

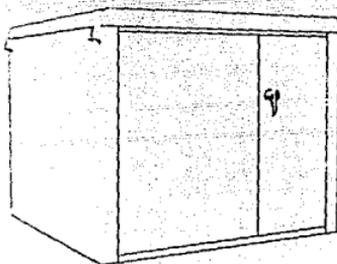


FIGURA 2.3

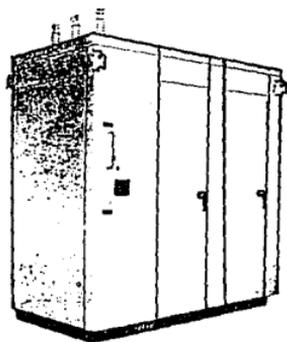


FIGURA 2.4



FIGURA 2.5

2.3 Efectos básicos de los capacitores en derivación.

Como se señaló en los párrafos anteriores, el capacitor en derivación es una fuente estática de corriente reactiva. La figura 2.1 muestra como se reduce la corriente reactiva requerida desde la fuente de generación, proporcionando a la carga reactiva una corriente proporcional al tamaño del capacitor. Todos los beneficios obtenidos con la instalación de capacitores en paralelo se derivan de este hecho básico. La planeación de sistemas eléctricos debe evaluar todos los efectos de los capacitores en derivación para determinar tanto si los capacitores son económicamente factibles, como en que parte del sistema se deberán ubicar, es por tanto necesario el completo entendimiento de este principio básico.

2.3.1 Reducción de corriente de línea.

La corriente reactiva suministrada por la fuente se reduce en proporción directa a la corriente del capacitor, sin embargo la corriente total de línea se reduce una cantidad considerablemente menor ya que tiene dos componentes, una de las cuales permanece fija. Inspeccionando de la figura 2.1 se verifica esto, con la suposición de que la carga permanece igual después de la instalación del capacitor.

La expresión para la corriente I_{L2} en la figura 2.1 es:

$$I_{L2} = I_{L1} \cos\theta_L - jI_{L1} \text{sen}\theta_L + jI_C \quad (1)$$

donde I_{L1} = corriente de línea sin capacitores

I_{L2} = corriente de línea con capacitores

$\cos\theta_L$ = factor de potencia inicial

Aún cuando la reducción en corriente total es importante al considerar la capacidad liberada, también es cierto que en muchos casos la mayor parte de la caída del voltaje del sistema es causado por la corriente reactiva. Las componentes de caída de voltaje en cualquier circuito se pueden expresar como sigue:

$$\%E_R = \frac{kVA * R \cos\theta_L}{10 * (kV)^2} \quad (2)$$

$$\%E_X = \frac{kVA * X \text{sen}\theta_L}{10 * (kV)^2} \quad (3)$$

donde R = resistencia de los circuitos de la fuente

X = reactancia de los circuitos de la fuente

Por inspección de las ecuaciones 2 y 3, se puede ver que la porción reactiva de la caída de voltaje es mayor que la caída resistiva cuando $X \text{sen}\theta_L > R \cos\theta_L$.

Puesto que para sistemas típicos de potencia, X varía de 2 a 15 veces R, es evidente que a la mayor parte de factores de potencia abajo del 90%, con tamaños normales de conductor, la caída reactiva excederá a la caída resistiva.

Prácticamente, esto significa que la reducción en la componente atrasada de la corriente, como lo realizado con capacitores en derivación, compensará en un gran porcentaje la caída de voltaje, mejorando con eso los niveles de voltaje del sistema, y extendiendo el rango del regulador de voltaje.

Una expresión por unidad para la corriente de línea después de agregar capacitores puede obtenerse de la ecuación 1 al dividir por I_{L1} .

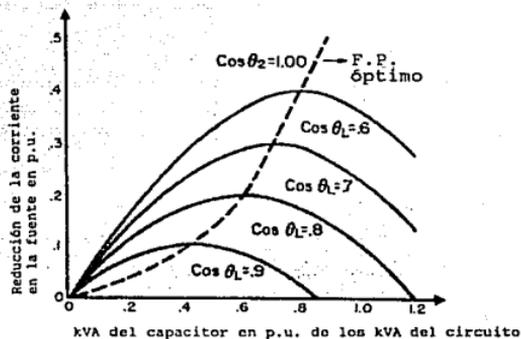
$$\text{entonces } \frac{I_{L2}}{I_{L1}} = \cos\theta_L - j (\text{sen}\theta_L + k\text{vac}) \quad (4)$$

$$\text{en donde } k\text{vac} = \frac{I_c}{I_{L1}} = \frac{k\text{VAR}}{k\text{VA}}$$

Si no se agrega carga después de que se instalan los capacitores, la reducción en por unidad en la corriente total de línea se puede obtener con la substracción de la ecuación 4 de la unidad, entonces:

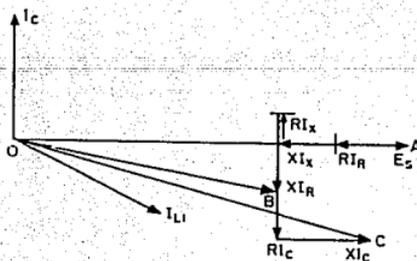
$$\left| \frac{I}{I_{L1}} \right|_{\text{p.u.}} = 1 - \left[\cos^2\theta_L + (\text{sen}\theta_L - k\text{vac})^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

Esta relación se grafica en la figura 2.6 en función del tamaño del banco y el factor de potencia original de la carga.



Reducción de la corriente de línea por efecto del capacitor

FIGURA 2.6



OA voltaje de la fuente
 OB voltaje de la carga sin capacitor
 OC voltaje de la carga con capacitor

FIGURA 2.7

Todos los beneficios de la instalación del capacitor en derivación son una función directa de la reducción de la corriente atrasada, sin embargo, los efectos en operación del sistema de potencia pueden variar, dependiendo de cómo se consideran. Los párrafos que siguen tratan brevemente cada uno de estos beneficios aleatorios y cómo ellos afectan la operación y la economía.

2.3.2 Incremento del nivel de voltaje en la carga.

Para el sistema radial simple mostrado en la figura 2.1, la expresión completa para caída de voltaje en la carga sería:

$$E_L = E_S - I Z_{L1} \quad (6)$$

$$E_L = E_S - I (R_{L1} \cos\theta + X_{L1} \sin\theta) - j I (X_{L1} \cos\theta - R_{L1} \sin\theta)$$

donde E_L = voltaje en la carga

E_S = voltaje en la fuente

R = resistencia de la línea y la fuente

X = reactancia de la línea y la fuente

otros símbolos como ya se han definido. En la ecuación 6 son:

$$I_R = I \cos\theta$$

$$I_X = I \sin\theta$$

entonces $E_L = E_S - I_R R - I_X X - j I_X R + j I_R X \quad (7)$

Esta relación se muestra en el diagrama de vectores de la figura 2.7 y E_L es el vector OB.

Si se agregan capacitores al circuito, esta ecuación para el voltaje en la carga se vuelve:

$$E_L = E_S - RI_R - XI_X - jXI_R + jRI_X - jRIC + XIC \quad (8)$$

En la figura 2.7 el voltaje en la carga con capacitores en derivación agregados al circuito es el vector OC. El voltaje en la carga aumenta pues la caída de voltaje en ese punto del circuito es menor, debido a la disminución de la corriente de línea. Una expresión simplificada del voltaje de carga en cualquier circuito es:

$$E_L = E_S - RI_R - XI_X + XIC \quad (9)$$

La ecuación 9 se obtiene de la ecuación 8 despreciando la caída de voltaje en cuadratura. Esto trae como resultado una solución más simple y suficientemente exacta para prácticamente todos los casos.

De la ecuación 9 se puede ver que si I_C es suficientemente grande, el efecto de las dos caídas, resistiva y reactiva, se puede cancelar. Como las componentes de la corriente de carga I_R e I_X son dependientes de la carga misma, durante períodos de baja carga XIC podría ser más grande que las dos caídas de voltaje XI_R y XI_X . Entonces la línea estaría sobrecompensada, y el factor de potencia resultante sería adelantado. Un factor de potencia adelantado como una condición aislada en un alimentador de distribución no es importante, sin embargo, como una condición

general en el sistema podría ser indeseable. La operación a factores de potencia adelantados disminuye el margen de estabilidad estática e incrementa las pérdidas por encima de lo obtenido a factor de potencia unitario. Las figuras 2.6 y 2.9 ilustran que la reducción en corriente y en pérdidas es máxima cuando el factor de potencia es unitario.

Por lo tanto, un capacitor fijo no cambia la regulación básica de un alimentador radial ya que el capacitor provoca un aumento en voltaje tanto a baja carga como a plena carga. Es necesario investigar la elevación del voltaje y los requerimientos de VAR del sistema durante periodos de baja carga para determinar si la condición es tolerable para el equipo eléctrico asociado. La conmutación del banco de capacitores puede ser necesaria en algunas instalaciones para aliviar una condición indeseable.

Como el aumento de voltaje en la carga es proporcional a X_{IC} , el porcentaje de elevación de voltaje en una instalación de capacitores es aproximadamente:

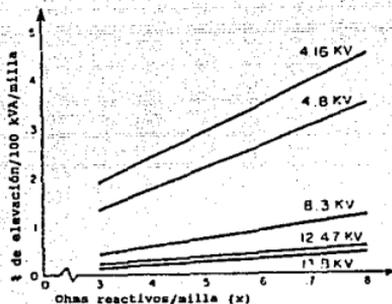
$$\% \text{ de elevación} = \frac{\text{kVAR} * X * d}{10 * (kV_{L-L})^2} \quad (10)$$

en donde X = reactancia desde la fuente hasta la instalación de capacitores en ohms/milla

kVAR = tamaño de banco de capacitores

d = millas de barra colectora regulada a instalación

kV_{L-L} = voltaje entre fases



Curvas típicas de elevación de voltaje para varios voltajes en sistemas de distribución.

FIGURA 2.8

Generalmente, esta fórmula se usa para encontrar la elevación de voltaje causada por un capacitor en una localización específica, que a su vez se sobrepone al perfil del voltaje del alimentador para obtener características netas de voltaje.

Las curvas de elevación de voltaje para voltajes típicos de distribución se ilustran en la figura 2.8

2.3.3 Reducción de pérdidas.

Las pérdidas en cualquier porción de un sistema de potencia son una función del cuadrado de la corriente y de la inductancia y resistencia. Las pérdidas se consideran comúnmente como dos componentes, la pérdida de potencia $I^2 R$ y la pérdida de var $I^2 X$. Ya que la instalación de capacitores en derivación reduce la componente reactiva de la corriente de línea, la reducción de pérdidas a causa de los capacitores es una función únicamente de la corriente reactiva. La componente real de corriente no necesita ser usada en el cálculo.

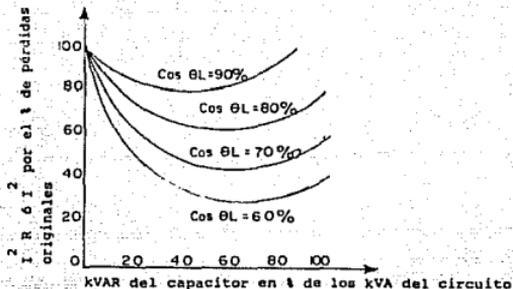
La reducción de pérdidas de potencia $I^2 R$ causada por agregar capacitores es:

$$\begin{aligned} LR_R &= (I)^2 R - (I - I_c)^2 R \\ &= 2I_c I R - (I_c)^2 R \end{aligned} \quad (11)$$

De igual modo, la pérdida de $I^2 X$ var es:

$$LR_X = 2I_c I X - (I_c)^2 X \quad (12)$$

en las ecuaciones 11 y 12, I_c es la corriente del capacitor, I es la corriente reactiva en el circuito antes de que se agreguen los capacitores, R es la resistencia del circuito y X es la reactancia del circuito. El efecto de capacitores en derivación sobre las pérdidas del sistema se grafican en la figura 2.9 como un por ciento de las pérdidas originales del circuito y como una función de por ciento de instalación de capacitores. Observe que las pérdidas son un mínimo cuando $kvac = \frac{sen\theta}{L}$.



Reducción de pérdidas por la adición de capacitores

FIGURA 2.9

2.3.4 Incremento del factor de potencia.

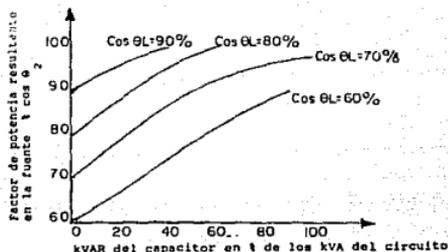
Ya que el capacitor se puede considerar un generador de VARS cualquier instalación de capacitores en derivación reduce la carga reactiva en la generación del sistema. Esto reduce la demanda de VARS de los generadores de la fuente permitiendo que el nivel de excitación se cambie de tal manera que las máquinas puedan operar más cerca del factor de potencia unitario si se desea. Para una indicación de como aumenta el factor de potencia de la fuente, ver la figura 2.10. El factor de potencia resultante de la fuente se gráfica como una función del factor de potencia inicial y de los capacitores instalados en por ciento de los kVA del circuito. Estas curvas se derivan en la base de que la carga en la fuente se mantiene constante después de que se agregan los capacitores. El factor de potencia resultante sería más alto si las cargas sobre el circuito se redujeran por la cantidad de kVAR agregados. Por ejemplo, si se agregan 500 kVAR a un circuito de 1000 kVAR que opera a 60% de factor de potencia,

el factor de potencia resultante, si no se agrega carga nueva, sería 89% . Si la carga en la fuente se mantiene constante agregando más carga al mismo factor de potencia original, el factor de potencia resultante de acuerdo con la figura 2.10 sería 81% .

2.3.5. Reducción de carga en la fuente.

El aumento en el factor de potencia de la fuente, debido a la reducción de la componente atrasada de la corriente, disminuye la carga de kVA de cada generador y/o circuito de la fuente. Esto puede aliviar una sobrecarga existente, retrasar la compra de equipo nuevo, o liberar la capacidad necesaria para satisfacer el crecimiento de carga en algunos circuitos. La reducción en la carga es proporcional a la disminución de la corriente de línea disminuida que se trato previamente, y se ilustró en la figura 2.6.

Si se consideran los beneficios de los capacitores debido a la capacidad liberada y la posibilidad resultante de incrementar la carga, la cantidad de capacitores necesaria para poder incrementar una carga es un valioso argumento. El aumento de carga permisible se calcula sobre la base de agregar carga al factor de potencia original hasta que los circuitos de la fuente quedan igualmente cargados como antes de agregar capacitores. Los kVAR necesarios por cada kVA de incremento de carga se gráficán en la figura 2.11 como una función del porciento de kVAR y el factor de potencia original.



Incremento en el F.P. de la fuente por efecto del capacitor en derivación

FIGURA 2.10

Si esta cantidad se multiplica por el costo por kVAR de capacitores instalados, el producto es el costo promedio de suministrar cada kVA adicional de carga. Este costo, despreciando otras ventajas del capacitor, se pueden comparar con otros métodos de agregar capacidad a los circuitos tales como recalibrar conductores, transformadores de más alta capacidad o aumentar la generación.

El costo por kVA de agregar transformadores para satisfacer el incremento de carga puede ser mucho más grande que el de agregar capacitores. Observe de la figura 2.11 que el número de kVAR capacitivos requeridos por kVA de capacidad para llevar carga incrementada crece notablemente entre más alto sea el factor de potencia original.

2.3.6 Reducción de la demanda en los puntos de intercambio.

El beneficio derivado de la instalación de capacitores en las líneas de balance y puntos de compra de energía es esencialmente como se ha descrito en los párrafos anteriores

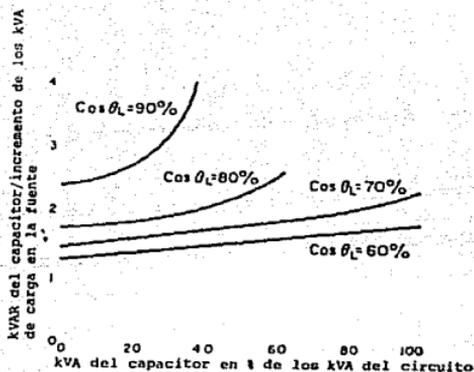
excepto que es de naturaleza completamente económica. El costo de la potencia comprada se basa comúnmente en un cargo por demanda de los kVA requeridos, más cargos incrementados por potencia real.

Ya que los capacitores reducen la demanda de kVA a través de la línea de enlace, ocurrirá una reducción correspondiente en el costo de energía comprada. En algunos casos, se puede demostrar que es económica la corrección hasta un factor de potencia del 100% .

Relativamente pocos contratos de intercambio tienen cláusulas sobre el factor de potencia real, excepto en el caso de una gran planta industrial con generación propia, conectada a una empresa eléctrica de servicio público. Sin embargo, el beneficio económico que se va a ganar por conservar intercambio de VAR hasta un mínimo es generalmente muy aparente.

2.3.7 Reducción de la inversión en el sistema por kW de carga.

La empresa eléctrica típica llega a un costo por kilowatt de carga entregada considerando su inversión total en instalaciones del sistema y de propiedades, más el costo de producción. Si hubiera un método aceptado para obtener un costo por kVAR entregado, la reducción de la inversión del sistema por la instalación de capacitores podría compararse directamente. Desafortunadamente, muchas compañías eléctricas no le asignan costo al suministro de kVAR, otras derivan un costo relacionado con pérdidas del sistema y todavía otras usan un costo obtenido por pérdidas de excitación.



Incremento de la carga permisible debido a la adición de capacitores en derivación

FIGURA 2.11

Si los capacitores se instalan para liberar capacidad del sistema o mejorar condiciones de voltaje, se acepta generalmente que la reducción en la inversión total del sistema es una función directa de la relación de costo por kVA para diferentes métodos de obtener los mismos resultados.

Como se trató previamente, el aumento en el factor de potencia de la fuente puede permitir incremento de carga en los generadores. Un método práctico de determinar el efecto en la inversión del sistema es considerar este beneficio como una inversión diferida para la infraestructura del sistema.

2.4 Cálculo y evaluación de los beneficios económicos de capacitores en derivación.

En la instalación de capacitores en derivación en los sistemas de empresas eléctricas, el ingeniero que planea el

servicio de la empresa eléctrica, como en el caso de cualquier otra adición de equipo, debe justificar la compra del mismo. Inicialmente, la justificación de los capacitores se consideró primariamente sobre la base de capacidad liberada en alimentadores, más alguna compensación por la reducción de pérdidas de alimentadores. Se sintió generalmente que la corrección arriba de 90% no era práctica.

Estudios recientes indican que además de considerar los mismos factores, los de capacidad liberada en pérdidas y la reducción de pérdidas en los alimentadores, el ingeniero deberá considerar la reducción de pérdidas de $I^2 X$, la reducción de pérdidas en el equipo de generación y transmisión, y la reducción de los costos de inversión del sistema.

Estos estudios también enfatizan otro factor que se ha vuelto importante en la comparación económica, o sea la ubicación del banco de capacitores con respecto al sistema en general más que su posición en el alimentador individual. Se puede llegar a resultados considerablemente diferentes dependiendo de que el capacitor se instale en el secundario del transformador de distribución, o en las barras de la subestación. Estos factores son los que se consideran ahora además de los otros al hacer la comparación económica.

Debido a que el costo por kVA en capacitores es menor comparado con los costos por kVA de equipo de generación, transmisión y distribución, la teoría generalmente reconocida de que la corrección del factor de potencia por arriba del 90% no era económica, ha quedado obsoleta.

El estudio de cualquier empresa eléctrica particular se debe basar en el sistema como un todo y no como una sección particular. La eficiencia total de operación depende de que cada porción del sistema opere con un factor de potencia tan cercano a la unidad como sea posible. La determinación de la ubicación de las unidades es una derivación económica, y uno debe considerar que la eficiencia del sistema se debe comparar junto con la efectividad del capacitor al determinar su ubicación relativa.

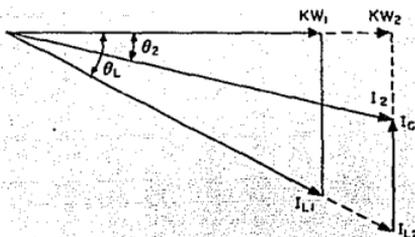


Diagrama vectorial para circuitos limitados en voltaje
FIGURA 2.12

Hay cuatro criterios en los cuales las comparaciones económicas se basan, e involucran capacitores en derivación. Y son los siguientes:

- 1.- Capacidad liberada en sistemas y equipo.
- 2.- Reducción de pérdidas en sistema y equipo.
- 3.- Incremento en la facturación por voltaje secundario más alto.
- 4.- Ganancia de capital por reducción de la inversión del sistema.

Cada uno de los criterios anteriores se puede aplicar varias veces en cualquier estudio económico simple. La fórmula exacta usada y el grado hasta el cual se lleva a cabo el estudio esta

dictada por la localización propuesta de los capacitores en el sistema de la empresa eléctrica.

2.4.1 Capacidad liberada en sistema y equipo.

La capacidad de soportar carga del equipo de transmisión y distribución está limitada en algunos casos por la caída de voltaje, este es el factor limitante en las cargas del alimentador de distribución y ocasionalmente la capacidad de la línea de transmisión está determinada por la caída máxima del voltaje. Los equipos tales como generadores y transformadores están limitados por su capacidad térmica, y todo beneficio que se va a ganar por la instalación de capacitores en derivación se debería considerar sobre esta base.

2.4.2 Limitación de la caída de voltaje.

Cuando la corriente de carga reactiva es suministrada por capacitores en vez de una fuente inductiva, hemos demostrado, como un efecto fundamental, que el voltaje en el lado de la carga es más alto que sin los capacitores. Es más alto por una cantidad que es igual a la inductancia de la fuente multiplicada por la corriente de carga suministrada por el capacitor. Es claro entonces, que si la carga conectada está limitada por la caída de voltaje, se puede tolerar una carga más grande si se aplican capacitores en derivación, que reducen la caída de voltaje en la línea. Para determinar la capacidad liberada obtenida por la suma de capacitores en derivación, se debe considerar el aumento permisible en cargas de kW como la capacidad liberada. El cálculo se basa en la suposición de que la caída de voltaje después de la

instalación del capacitor debe ser la misma que antes de agregar los capacitores.

Si el voltaje es constante, kW y kVA son directamente proporcionales a la corriente y por lo tanto, en por unidad, se consideran iguales a la corriente. Por la figura 2.12

$$I_c = kVAR_{cap} = kW \cdot \left(\frac{\tan \theta_2 - \tan \theta_1}{L} \right) \quad (13)$$

donde I_c = corriente del capacitor en derivación.

I_1 = corriente de carga inicial.
 L_1

I_2 = corriente de carga final.
 L_2

I = corriente final de la fuente.
 L

Otros símbolos del aumento de capacidad son:

$$\frac{kW_2 - kW_1}{2} = \frac{I_2 \cos \theta_2 - I_1 \cos \theta_1}{L_2 - L_1}$$

$$= 1 - \frac{I_2 \cos \theta_2}{L_2} - \frac{I_1 \cos \theta_1}{L_1} \quad (14)$$

Ya que la caída de voltaje después de agregar los capacitores debe ser igual a la caída original, las caídas de voltaje respectivas se pueden igualar como en la ecuación 15, omitiendo la caída reactiva.

$$\frac{I_2 (R \cos \theta_2 + X \sin \theta_2)}{L_2} = \frac{I_1 (R \cos \theta_1 + X \sin \theta_1)}{L_1} \quad (15)$$

por lo tanto

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{R \cos \theta_1 + X \sin \theta_1}{R \cos \theta_2 + X \sin \theta_2} \quad (16)$$

substituyendo en la ecuación 14

$$\frac{kW_2 - kW_1}{kW_2} = \frac{\tan \theta_1 - \tan \theta_2}{R/X + \tan \theta_1} \quad (17)$$

si la ecuación 13 se divide por $kW_2 - kW_1$

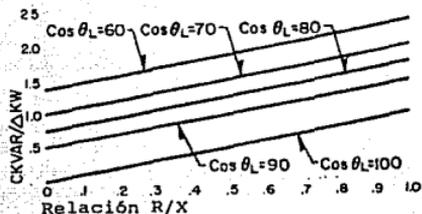
$$\frac{kVAR_{cap}}{kW_2 - kW_1} = \frac{kW_2}{L} (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (18)$$

Con la substitución en la ecuación 17 de la ecuación 18, se obtiene una expresión para kVAR de capacitores por aumento en kW.

$$\frac{kVAR_{cap}}{\Delta kW} = (R/X) + \tan \theta_L \quad (19)$$

Este análisis indica que los kW ganados, en donde los circuitos están limitados en voltaje, dependen solamente del factor de potencia de la carga y de la relación de la resistencia del sistema.

La relación se grafica mejor con respecto a los kVAR de capacitor por ganancia en kW contra R/X para varios factores de potencia típicos. Esta familia de curvas se muestra en la figura 2.13.



Capacidad liberada en circuitos limitados en voltaje basada en la relación R/X del sistema

FIGURA 2.13

2.4.3 Limitación de capacidad térmica

Para determinar la capacidad liberada cuando la capacidad térmica es el factor que la limita, se puede tomar una solución diferente. En este caso se aumenta la corriente de línea o los kVA después de agregar capacitores al valor supuesto antes de la instalación de los mismos.

Los kVA adicionales necesarios para cargar los circuitos de la fuente y llevarlos de nuevo a la carga original, son la capacidad ganada a causa del efecto de los capacitores en derivación.

En la derivación de una expresión para el aumento en kVA o capacidad liberada, se supone que la carga adicional está al mismo ángulo θ_L del factor de potencia original. Esto puede ser pesimista, pero es más exacto que agregar carga al ángulo θ_L de factor de potencia resultante.

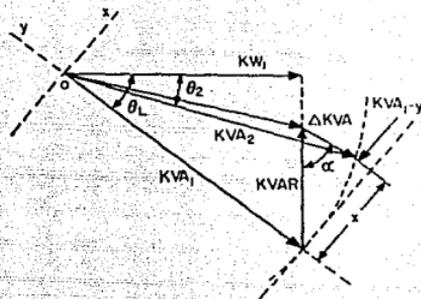
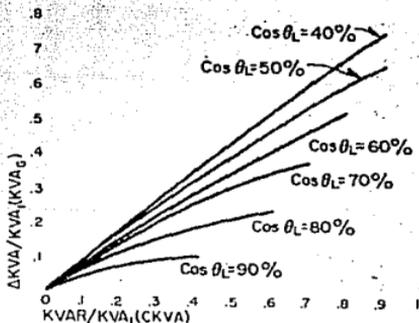


Diagrama vectorial para circuitos limitados en corriente

FIGURA 2.14



Capacidad liberada sobre circuitos limitados en corriente debido a la instalación del capacitor

FIGURA 2.15

El diagrama de vectores para esta condición se ilustra en la figura 2.14 en donde:

ΔkVA = carga instalada al factor de potencia original después de la instalación de capacitores.

kVAR = tamaño de banco de capacitores.

kVA₁ = carga original de la fuente.

kVA₂ = carga final de la fuente.

los otros símbolos como han sido definidos previamente.

Si kVA₁ se designa como el radio de un círculo con centro en O, y X e Y son las coordenadas de un punto en el círculo, la ecuación de ese círculo es:

$$X^2 + Y^2 = (kVA_1)^2 \quad (20)$$

de la figura 2.14,

$$\begin{aligned} X &= kVAR \operatorname{sen} \alpha \\ &= kVAR \cos \theta_L \end{aligned} \quad (21)$$

por sustitución de (21) en la ecuación (20)

$$\begin{aligned} (kVAR \cos \theta_L)^2 + Y^2 &= (kVA_1)^2 \\ &= \left[(kVA_1)^2 - (kVAR \cos \theta_L)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (22)$$

de la figura 2.14,

$$kVA = kVAR \operatorname{sen} \theta_L - (kVA_1 - Y) \quad (23)$$

por sustitución de (22) en la ecuación (23)

$$\begin{aligned} kVA &= kVAR \operatorname{sen} \theta_L - kVA_1 + \\ &\left[(kVA_1)^2 - (kVAR \cos \theta_L)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (24)$$

Esta expresión compleja de la ecuación (24) se puede simplificar con la conversión a cantidades en por unidad, tanto en ganancia en kVA de la fuente como en tamaño de banco de capacitores. Esto se logra con dividir la ecuación (24) por kVA. Entonces kVA_G y $kvac$ son valores en por unidad para la capacidad liberada y el capacitor instalado respectivamente.

$$kVA_G = kvac \frac{\cos \theta_L}{\cos \theta_G} - 1 + [1 - (kvac \cos \theta_L)^2]^{1/2} \quad (25)$$

Esta relación se grafica en la figura 2.15, y sólo requiere el valor en por unidad de capacitores instalados y el factor de potencia de la fuente original para obtener la capacidad liberada directamente.

$$\cos \theta_2 = \frac{kW + \Delta kW}{kVA_1} \quad (26)$$

$$\cos \theta_2 = \cos \theta_L (1 + kVA_G) \quad (27)$$

Las relaciones ilustradas por las ecuaciones (19) y (25) son útiles en la determinación de la capacidad liberada del circuito para la evaluación económica. La inspección de estas dos expresiones revela lo que sigue:

En los circuitos limitados de voltaje, la capacidad liberada:

- 1.- Depende del factor de potencia de la fuente original.
- 2.- Depende de la relación X/R de la fuente.
- 3.- Es independiente de las cargas del circuito.

En circuitos limitados de corriente, la capacidad liberada:

- 1.- Depende del factor de potencia de la fuente original.
- 2.- Es independiente de la relación X/R de la fuente.
- 3.- Depende de las cargas del circuito.

2.4.4 Reducción de pérdidas en sistema y equipo.

El cálculo de la reducción de pérdidas del sistema a causa de la instalación de capacitores en derivación se puede hacer directamente por las ecuaciones (11) y (12), en donde los resultados están expresados en watts monofásicos y vars.

Una expresión en por unidad para reducción de pérdidas se obtiene de estas mismas ecuaciones por sustitución de equivalentes como sigue:

$I_c = kVAR =$ tamaño de banco de capacitores

$I = kVA =$ carga inicial

1

$kvac =$ banco de capacitores en por unidad de carga inicial

$\theta =$ ángulo de factor de potencia de carga inicial

L

por la ecuación (11) ó (12),

$\Delta PL =$ reducción de carga pico en por unidad

$$= 2 kvac \text{ sen}\theta - (kvac)^2 \quad (28)$$

L

Esta expresión es válida para la reducción de pérdidas $I^2 R$ real o $I^2 X$ reactiva. Si se desea la reducción en pérdidas de pico, el tamaño del banco de capacitores en por unidad debería estar en la base de carga pico. Si se va a determinar la evaluación usando kWh, la corriente de carga o kVA debería incluir el factor de carga reactiva. Esto traería como resultado una modificación de la ecuación (28) como sigue:

$\Delta EL =$ reducción de pérdida de energía en por unidad

$$= (2 kvac \text{ sen}\theta) LF - (kvac)^2 \quad (29)$$

L

El uso de estas ecuaciones es válido únicamente si no hay cargas que varíen la componente reactiva de corriente en la sección que se está considerando. Por lo tanto, el cálculo de la reducción de pérdidas es sólo tan exacto como la extensión hasta la cual el sistema se secciona para los propósitos de cálculo.

Después del cálculo de la reducción de pérdidas, hay tres beneficios económicos que evaluar, estos son:

- 1.- Reducción de carga de kW de pico.
- 2.- Reducción de carga de kVAR de pico.
- 3.- Ahorros de energía a causa de reducción de pérdida de kWh.

La reducción de kW de carga pico (demanda) es un beneficio económico importante para las empresas eléctricas.

El valor asignado a ello varía de empresa a empresa, lo que depende de situaciones específicas. La evaluación más común es la de asignar el costo promedio por kW de generación del sistema aunque muchos usan el costo por kW de la última planta o la última unidad.

En forma inversa, la mayor parte de las empresas no dan crédito económico por las reducciones en la pérdida de $I^2 X$ o reducción de carga kVAR. En el pasado, el crédito máximo era el costo de capacitores necesarios para suministrar una cantidad equivalente de kVAR. Ha habido intentos por algunas empresas y fabricantes de llegar a un costo por kVAR generado, sin embargo, esto no se ha aceptado en forma universal. Si tal cifra de costo existe disponible, debería usarse.

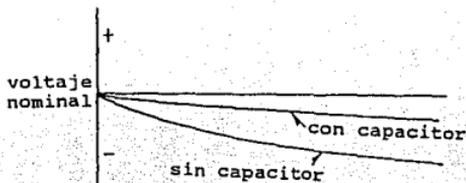
El tercer beneficio derivado de la reducción de pérdidas se evalúa fácilmente una vez que se hace el cálculo inicial. Para este análisis de costos, la mayor parte de las empresas usan el costo entregado por kW de energía. Los ahorros, independientemente del costo usado, son la reducción en por unidad calculada, multiplicada por la pérdida pico original, multiplicando por las horas para el período de tiempo considerado y multiplicando por el costo de la cuenta.

2.4.5 Aumento en los ingresos por voltaje elevado del sistema

La evaluación de voltajes elevados que resultan de la instalación de capacitores en derivación, tienen que ver con dos efectos. Ellos son:

1.- El incremento inmediato en voltaje del sistema en el punto de medición causada por un aumento proporcional en el registro de kWh.

2.- La pendiente reducida del perfil de voltaje de alimentador. Esta se ilustra en la figura 2.16.



Perfil de voltaje sobre alimentadores con carga distribuida

FIGURA 2.16

La relación de la ecuación (10) se puede usar para calcular la elevación de voltaje en un punto dado. Ya que este beneficio generalmente está relacionado con niveles de voltaje residencial, se puede suponer que la característica de carga será resistiva. Por lo tanto, el aumento en kW usados será proporcional al aumento en voltaje. Para mantener la evaluación, se usa generalmente la siguiente relación:

$$\Delta kW = 0.5\Delta E \quad (30)$$

en donde ambas cantidades se expresan en por ciento.

Esta expresión se puede convertir a kWh, con el uso de las horas totales en el período a considerar. La ganancia en kWh se considera comúnmente sobre una base anual, por lo tanto:

$$\Delta kWh = 8760 * 0.5\Delta E * kW * LF \quad (31)$$

La segunda condición de beneficio económico se obtiene gracias al banco fijo de capacitores en derivación ya que reduce el gradiente de voltaje a lo largo de un alimentador con carga distribuida, como se muestra en la figura 2.16. Efectivamente, ya que se reduce la caída de voltaje reactivo, la relación del voltaje de extremo que se recibe para el voltaje que se envía está más cerca de la unidad. Esto puede permitir la omisión de un regulador de voltaje de alimentador y cualquier reducción resultante en inversión de equipo se deberá acreditar a la instalación de los capacitores en derivación.

2.4.6 Resumen de la evaluación de capacitores en derivación.

Los principales beneficios económicos para las empresas eléctricas respecto a los capacitores en derivación se han tratado brevemente.

El planeador de sistemas tiene como opción todos los beneficios económicos de la lista, o puede usar sólo aquellos que se aplican a su caso específico.

Procedimiento sugerido:

Etapa 1: Obtenga datos de costos del sistema según la lista que sigue:

s = costo de generación del sistema/(kW o kVA)
 v = costo de generación del sistema/kVAR
 c = costo de pérdidas del sistema/kWH
 e = costo del dinero en por ciento (cargo anual)
 r = razón de energía medida/kWH

Etapa 2: Evalúe la ganancia en capacidad del sistema usando la ecuación (19) ó (25) cualquiera que sea aplicable:

ganancia (\$) = (Δ kW o Δ kVA)(s)

Etapa 3: Evalúe el efecto de reducción de pérdidas, de las ecuaciones (28) y (29). Y convierta la ganancia económica como sigue:

- 1.- Ganancia de reducción de carga pico kW (\$)

$$= (\Delta PL) (L) (s)$$
- 2.- Ganancia de reducción de carga pico kVAR (\$)

$$= (\Delta PL) (L) (v)$$
- 3.- Ganancia de reducción de pérdida de energía (\$/año)

$$= (\Delta E) (L) (8760) (c)$$

Etapa 4: Evalúe el efecto del voltaje más alto del sistema usando la ecuación (31). Ganancia (\$/año).

= (ΔE)(8760)(r)(kW de carga promedio)

Etapa 5: Ya que la instalación de capacitores en derivación puede diferir o eliminar inversiones en equipo o circuitos, la instalación de capacitores se deberá acreditar con ahorrar el costo de la reducción de la inversión del sistema.

ganancia (\$) = (reducción de la inversión) (e)

2.5 Requisitos de los capacitores en derivación para el sistema.

En el concepto original de la instalación de capacitores en derivación en los sistemas de potencia, no se consideraba el éxito o fracaso, era gobernado sólo por métodos empíricos. En forma bastante extraña, mientras el análisis de ingeniería extendido en el sistema, las comparaciones económicas y los programas de computadora han llegado a ser procedimientos recomendados en la aplicación de capacitores, estos nuevos métodos han verificado la exactitud básica de algunos preceptos y guías originales.

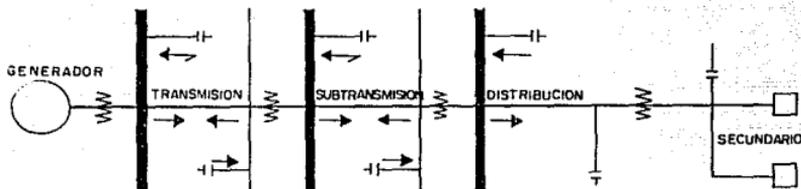
Toda la información procedente en esta guía de aplicación se ha ocupado en la investigación de los efectos fundamentales de capacitores en derivación y el cálculo de la ganancia económica o crédito establecidos por instalación de este tipo de compensación reactiva. La gente de planeación debe determinar, usando estos datos fundamentales en sus características del sistema, cuánta compensación reactiva se deberá comprar, y dónde se deberá instalar.

2.5.1 Estimación de la magnitud necesaria de reactivos del sistema.

Es necesario tener una estimación exacta de los requerimientos reactivos a lo largo y ancho del sistema para asegurar que no ocurra una distribución impropia de capacitores en derivación. Se debe considerar la carga reactiva en cada sección principal, siendo el objetivo el operar cada parte del sistema tan cerca del factor de potencia unitario como sea económica y prácticamente posible.

Los datos que se deben considerar para este análisis son idénticos a los necesarios para un estudio de flujo de carga en la computadora. Esto incluirá cosas tales como:

- 1.- Características de líneas de transmisión y subtransmisión.
- 2.- Tamaños de transformadores, variación de impedancias y conexiones disponibles.
- 3.- Características de generador y capacidad reactiva.
- 4.- Magnitud y ubicación de fuentes reactivas presentes, tales como motores, generadores síncronos y capacitores en derivación.
- 5.- Distribución típica de constantes y cargas de líneas de alimentadores.
- 6.- Factor de potencia y magnitud de la carga de conexiones principales.



Sistema convencional donde se muestran la localización típica de bancos de capacitores (las flechas indican la dirección del flujo de VAR para pérdidas mínimas del sistema)

FIGURA 2.17

Se deberán estudiar tendencias pasadas de requisitos reactivos particularmente con relación al crecimiento de la carga. Esto ayudará en la determinación de futuras necesidades de kVAR que se deberán predecir en las tendencias de la carga de pico del sistema. Se puede utilizar un estudio de flujo de carga analizando la red para determinar los requisitos reactivos, informando generalmente al planeador del sistema de cuántos kVAR se necesitan en las diversas secciones del mismo, con base en niveles de voltaje en la carga de pico. Este mismo estudio de cargas podrá decir específicamente cuánta carga reactiva puede ser provista por los generadores sin crear condiciones intolerables del voltaje del sistema.

Si no se puede hacer un estudio en computadora, las necesidades de capacitores se deben determinar de los mismos datos, con calcular cuántos kVAR son necesarios para elevar el factor de potencia de cada sección de operación hasta la unidad.

La manera más simple de llegar a esta cifra es resolver el sistema en un circuito radial equivalente.

Este circuito radial tendrá las características combinadas de cada sección suponiendo implícitamente que las características de circuitos y cargas en las diversas secciones del sistema son similares, y se pueden englobar juntas en la base común de voltaje. El factor de potencia de operación de cada sección del sistema es dependiente de la sección que sigue en la dirección de carga. En consecuencia, si se comienza la corrección en el extremo de carga, el factor de potencia de operación de cada sección anterior se debe ajustar hacia arriba antes de corregir hasta la unidad.

2.5.2 Ubicación de capacitores a lo largo del sistema.

Después de obtener varias cifras para el total de requisitos de las secciones en cuanto a los kVAR, es necesario proyectar un programa ordenado de instalación. Las ubicaciones de los capacitores en derivación dentro del sistema más comunes se muestran en la figura 2.17. Hay tres planes comunes para determinar cuál de estas ubicaciones se va a usar y la distribución de capacitores en cada una.

Estos son:

- 1.- Saturación de sistema de distribución.
- 2.- Comparación económica.
- 3.- Prioridad de emergencia.

1.- Saturación de sistema de distribución: es el primer método y el más común empleado por las empresas eléctricas al

aplicar capacitores. Básicamente, a medida que se acumula la necesidad de corrección reactiva, se instalan capacitores en derivación fijos en alimentadores de distribución hasta que el factor de potencia de operación se iguala o excede de la unidad en la carga pico. Para corregir a la unidad en la carga pico, se instalan bancos de capacitores con interruptores, ya sean montados en poste o en bancos conectados al bus principal de la subestación.

Este programa se continua cada año con una relación fija entre el crecimiento de carga total del sistema y los capacitores que se van a agregar al sistema de distribución. Se ha encontrado que la instalación a este nivel de voltaje no podría satisfacer los requisitos reactivos, entonces se considera a la instalación de un nivel de voltaje más alto que sigue. De esta manera, un sistema terminará arriba de un 75 u 85 % de sus capacitores en derivación al nivel del voltaje de distribución, y el resto en ubicaciones al azar en los circuitos de subtransmisión.

2.- La comparación económica comprende el uso de cifras para obtener el costo/kVAR de capacitores en derivación instalados para cada sección del sistema. Estas cifras se comparan luego con el costo/kVA del equipo de la generación lo cual rendirá los mismos beneficios del sistema tales como voltaje más alto, incremento de capacidad, y menores pérdidas.

Hay muchas formas de obtener y de comparar estas cifras de costos. Casi cada empresa eléctrica tiene un método a la medida de su operación y de su contabilidad del sistema. Una filosofía preferida es la de considerar que los capacitores en derivación

ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

se pueden instalar en una sección dada del sistema hasta que el costo instalado excede de la ganancia de los kVAR instalados como se menciona previamente la ganancia $\$/\text{kVAR}$ decrece a medida que aumenta el factor de potencia original. Por esto, a medida que se agregue cada kVAR, la relación de ganancia/costo decrecerá. Cuando la relación unitaria, se ha llegado al equilibrio económico de la instalación de capacitores en derivación. Ya que el costo $\$/\text{kVAR}$ variará entre secciones del sistema, esta comparación se debe hacer sobre una base de secciones, llegando de tal modo a una instalación óptima de capacitores para esa sección, ya sea de transmisión, subtransmisión, distribución o secundaria.

El procedimiento sugerido para hacer una comparación en esta forma es la siguiente:

Etapa 1: Obtenga el costo $\$/\text{kVAR}$ instalado para cada sección del sistema que está considerando.

Etapa 2: Usando el procedimiento delineado bajo el encabezado "Resumen de evaluación de beneficios de capacitores en derivación", calcule la ganancia $\$$ por kVAR para cada sección del sistema.

Etapa 3: Calcule la relación de $\$$ ganancia/ kVAR para costo $\$/\text{kVAR}$ y continúe instalando capacitores en una sección dada hasta que esta relación se vuelva la unidad.

Ya que la disminución en ganancia $\$/\text{kVAR}$ es una función del cambio en el factor de potencia de la fuente, es necesario recalcular el factor de potencia de la fuente después de que se agregan capacitores en derivación. La tabla 2.12 simplifica este

procedimiento pues el factor de potencia resultante para cualquier incremento de adición de capacitores en derivación se puede obtener siempre que se conozca el factor de potencia inicial.

Otra filosofía aceptada y demostrada de comparación económica se basa en el límite de instalación de capacitores para un costo mínimo del sistema. El análisis siguiente, correlaciona la cantidad de instalación de capacitores con inversión mínima de sistema, ciertamente una meta que vale la pena de la planeación del sistema. Se derivan las fórmulas para aplicación general para cualquier sección del sistema.

Las ecuaciones usadas son las siguientes:

$P = kW$ provistos a la carga
L

$U = kVA$ provistos a la carga
L

$U = kVA$ resultantes del sistema
R

$Q = kVAR$ provistos a la carga
L

$Q = kVAR$ provistos por el capacitor
C

$Q = kVAR$ que provee la fuente
S

$e =$ factor de potencia de la carga inicial
L

$e =$ factor de potencia resultante
2

R = costo anual/kVAR de capacitor

S = costo anual/kVA de circuitos de la fuente

C = costo total del sistema/kW de capacidad del sistema

La relación de vectores entre kW, kVAR y kVA totales en cualquier punto del sistema se muestra en la figura 2.18 para el sistema simplificado mostrado en la misma figura.

CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

- 1.- LOCALICE EL FACTOR DE POTENCIA ACTUAL
- 2.- LOCALICE EL FACTOR DE POTENCIA DESEADO
- 3.- EL VALOR DONDE CONFLUYEN AMBOS VALORES, ES EL QUE SE MULTIPLICA POR LA DEMANDA (EN KW) PARA OBTENER EL VALOR DEL CAPACITOR ADECUADO

F.P. presente	F.P. deseado																				
	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
50	.98	1.01	1.03	1.06	1.09	1.11	1.14	1.16	1.19	1.22	1.25	1.28	1.30	1.34	1.37	1.40	1.44	1.48	1.53	1.59	1.73
51	.94	.98	.99	1.01	1.04	1.07	1.09	1.12	1.15	1.17	1.20	1.23	1.26	1.29	1.32	1.36	1.39	1.43	1.48	1.54	1.69
52	.89	.92	.95	.97	1.00	1.02	1.05	1.08	1.10	1.13	1.16	1.19	1.21	1.25	1.28	1.31	1.35	1.39	1.44	1.50	1.64
53	.85	.88	.90	.93	.95	.98	1.01	1.03	1.06	1.09	1.12	1.14	1.17	1.20	1.24	1.27	1.31	1.35	1.40	1.46	1.60
54	.81	.83	.86	.89	.91	.94	.97	.99	1.02	1.05	1.07	1.10	1.13	1.16	1.20	1.23	1.27	1.31	1.36	1.42	1.56
55	.77	.79	.82	.85	.87	.90	.93	.95	.98	1.01	1.03	1.06	1.09	1.12	1.16	1.19	1.23	1.27	1.32	1.38	1.52
56	.73	.76	.78	.81	.83	.86	.89	.91	.97	1.00	1.02	1.05	1.08	1.12	1.15	1.18	1.23	1.28	1.34	1.48	
57	.69	.72	.74	.77	.80	.82	.85	.87	.90	.93	.96	.99	1.01	1.05	1.08	1.11	1.15	1.19	1.24	1.30	1.44
58	.65	.68	.71	.73	.76	.78	.81	.84	.86	.89	.92	.95	.98	1.01	1.04	1.08	1.11	1.15	1.20	1.26	1.40
59	.62	.64	.67	.70	.72	.75	.77	.80	.83	.86	.88	.91	.94	.97	1.00	1.04	1.08	1.12	1.16	1.23	1.37
60	.58	.61	.64	.66	.69	.71	.74	.77	.79	.82	.85	.88	.90	.94	.97	1.00	1.04	1.08	1.13	1.19	1.33
61	.55	.57	.60	.63	.65	.68	.71	.73	.76	.79	.81	.84	.87	.90	.94	.97	1.01	1.05	1.10	1.16	1.30
62	.51	.54	.57	.59	.62	.64	.67	.70	.72	.75	.78	.81	.84	.87	.90	.94	.97	1.01	1.06	1.12	1.26
63	.48	.51	.53	.56	.58	.61	.64	.67	.69	.72	.75	.78	.80	.84	.87	.90	.94	.98	1.03	1.09	1.23
64	.45	.48	.50	.53	.55	.58	.61	.63	.66	.69	.72	.74	.77	.80	.84	.87	.91	.95	1.00	1.06	1.20
65	.42	.44	.47	.50	.52	.55	.58	.60	.63	.66	.68	.71	.74	.77	.81	.84	.88	.92	.97	1.03	1.17
66	.39	.41	.44	.47	.49	.52	.54	.57	.60	.63	.65	.68	.71	.74	.77	.81	.85	.89	.93	1.00	1.14
67	.36	.38	.41	.44	.46	.49	.51	.54	.57	.60	.62	.65	.68	.71	.74	.78	.82	.86	.90	.97	1.11
68	.33	.35	.38	.41	.43	.46	.49	.51	.54	.57	.59	.62	.65	.68	.72	.75	.79	.83	.88	.94	1.08
69	.30	.32	.35	.38	.40	.43	.46	.48	.51	.54	.56	.59	.62	.65	.69	.72	.76	.80	.84	.91	1.05
70	.27	.30	.32	.35	.37	.40	.43	.45	.48	.51	.54	.56	.59	.62	.66	.69	.73	.77	.81	.88	1.02
71	.24	.27	.29	.32	.35	.37	.40	.42	.45	.48	.51	.54	.56	.60	.63	.66	.70	.74	.78	.85	.99
72	.21	.24	.26	.29	.32	.34	.37	.40	.42	.45	.48	.51	.53	.57	.60	.63	.67	.71	.75	.82	.96
73	.19	.21	.24	.26	.29	.32	.34	.37	.40	.42	.46	.50	.54	.57	.61	.64	.68	.73	.79	.84	.98
74	.16	.18	.21	.24	.26	.29	.32	.34	.37	.40	.42	.45	.48	.51	.55	.58	.62	.66	.70	.77	.91
75	.13	.16	.18	.21	.24	.26	.29	.31	.34	.37	.40	.43	.45	.49	.52	.55	.59	.63	.67	.74	.88
76	.10	.13	.16	.18	.21	.23	.26	.29	.31	.34	.37	.40	.43	.46	.49	.53	.56	.60	.65	.71	.85
77	.08	.10	.13	.16	.18	.21	.24	.26	.29	.32	.34	.37	.40	.43	.47	.50	.54	.58	.62	.69	.83
78	.05	.08	.10	.13	.16	.18	.21	.24	.26	.29	.32	.35	.37	.41	.44	.47	.51	.55	.59	.66	.80
79	.03	.05	.08	.10	.13	.16	.18	.21	.24	.26	.29	.32	.35	.38	.41	.45	.48	.52	.57	.63	.78
80	.00	.03	.05	.08	.10	.13	.16	.18	.21	.24	.27	.29	.32	.35	.39	.42	.46	.50	.54	.61	.75
81	.....	.00	.03	.05	.08	.10	.13	.16	.18	.21	.24	.27	.29	.33	.36	.39	.43	.47	.51	.58	.72
82	.....	.....	.00	.03	.05	.08	.10	.13	.16	.19	.21	.24	.27	.30	.33	.37	.41	.45	.49	.56	.70
83	.....	.....	.....	.00	.03	.05	.08	.10	.13	.16	.19	.22	.24	.28	.31	.34	.38	.42	.46	.53	.67
84	.....	.....	.....	.....	.00	.03	.05	.08	.11	.13	.16	.19	.22	.25	.28	.32	.35	.39	.44	.50	.65
85	.....	.....	.....	.....	.....	.00	.03	.05	.08	.11	.14	.16	.19	.22	.26	.29	.33	.37	.42	.48	.62
86	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.00	.03	.05	.08	.11	.14	.17	.20	.23	.26	.30	.34	.39	.45	.59
87	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.00	.03	.05	.08	.11	.14	.17	.20	.24	.27	.32	.36	.42	.57
88	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.00	.03	.05	.08	.11	.14	.18	.21	.25	.29	.34	.40	.54
89	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.00	.03	.05	.09	.12	.15	.18	.22	.26	.31	.37	.51
90	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.00	.03	.06	.09	.12	.15	.19	.23	.28	.34	.48
91	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.00	.03	.06	.09	.13	.16	.21	.25	.31	.46
92	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.00	.03	.06	.10	.13	.18	.23	.28	.43
93	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.00	.03	.07	.10	.14	.19	.25	.39
94	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.00	.03	.07	.11	.16	.22	.36
95	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.00	.04	.08	.12	.18	.33
96	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.00	.04	.09	.15	.29
97	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.00	.05	.11	.26
98	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.00	.06	.14
99	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.00	.10
100	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.00

TABLA 2.12

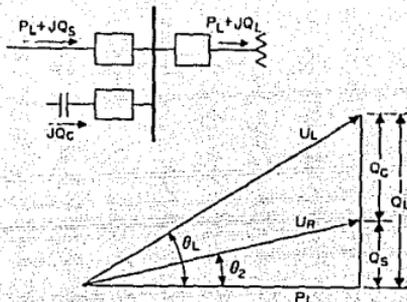


Diagrama vectorial para la derivación de la fórmula del costo mínimo

FIGURA 2.18

La potencia real requerida por la carga y el sistema es P_L y los VAR de la carga y del sistema va más allá de cualquier punto particular, es Q_L . Los VAR provistos parcialmente por los generadores y el resto por el capacitor. La parte de Q_L que viene de la fuente es Q_S y la porción provista por los capacitores es Q_C . El sistema y la carga van más allá del punto de instalación U_C de los capacitores y sacan kVA a un ángulo de factor de potencia inicial de θ_L de lo que la fuente en el punto U_R provee kVA a un ángulo de factor de potencia resultante θ_2 . El factor de potencia de la fuente es llamado resultante porque si los capacitores no estuvieran en el circuito, la fuente tendría que proveer todos lo reactivos y operar al mismo factor de potencia que la carga.

Los cargos de inversión de capital anual requeridos para proveer la carga, incluyendo costos de todas las secciones del sistema hasta la instalación de capacitores en términos por kW unitarios, se designa como C. Ya que el costo de cada una de las fuentes de energía se expresa en valores en por unidad, los cargos de inversión total se pueden mostrar como:

$$C * P_L = S * U_L + R * Q_C \quad (32)$$

Es posible convertir esta expresión con equivalentes trigonométricos de modo que el costo total sea con respecto a una cantidad variable sencilla $\cos\theta$. Esto es deseable ya que la mira final de cualquier instalación de capacitores es reducir la demanda reactiva de la fuente hasta un mínimo. Se deberá señalar que el factor de potencia de carga se considera fijo y es por tanto tratado como una constante en la derivación. Por eso:

$$C = \frac{\frac{P_L}{\cos^2\theta} + R * \frac{P_L}{L} (\tan^2\theta - \tan^2\theta)}{\frac{P_L}{L}} \quad (33)$$

o

$$C = \frac{S}{\cos^2\theta} + R (\tan^2\theta - \tan^2\theta) \quad (34)$$

Esta ecuación final para C es una expresión del costo anual combinado de los circuitos y capacitores de la fuente respecto al ángulo de factor de potencia resultante de la fuente. El ángulo

de factor de potencia obtenido cuando este costo anual es un mínimo, es una medida de la porción más económica entre capital invertido en circuitos de la fuente y en capacitores. El valor mínimo de C se puede obtener con tomar la primera derivada de C con respecto a θ y fijando esta derivada igual a cero como sigue:

$$\frac{dC}{d\theta} = \frac{S \sin \theta}{\cos^2 \theta} + R \left(-\frac{1}{\cos^2 \theta} \right) = 0 \quad (35)$$

por lo tanto $S \sin \theta - R = 0$

$$\text{o } \sin \theta = R/S \quad (36)$$

Este análisis matemático, en efecto, relaciona las definiciones monetarias expresadas originalmente para la relación de vectores mostrada en la figura 2.18, ya que:

$\cos \theta = [1 - \sin^2 \theta]^{1/2}$, el factor de potencia se puede expresar directamente como:

$$\cos \theta = [1 - (R/S)^2]^{1/2} \quad (37)$$

El factor de potencia determinado por esta fórmula, es el factor de potencia óptimo al que se puede llegar con aplicar capacitores en derivación al sistema de potencia eléctrica. En la figura 2.19 se grafican resultados típicos.

Con sustitución otra vez en la fórmula original para el costo total, se puede obtener una expresión para el costo mínimo.

$$C = [S - R] + R \tan \theta \quad (38)$$

Ya que estas fórmulas se han derivado sobre la base de usar un costo de sistema/kVA sólo para equipo limitado térmicamente, hay un ligero error en donde comprende porciones del sistema que tienen su capacidad limitada por la caída de voltaje.

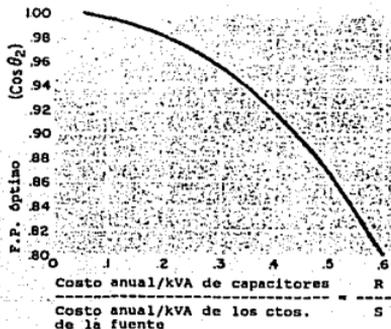


FIGURA 2.19

Usando el factor de potencia óptimo derivado en la ecuación (37) como el factor de potencia de operación final para cualquier sección del sistema, la cantidad óptima de instalación de capacitores en derivación puede ser determinada de la siguiente forma:

1.- Determine el costo \$/kW o el costo \$/kVA para equipo o líneas de la fuente. Esto se debe calcular para cada sección del sistema. Se recomienda que este costo excluya al generador. La razón para dejar fuera del cálculo al costo del generador es a causa de la naturaleza variable de este efecto. Muchas empresas eléctricas no asignarán costo alguno por generación de kVAR ya

que es ampliamente un asunto del factor de potencia estimado original y de la presión de hidrógeno. Si los capacitores resultan económicos sin estar incluido el costo del generador, el planeador del sistema está usando la solución más conservadora.

2.- Determine el costo \$/kVAR para capacitores en derivación instalados, también sobre una base de secciones.

3.- Usando la ecuación (37) o la figura 2.19, calcule el factor de potencia de operación óptimo para la sección del sistema que se está considerando.

4.-De la tabla 2.12, obtenga el factor de corrección apropiado. Cuando los kW de carga se multiplican por este factor, el valor de la instalación de capacitores óptima se obtiene para esta sección del sistema.

Si se aplica el mismo procedimiento a otras secciones del sistema, se debe recordar que el factor de potencia de operación de cualquier sección será modificada por cualquier instalación de capacitores entre ella y la carga.

Instalación primaria contra la instalación secundaria.

Algunos ingenieros de planeación de sistemas prefirieron considerar solamente capacitores secundarios sobre la base de compararlos con unidades primarias en vez de la aplicación total del sistema. Este método ahorra tiempo, ya que supone que los capacitores primarios ya se justifican económicamente. Ya que todos los beneficios que se agregan a la instalación primaria también se pueden acreditar a las unidades secundarias, se puede revisar rápidamente la justificación de unidades secundarias con

calcular las ganancias adicionales alcanzadas por la reducción de la corriente reactiva a través de los transformadores de distribución y los circuitos secundarios.

Podría parecer que los capacitores secundarios estarían siempre justificados pues ofrecen la reducción de pérdidas mayores, capacidad liberada más alta, e incremento mayor de elevación de voltaje directamente en el punto de medición. Sin embargo, económicamente, estos incrementos en los beneficios pueden ser completamente desequilibrados por el costo más alto/kVAR de unidades de capacitores en la clase 240 V a 600 V comparados con unidades de 2400 V a 7960 V. Además, las unidades individuales son necesariamente pequeñas a causa del tamaño de la carga reactiva que ellas están destinadas a corregir. Esto aumenta considerablemente el costo de instalación de \$/kVAR. Es posible hacer una comparación económica completa en este caso especial ya sea por el método delineado bajo comparación económica, sin embargo, un método de revisión rápido y práctico es usualmente preferido. Este procedimiento reconoce que la ventaja principal de capacitores secundarios sobre las unidades primarias es la capacidad liberada en el transformador de distribución. Por lo tanto, si la instalación secundaria se puede justificar sólo sobre esta base los otros beneficios meramente aumentan la ganancia económica. Sin embargo, no pueden mostrar una ventaja sobre las unidades primarias a causa de capacidad liberada de transformador, la ganancia adicional por otros beneficios generalmente no es suficiente para justificar mayor consideración.

Las curvas de la figura 2.20 se desarrollaron por el diagrama vectorial de la figura 2.14 que es representativo de la capacidad liberada en equipos limitados térmicamente. Si el voltaje es un factor determinante sería más exacta una comparación económica de etapa por etapa como se discutió previamente.

Para el caso general, es posible determinar si las unidades secundarias son económicas conociendo sólo el factor de potencia inicial, el factor de potencia óptimo deseado, la relación de costos de capacitores instalados secundarios respecto a costos primarios y costos de transformador de distribución/kVAR.

Si la relación permisible de kVAR (secundarios) respecto a KVAR (primarios) de acuerdo a las curvas de la figura 2.20 es justamente igual a la relación real, se podrían calcular otros beneficios económicos tales como reducción de pérdidas secundarias e incremento en los ingresos por aumento de voltaje secundario para hacer válida una decisión positiva.

3.- Prioridad de emergencia: Muchas instalaciones de capacitores están justificadas únicamente en su beneficio para el sistema durante condiciones de emergencia. Esto es particularmente cierto para grandes bancos de alto voltaje. Por ejemplo, un banco de capacitores grande podría instalarse en una barra colectora de 138 kV con dos líneas entrantes. El banco de capacitores recibiría energía la mayor parte del tiempo, sin embargo, cuando una tormenta de relámpago está en el área, estaría conectado al bus. Así, si los relevadores de una línea salen durante la tormenta, la línea que queda será capaz de aguantar la carga plena de la subestación, pues la corriente reactiva será proporcionada por el capacitor. Sin el capacitor,

el voltaje en el bus sería demasiado bajo y se podría perder la carga entera.

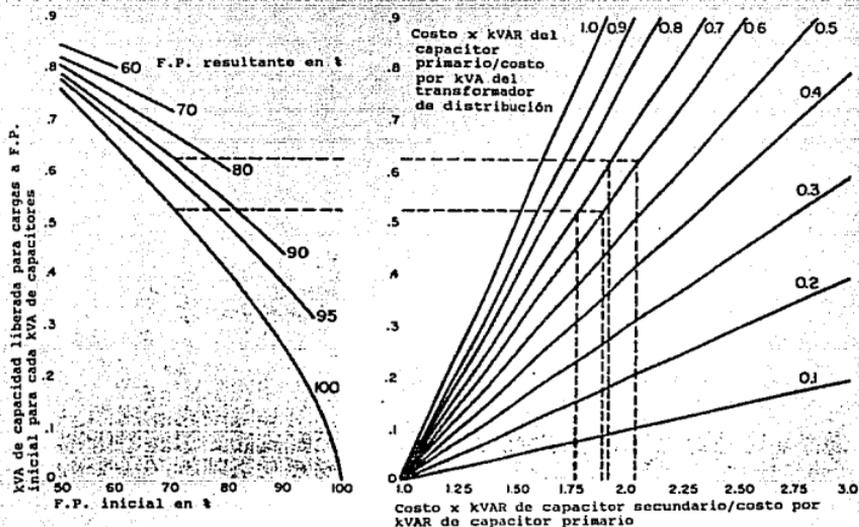
Otro ejemplo es una empresa eléctrica que encontró deseable compensar por las altas pérdidas reactivas en un transformador de interconexión que normalmente no lleva carga apreciable. Esto permitió el intercambio de potencia máximo con operar a factor de potencia unitario o a un valor cercano durante emergencias tales como la pérdida de un generador de gran capacidad en el sistema interconectado.

Los bancos de capacitores de alimentadores de distribución se instalan algunas veces estrictamente para mejorar regulación de voltaje. En esta aplicación no se compara económicamente y operacionalmente con reguladores de voltaje necesarios para proveer la misma función. Sólo recientemente, con la llegada de los programas de computadora exitosos para comparar métodos de regulación de voltaje, esta práctica se ha vuelto asunto ordinario. Previamente, la complejidad de los cálculos prohibía los estudios extendidos.

2.5.3 Localización de capacitores dentro de las secciones del sistema.

Las instalaciones de capacitores ilustradas en la figura 2.17 indican ubicaciones óptimas dentro de cada sección para tener menores pérdidas del sistema. Esto puede o no dictar la situación exacta de los bancos de capacitores dentro del sistema. Esto es particularmente cierto en los bancos de transmisión y

subtransmisión, en donde la disponibilidad de espacio de la subestación o condiciones de emergencia pueden ejercer influencia mayor en determinar la localización para menores pérdidas.



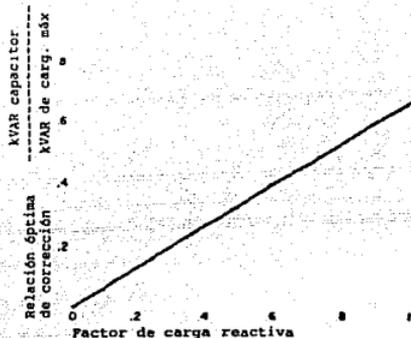
Comparación económica de la instalación de capacitor primario contra capacitor secundario

FIGURA 2.20

En las instalaciones secundarias sólo hay dos ubicaciones posibles, una de ellas es un poste del cual se pueden bajar varias acometidas de servicio como se muestra en la figura 2.5. La otra es directamente en la carga misma, hechas posiblemente a través de la disponibilidad de unidades de capacitores que son una parte integral del conjunto medidor de waththora.

La ubicación exacta de los bancos de capacitores designados para la instalación en alimentadores primarios de distribución, es, casi siempre, un problema con muchas variables sin solución. En general, el análisis para la ubicación óptima en un alimentador particular se basa en la reducción máxima de pérdidas. Sin embargo, el modelo de cargas variantes, los tamaños cambiantes de conductores y el efecto de usar capacitores fijos y con interruptores en los mismos alimentadores, hacen imposible mantener o desarrollar métodos de optimización que se aplican al caso general y considerar la aplicación sólo una vez, en el tiempo de la instalación inicial.

Una solución práctica a este problema, que se ha verificado en operación y en teoría, es instalar el banco de capacitores en un punto a $2/3$ de la distancia de la fuente al extremo del alimentador. La cantidad de kVAR correctivo y el factor de carga reactivo determinará si esto da máxima reducción de pérdidas en general, sin embargo, son satisfactorios los resultados obtenidos. El efecto total será un compromiso entre el tamaño económico de banco de capacitores que se determinó por considerar todos los beneficios, y la ubicación para menores pérdidas.



Variación de la instalación óptima de capacitores en derivación con factor de carga reactiva

FIGURA 2.21

Si la instalación se considera sólo sobre la base de menores pérdidas, se puede demostrar que el tamaño óptimo del banco de capacitores es 2/3 de los kVA de la carga y que la ubicación óptima es como se mencionó previamente. Los resultados de un estudio reciente muestran que esta conclusión es válida excepto donde el alimentador tiene un factor bajo de carga reactiva. La figura 2.21 indica como el tamaño óptimo del banco de capacitores varía con el factor de carga reactiva suponiendo que la instalación se va a hacer en un punto a 2/3 de la distancia entre la fuente y la carga.

La probabilidad de que condiciones de voltaje, normalización del equipo, o limitaciones de montaje obligarán a la instalación de más de un banco en un alimentador dado, sumando otra variable al problema del tamaño y ubicación óptimos.

Se sugieren los pasos siguientes para uso general en la determinación de requisitos de bancos de capacitores de

alimentador primario:

Etapa 1: La instalación óptima de capacitores en derivación para un alimentador particular se deberá determinar ya sea por el método de costo mínimo o para el límite descrito cuando la relación de ganancia \$/kVAR respecto a costo \$/kVAR es igual a la unidad. (Estos dos métodos se explicaron en el tema de comparación económica).

Etapa 2: El factor de carga reactiva, que es la relación de la carga reactiva promedio respecto a la carga reactiva máxima, deberá ser calculada. Usando la figura 2.21, se puede obtener el tamaño máximo del banco que se va a instalar en un punto a $2/3$ de distancia de la fuente a la carga. Si el total que se va a instalar que se obtiene de la etapa 1 es más grande de lo determinado por la figura 2.21, la aplicación se deberá hacer en dos o más bancos con otros bancos instalados hacia la fuente.

Etapa 3: Cuando se alcanza el límite de capacitores fijos, como se determinó antes, se deberán agregar capacitores con interruptor hasta que se alcance el límite económico. La ubicación de los capacitores con interruptor estará dictada principalmente por condiciones de voltaje, sin embargo, generalmente se deben ubicar en el último tercio del alimentador.

2.5.4 Conexión eléctrica de capacitores en derivación a los sistemas de potencia.

Al hacer la conexión real al sistema de potencia, se deben contestar varias preguntas relacionadas con las condiciones de operación. Tales decisiones como interrupción, conexión y puesta

a tierra, y protección del banco se deben resolver antes de la instalación, y en algunos casos antes de la compra.

2.5.5 Bancos de capacitores fijos o con interruptor.

Todos los bancos de capacitores se deben unir al sistema de potencia a través de un dispositivo de desconexión al menos capaz de interrumpir la corriente de los capacitores. En un banco con interruptor este dispositivo de desconexión es operado regularmente para beneficio del sistema, mientras que en un banco fijo hay solamente operación ocasional para mantenimiento de capacitores.

En los circuitos de distribución los bancos de capacitores fijos se instalan comúnmente hasta que se reúnen los requisitos reactivos de carga ligera.

Todos los capacitores adicionales se instalan con interruptores, generalmente montados en postes.

Los bancos de transmisión y subtransmisión, a causa del gran bloque de capacitores, son siempre con interruptores. El único problema es la cantidad máxima que se puede interrumpir en una sola operación. Esto, generalmente, está limitado por el equipo de interruptores más que por el cambio repentino de voltaje por inserción o remoción del banco de capacitores del sistema. Esto es particularmente cierto si el corte de carga se desconecta o los interruptores automáticos son usados para el medio de desconectar.

Se ha intentado poco la interrupción con unidades secundarias a causa de la economía comprendida. Se ha hecho

cierto uso de elementos bimetalicos para responder a la temperatura ambiente.

2.5.6 Dispositivos de interrupción

Los dispositivos de interrupción típicos basados en la ubicación del sistema estan en la siguiente lista:

a) Circuitos secundarios.

- 1.- Elementos bimetalicos
- 2.- Relevadores de bajo voltaje

b) Alimentadores de distribución primarios

- 1.- Interruptores en aceite sencillos o de tres polos
- 2.- Interruptores automáticos en aceite de tres polos
- 3.- Interruptores automáticos en aire de tres polos

c) Circuitos de transmisión o subtransmisión

- 1.- Interruptores automáticos en aceite de tres polos
- 2.- Interruptores en SF6 de un polo y en grupo
- 3.- Interruptores desconectores en vacío de un polo y en grupo

El costo del equipo de interrupción se debe incluir en el costo instalado por kVAR de capacitores en derivación. El costo relativamente alto, particularmente en las aplicaciones de alto voltaje, es a veces el factor determinante en el análisis económico. Sin embargo, los adelantos en el equipo de interrupción de bajo costo para capacitores está progresando rápidamente y en el futuro la ventaja económica de los grandes bancos se volvera más clara.

2.5.7 Control de dispositivos de interrupción

Si un banco de capacitores se va a interrumpir en forma regular, se debe seleccionar un método de control específico. Este esquema de control, ya que es la base en la cual el banco de capacitores será puesto y sacado del sistema, se debe hacer a la medida para que se adapte tan estrechamente como sea posible a los requisitos reactivos del sistema. Los parámetros típicos del sistema usados para el control de los dispositivos de interrupción de capacitores están en la lista que sigue:

- | | |
|---------------------------|-------------------------------|
| 1.- Interruptor de tiempo | 5.- Voltaje-corriente |
| 2.- Voltaje | 6.- Vars o corriente reactiva |
| 3.- Corriente | 7.- Temperatura |
| 4.- Voltaje-tiempo | 8.- Manual |

Un estudio reciente revela que el control con interruptor de tiempo se ha usado en la mayor parte de las instalaciones de alimentadores primarios, y que el control de voltaje es el método más común en los bancos de subestaciones de distribución. Los otros esquemas de control se usan hasta un grado que varia, comúnmente, en situaciones especiales. A medida que las empresas eléctricas investigan plenamente los requerimientos de var de sus sistemas, se vuelve claro que los esquemas de control más complejos tales como corriente-tiempo y watt-var se utilizaran más. Esto, sin discusión, puede traer como resultado un abastecimiento de var a la medida de los requisitos del sistema y generalmente un aumento en la ganancia para los beneficios contingentes.

El control de tiempo, sin embargo, tiene la ventaja de ser el menos costoso de instalar y además es independiente de la operación del sistema, y no requiere coordinación con otro equipo

de regulación de voltaje. La determinación si el control de tiempo se puede usar, requiere un estudio del ciclo de carga de los alimentadores representativos en el sistema. Es más efectivo en alimentadores radiales en donde el ciclo de carga es predecible y compatible. Los grandes bancos de capacitores en los buses de transmisión se han aplicado en forma efectiva usando control de interruptor de tiempo.

La interrupción de un banco de capacitores en respuesta a una variación de voltaje del sistema de distribución puede crear un problema de coordinación con los reguladores de voltaje de inducción o de escalón en la misma área. Sin embargo, el utilizar el voltaje como medio de interrupción es deseable ya que el elemento indicador es simple y fácilmente disponible. También, en muchas aplicaciones los bancos con control de voltaje traen como resultado ganancias debido a los beneficios de capacitores en derivación, pues el voltaje bajo es un resultado directo de corriente reactiva, que el capacitor reduce.

Para resolver el problema de coordinación, es necesaria la consideración de cualquier control regulador de voltaje asociado a dicha coordinación. Las operaciones excesivas ya sean del banco de capacitores o del regulador pueden ocurrir a causa de la fluctuación producida por la coordinación impropia entre los dos dispositivos. Cuando se usa el control de voltaje en un capacitor, se debe calcular por la ecuación (10). La variación del regulador de voltaje debe incluir el cambio del voltaje del alimentador de manera que la operación de uno, no causará la

operación del otro en la dirección opuesta. Si se alcanza la coordinación no ocurrirá interacción entre los dos dispositivos y el banco de capacitores estará en servicio el tiempo máximo permisible basado en los requisitos reactivos del sistema.

2.5.8 Conexión y puesta a tierra de bancos de capacitores.

Los bancos de capacitores en derivación se pueden conectar a un sistema de potencia de la misma manera que un transformador, ya que se pueden conectar en delta o en estrella. Si los bancos se conectan en estrella, pueden ponerse ya sea a tierra o no, aunque la mayor parte de los bancos de capacitores actuales se conectan en estrella. Existe todavía alguna controversia sobre si los bancos se deberían conectar a tierra o no. Los tres métodos básicos de conexión se muestran en la figura 2.22. El método usado en los sistemas de potencia dependerá del tipo del sistema (conectado o no conectado a tierra), prácticas sobre fusibles, economía, ubicación y posible interferencia inductiva. Generalmente, los grandes bancos en transmisión, subtransmisión y en buses de subestación de distribución se conectan en estrella. El tamaño del banco y el esquema de protección utilizado determina si el banco se pone a tierra o no.

En distribución los alimentadores con bancos de capacitores en derivación están conectados en estrella con el neutro a tierra. Las razones para esta preferencia son:

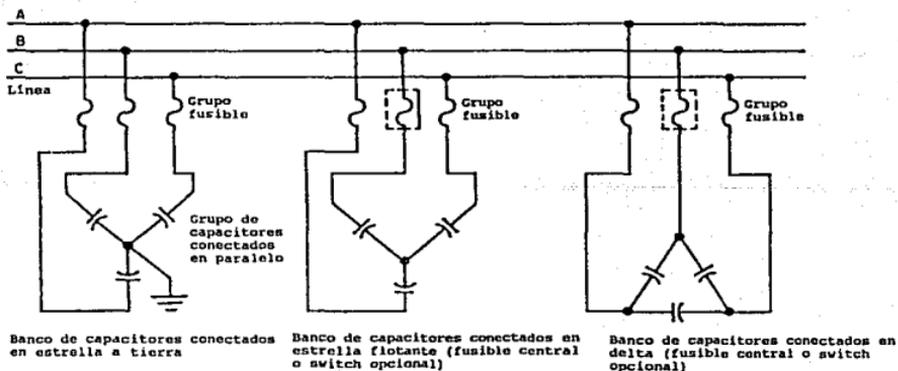
- 1.- Puesto que el neutro está a tierra, el bastidor de montaje y los tanques de capacitores se pueden poner a tierra, y la instalación se considera más segura desde el punto de vista de operación.

2.- Si una unidad de capacitores falla se presenta una corriente elevada de falla y ocurre la operación positiva de fusibles.

3.- Se considera que la instalación está segura si se deja un conductor abierto adelante del banco, ya que el lado de la carga del circuito abierto no estará arriba del potencial de tierra.

4.- El banco está semiprotegido de las ondas de relámpagos, ya que hay una trayectoria de impedancia baja a tierra.

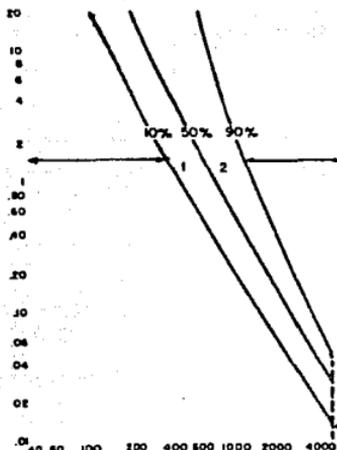
5.- La inversión del neutro o condiciones de resonancia a causa de interrupción monofásica entre la fuente y el banco, es menos probable de ocurrir.



Métodos de conexión de bancos de capacitores utilizados en el sistema

FIGURA 2.22

Muchas empresas eléctricas que usan bancos delta o estrella, conectados a sus sistemas pero no conectados a tierra, basan su práctica en las desventajas siguientes del banco en estrella conectado solidamente a tierra.



Características de ruptura de la caja de unidades de capacitores de 50 kVAR

FIGURA 2.23

DESVENTAJAS:

1.- Los bancos en estrella aterrizados pueden ocasionar disturbios en los esquemas de relevadores en los circuitos no puestos a tierra, puesto que proveen un circuito de impedancia a tierra.

2.- El banco de capacitores, si está aterrizado, provee una trayectoria para que fluyan corrientes armónicas y puede resultar una interferencia inductiva o de teléfono. También estas

corrientes armónicas pueden causar sobrecalentamiento del alambre neutro.

Tanto el banco delta como el estrella no puestos a tierra tienen la ventaja de que se necesitan solo dos interruptores para desenergizar el banco de capacitores. Así una empresa puede escoger este tipo de conexión.

En donde se esperan corrientes altas de falla en forma excesiva, algunas veces es necesario usar el banco en estrella sin poner a tierra, lo cual limita en forma inherente la corriente causada por una unidad de capacitores con falla. Esto está ilustrado por la figura 2.23. El uso de un banco conectado en estrella, sin estar puesto a tierra, limita la corriente a tres veces la nominal, elimina la necesidad de ir a fusibles limitadores de corriente costosos para resolver este problema.

Las prácticas más comunes respecto a conexión de bancos de capacitores en derivación en sistemas de potencia se enlistan a continuación.

1.- Las instalaciones de transmisión, subtransmisión y subestación de distribución se conectan usualmente en estrella, ya sea a tierra o no, lo que depende del tipo de protección.

2.- Para los sistemas en delta o no conectados a tierra, se usan comúnmente bancos conectados en delta, excepto donde las corrientes de falla son excesivas, entonces se necesitan bancos en estrella sin conexión a tierra.

3.- Para los sistemas de cuatro hilos, conectados sólidamente a tierra, se usan bancos en estrella conectados a tierra en la mayor parte de las ubicaciones. Si se esperan

corrientes de falla excesivas, se usan bancos en estrella sin conexión a tierra. La economía puede favorecer el uso de bancos en delta o en estrella, sin conexión a tierra, pues sólo se requieren dos interruptores.

2.6 Efectos contingentes de capacitores en derivación en los sistemas de potencia.

Hay varios problemas de operación que se pueden encontrar primariamente a causa de una instalación de capacitores en derivación. Estas condiciones se deben reconocer y corregir. La aplicación de unidades de capacitores en derivación, es todavía de las más simples y más directas de cualquier dispositivo eléctrico. Los problemas que surgen son generalmente menores y se pueden resolver comúnmente sin la perturbación de otros componentes del sistema o el beneficio final de la instalación de capacitores.

2.6.1 Interferencia de teléfono.

A causa de la presencia de equipo en un sistema eléctrico el cual puede generar corrientes armónicas, existe la posibilidad de un problema de coordinación inductiva entre circuitos de potencia y líneas de teléfonos adyacentes. Mientras que la unidad de capacitores misma no es una fuente de corrientes armónicas, un banco en estrella conectado y puesto a tierra puede complicar o aumentar considerablemente las corrientes armónicas y los voltajes asociados con cualquier porción particular del sistema.

Esto es por que el banco de capacitores crea una trayectoria menor de impedancia para corrientes armónicas, ya que su impedancia es inversamente proporcional a la frecuencia.

Con la mejoría en los cables y equipos telefónicos en los últimos años, si ocurriera un problema de este tipo, el método más común de resolverlo es volver a arreglar la conexión del banco de capacitores. En otras palabras, si el banco esta instalado como un banco con neutro aterrizado y la interferencia telefónica es incrementada en un área, una reconexión para bancos en estrella sin poner a tierra es recomendable y en caso de que una reconexión no sea posible, hay otros métodos de mejorar la situación tales como reactores auxiliares y cambios en el circuito telefónico o reubicación de capacitores.

2.6.2 Efecto de capacitores en derivación en la estabilidad del sistema.

Como se señaló anteriormente, la instalación de capacitores en derivación en un sistema de potencia causa aumento directo en el factor de potencia de operación de los generadores. La reducción de corriente reactiva suministrada por el generador reduce la magnitud de corriente para una carga dada de kW y voltaje terminal. La estabilidad estática de un juego dado de condiciones de carga es proporcional al voltaje en la línea de hueco o relleno en la curva de saturación del generador, correspondiente a la corriente de excitación. A medida que se

disminuye la corriente de excitación, decrece el voltaje en la línea de hueco o relleno del generador; por lo tanto, el límite de estabilidad estática es proporcional a la corriente de excitación del generador. Se ha observado, generalmente, en turbogeneradores que, si el factor de potencia de operación a plena carga se mantiene a 95% retrasado o abajo, no hay problema con inestabilidad estática. Las experiencias de operación también han indicado que algunos generadores pueden operar entre 95 y 100% del factor de potencia sin ningún problema aparente con la estabilidad del generador.

Cualquier generador aparte de su tipo estará afectado por la instalación de capacitores en derivación en el sistema a causa de la disminución natural en corriente de excitación. Puede ser necesario a medida que la operación de varios generadores en un sistema se acerca a la unidad, analizar la capacidad reactiva de cada generador y determinar en donde debería estar su factor de potencia de operación máximo, desde un punto de vista de estabilidad. La curva de capacidad estática reactiva de cada generador puede ser obtenida por la fabricación, y los límites de estabilidad estática para un generador pueden graficarse en la curva. Esto capacitará a los operarios a determinar el factor de potencia apropiado de operación y eliminar todos los problemas de estabilidad debidos a la instalación de capacitores en derivación.

2.6.3 Problemas de resonancia encontrados a los capacitores en derivación.

El capacitor como parámetro de circuito tiene la capacidad inherente para resonar a cierta frecuencia con las inductancias del circuito. Por consiguiente, bajo ciertas condiciones puede ocurrir resonancia con el capacitor en combinación con reactancias en derivación a tierra en el sistema o su equipo. Han ocurrido varios fenómenos de sobrevoltajes de oscilación en el pasado que pueden ser rastreados directamente con la presencia de bancos de capacitores en derivación en el sistema. Los problemas generalmente caen dentro de las siguientes categorías:

1.- Sobrevoltajes en el circuito primario con bancos de capacitores en derivación en circuitos de distribución conectados múltiplemente a tierra que usan transformadores de distribución.

2.- Los sobrevoltajes de oscilación que ocurren en el secundario de un transformador de distribución trifásico con capacitores en el primario.

3.- Sobrevoltajes resonantes directos que ocurren simplemente por el incidente de conectar el banco de capacitores al circuito.

Los sobrevoltajes de oscilación en los dos primeros casos ocurren cuando uno o dos conectores están abiertos y se establece un circuito resonante entre las reactancias magnetizadoras del transformador y la reactancia del capacitor a tierra.

2.6.4 Sobrevoltajes de resonancia directa.

Los fenómenos asociados con la tercera condición es un efecto resonante indeseable que causa altos voltajes cuando un capacitor está conectado físicamente a un sistema. Estos sobrevoltajes están con frecuencia en ubicaciones remotas del banco de capacitores, tal como un circuito de voltaje más bajo acoplado inductivamente a través de un transformador al circuito en el cual está ubicado el capacitor. Generalmente, el circuito de voltaje más bajo tiene un banco de capacitores eléctricamente cercano. Por ejemplo, se pueden observar sobrevoltajes de oscilación altos cerca de un capacitor secundario cuando se desconecta un banco de capacitores de alimentador primario. Esto se debe a un circuito resonante que se forma con capacitor secundario y el alimentador e inductancia de transformador entre los dos bancos de capacitores. Cuando se interrumpe el banco primario, ocurre una frecuencia de oscilación, lo que dispara el circuito resonante que causa el sobrevoltaje. Este tipo de dificultad puede traer como resultado la falla de fusible o de pararrayos en circuitos de voltaje más bajo y posible descarga eléctrica indeseable de bushings o falla de transformadores de instrumentos en el circuito de alto voltaje.

Las tres condiciones resonantes antes mencionadas son difíciles de reconocer y casi imposibles de predecir. Sólo después de que ocurre la dificultad se puede relacionar con los bancos de capacitores, puesto que debe prevalecer un juego peculiar de condiciones antes de que alguna resonancia directa o ferro-resonancia tal como la descrita pueda causar voltajes

anormales en el sistema. Si en el problema surgen, acciones correctivas tales como: cambiar el banco de capacitores; poner a tierra el transformador o el banco de capacitores, lo que depende de que tipo de dificultad se encuentra; remover dispositivos protectores monofásicos de entre un banco de capacitores y un transformador; o agregar una impedancia amortiguadora, tal como un reactor, removerán comúnmente el problema resonante en forma completa.

2.6.5 Operación de capacitores bajo condiciones anormales del sistema.

Los capacitores se proyectan para soportar un voltaje del 10% más del voltaje nominal y 60 ciclos. El valor nominal de kVAR de un capacitor particular a cualquier voltaje se encuentra de la expresión:

$$\text{kVAR} = \frac{E^2 * 2 * 3.1416 f C * 10^{-6}}{1000} \quad (39)$$

en donde

E = voltaje rms nominal

f = frecuencia, ciclos/segundo

C = capacitancia en microfarads

A medida que el voltaje sube, los kVAR aumentan con el cuadrado del voltaje. Esto aumenta la corriente del capacitor y por lo tanto, causa calentamiento prolongado y falla del capacitor, si la condición se prolonga. Por eso, es importante asegurar que ningún voltaje de 60 ciclos por arriba del 10% del voltaje nominal del capacitor se mantenga continuamente sobre la unidad de capacitores. El capacitor, sin embargo, sí tiene un

margen designado para condiciones de sobrevoltaje de emergencia como la tienen la mayor parte de aparatos eléctricos. Las tablas 2.3 y 2.4, tomadas de las normas de capacitores de potencia, indican el tiempo límite de sobrevoltaje y corrientes diversas, a los que la unidad de capacitor normal se puede sujetar sin pérdida de vida útil.

LIMITES DE SOBREVOLTAJES RECOMENDADOS PARA CAPACITORES DE POTENCIA	
DURACION	FACTOR DE MULTIPLICACION POR EL VOLTAJE NOMINAL RMS.
1/2 CICLOS	3.0
1 CICLOS	2.7
15 CICLOS	2.0
1 SEGUNDOS	1.75
15 SEGUNDOS	1.40
1 MINUTO	1.3
5 MINUTOS	1.2
30 MINUTOS	1.15

TABLA 2.3

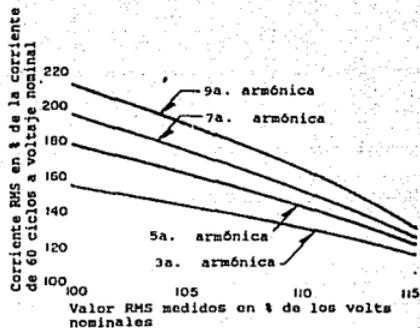
VOLTAJES TRANSITORIOS RECOMENDADOS Y LIMITE DE CORRIENTE PARA CAPACITORES DE POTENCIA		
NUMERO PROBABLE DE INTERRUPCIONES POR AÑO	VALORES PERMISIBLES TRANSITORIOS DE PICO MULTIPLICADO POR LOS RMS NOMINALES	
	VOLTAJE	CORRIENTE
4	5	1500
40	4	1150
400	3.4	800
4000	2.9	400

TABLA 2.4

En el diseño de capacitores para aplicación en circuitos de energía, se admite que la forma de onda del voltaje de operación no es una onda senoidal perfecta, y que los kVAR de operación del capacitor serán más altos a los valores nominales, por una cantidad proporcional a la magnitud de armónicas presentes en la onda de voltaje. Reconociendo, otra vez, que los generadores y transformadores son proveedores de voltajes armónicos, es necesario proyectar las unidades de capacitor individuales para soportar continuamente cierta cantidad de voltaje armónico.

Las unidades de capacitores, por eso, tienen un margen de voltaje térmico que es suficiente para tener en cuenta el sobrevoltaje a 60 ciclos mencionado previamente y cierta distorsión de forma de onda. La norma industrial de corriente indica que se debe tener un 35% de margen para dos cosas, voltaje fundamental excesivo a 60 ciclos y armónicas en combinación. Así, si el voltaje fundamental es más alto que el normal, el margen para armónicas se reduce. Un procedimiento básico de operación es limitar los sobrevoltajes a 60 ciclos para no más del 5% del voltaje nominal, de manera que el margen de sobrevoltaje de armónicas no se reduzca en forma excesiva.

La figura 2.24 indica los efectos de la forma de onda en corriente del capacitor y se puede usar para determinar la cantidad permisible de sobrevoltajes basados en el voltaje medido rms en por ciento del voltaje de régimen.



Límites de operación térmica de capacitores normalizados

FIGURA 2.24

El voltaje total rms y la corriente rms se pueden determinar en un circuito particular con un voltímetro y un amperímetro convencionales.

Con las curvas de la figura 2.24 es posible determinar el por ciento de corriente permisible rms sobre la nominal basada en KV permisibles del 35% .

CAPITULO 3

PROTECCION DE BANCOS DE CAPACITORES

Introducción

La protección de un banco de capacitores tipo subestación a menudo implica la aplicación de algunos recursos de protección: fusibles individuales, relevadores de desbalance, dispositivos contra arcos en los grupos, alarmas, disparos y protección contra fallas formando un esquema coordinado.

La filosofía usual es usar fusibles individuales que aíslan la (o las) unidad(es) que falla(n). La protección de desbalance, protegerá contra fallas dentro de un grupo serie y proveerá una exposición más amplia de las unidades capacitor a los sobrevoltajes resultantes y la protección contra falla desconectará el banco de capacitores del sistema, en el caso de un corto circuito entre fases o de fase a tierra dentro del banco.

Los diversos niveles de protección proporcionan un cierto grado de redundancia en la protección del banco de capacitores y el sistema. Estos niveles necesitan ser coordinados entre ellos mismos y considerando el funcionamiento esperado del sistema .

Es conveniente iniciar con el fusible individual, entonces se continúa con la protección de desbalance y finalmente con la protección contra fallas. Dando importancia a hacer mínimo el daño por la falla, se sugiere que la protección responda tan rápido como sea posible.

Por otro lado una falsa o mala operación puede originar la pérdida del banco cuya indisponibilidad es indeseable.

La protección más apropiada resulta de seleccionar el fusible individual más rápido y coordinando el resto de la protección con las características de estos fusibles y con las restricciones del sistema.

3.1 Fusible individual

Las dos principales consideraciones para la selección de fusibles individuales de los capacitores son:

- Fusible de expulsión contra fusible limitador de corriente.
- Características de operación continua y de fusión.

Los capacitores con fusible individual son usualmente divididos en fusibles de expulsión y fusibles limitadores de corriente. El fusible limitador de corriente es aquel que tiene la capacidad de limitar la cantidad de energía que le suministra el sistema y/o los capacitores en paralelo cuando se presente una falla interna.

Los fusibles de expulsión generalmente soportan la corriente de falla y la corriente de descarga, hasta encontrar un paso por cero de la corriente a frecuencia nominal antes de que el fusible se funda, esencialmente no limitan la corriente de descarga proporcionada por las unidades en paralelo ni la energía de entrada proporcionada por el sistema de potencia más allá de la que normalmente ocurre en medio ciclo de la corriente de falla a frecuencia nominal.

Los fusibles de expulsión son normalmente menos costosos que los fusibles limitadores de corriente y pueden ser utilizados si se cumplen estas tres consideraciones:

a) La corriente disponible por parte del sistema hacia una unidad fallada está dentro de la capacidad de corto circuito del fusible y dentro de la capacidad de soportar ruptura de la caja del capacitor para el primer medio ciclo de la corriente de falla.

b) La energía disponible en las unidades en paralelo está dentro de la capacidad de soportar ruptura de la caja de la unidad fallada, que generalmente es estimada en 10 kJ (El fusible puede ser capaz de descargar 30 kJ o más, sin dañarse: generalmente se aplica cuando se tienen valores de hasta 10 kJ debido a la posibilidad de ruptura de la caja de la unidad fallada).

c) Existe espacio suficiente para los gases de expulsión. Los fusibles de simple expulsión no son normalmente usados con bancos de capacitores instalados en compartimientos cerrados.

Limitando la aportación de la corriente de falla y de la energía de las unidades en paralelo hacia una unidad fallada, los fusibles limitadores de corriente, tienden a reducir la probabilidad de una situación de ruptura de la caja de una unidad fallada en comparación con el fusible de simple expulsión, no limitador de corriente.

3.1.1 Selección de las características de operación continua y de fusión de un fusible

El fusible individual necesita ser capaz de conducir en forma continua la corriente nominal del capacitor y las sobrecorrientes debidas a: tolerancias de fabricación, sobrevoltajes del sistema y los desbalances de voltaje en el capacitor así como corrientes armónicas.

Los factores de $1.25 \times I_{nom}$ para bancos no aterrizados y $1.35 \times I_{nom}$ para bancos aterrizados, usados para la aplicación de interruptores, son ordinariamente adecuados para especificar la corriente continua requerida para fusibles de capacitor individual. Estos factores generalmente proporcionan un margen bastante adecuado; las tolerancias por fabricación y por corrientes armónicas son generosas.

La selección de las características de fusión, son un acuerdo o negocio entre la posible situación de ruptura de una unidad fallada y una mala operación.

Una característica de fusión más rápida tiende a reducir la energía dentro de una unidad fallada, pero también incrementa la probabilidad de operación del fusible debido a transitorios.

Algunas malas operaciones están relacionadas probablemente con defectos del fusible, montaje o sujeción inadecuada, etc. Las malas operaciones en estos fusibles no se deben a la selección de la capacidad nominal del fusible.

Por muchos años las guías de aplicación de capacitores normalizadas sugirieron un factor de fusión de 1.65 para evitar malas operaciones.

Más recientemente la importancia de la seguridad y en el medio ambiente han hecho mínimo el margen contra las situaciones de ruptura de caja y uno de los cambios ha sido moverse hacia el uso de fusibles más rápidos. Los factores de seguridad contra fallas de operación y contra ruptura de la caja varían de usuario a usuario y aún entre banco y banco del mismo usuario. Algunos usuarios tienen evaluados los factores involucrados y especifican las características del fusible para uso individual por capacitor.

A menos que se especifique de otra forma, los fabricantes proporcionan, los fusibles individuales con un factor de fusión entre 1.35 y 1.65; con fusibles limitadores de corriente se tienen bajos factores de fusión. Se acostumbra solicitar bancos que tengan un factor de fusión tan bajos, como de 1.0 (observese que algunos tipos de fusibles de 10 amperes, pueden conducir hasta 15 amperes en forma continua en algunos fusibles de expulsión) y hasta 2.0 cuando se presentan armónicas.

Para bancos de capacitores de subestación utilizados en un sistema, los transitorios provocados por descargas atmosféricas, conexión de alumbrados, etc., no ha sido una causa importante de las malas operaciones de unidades con fusible individual. Las fallas con arco dentro de un banco de capacitores, que persisten, pueden causar malas operaciones. También, bajo ciertas condiciones, la falla de un capacitor puede provocar la operación de los fusibles cercanos, esta probabilidad es pequeña cuando los fusibles en paralelo en un grupo serie están acoplados uno con otro.

La ocasional sustitución de fusibles por fallas en las barras dentro de un banco de capacitores (raramente presentados) parece ser una pequeña penalización para el total de protección en el caso de ruptura.

La acción limitadora de corriente de un fusible en una unidad fallada tiende a limitar la capacidad de descarga a los fusibles y en las unidades adyacentes, reduciendo la probabilidad de operaciones afines particularmente cuando los fusibles son parecidos.

Donde se coordinan apropiadamente los fusibles con la protección de desbalance, el hacer los tiempos de fusión más rápidos, y que la protección de desbalance tenga menor tiempo de retardo, origina un disparo más rápido durante fallas dentro de un banco de capacitores. Esta reducción en el tiempo reduce el tiempo durante el cual se sujeta a los fusibles a los transitorios asociados con fallas de arqueo en la barra, reduciendo la probabilidad de malas operaciones.

Aparentemente no ha existido un incremento importante en malas operaciones durante el período en el que se redujo el factor de fusión desde el original 1.65 al presente 1.35, ni del cambio de fusibles limitadores de corriente del tipo T al tipo K. La experiencia a la fecha sugiere para la aplicación usual un factor de fusión de 1.35 como satisfactoria, y que una mejora posterior sea posible con factores de fusión ligeramente más bajos.

Cuando se instala un banco, es deseable revisar que todos los fusibles estén bien apretados y que no exista un abuso físico aparente. Parece que la mayoría de las operaciones ocurren durante los primeros días de la instalación.

El uso de diferentes valores nominales de fusibles limitadores de corriente en un grupo serie puede conducir a una operación "en solidaridad" de algunos de los fusibles más rápidos en el caso de una falla que involucre a uno de los fusibles más lentos.

3.2 Cálculo de bancos de capacitores

Algunas técnicas de cálculo prácticas son útiles para ajustar la protección de desbalance.

Considerando un sistema de unidades donde cada capacitor individual es una unidad de capacitancia, una unidad de impedancia y una unidad de conductancia. Por ejemplo, 15 capacitores en paralelo, con una unidad de voltaje aplicado puede conducir 15 unidades de corriente con dos unidades de voltaje, es decir conduce 30 unidades de corriente. De este modo la corriente a través de un grupo serie de capacitores es el producto del número de capacitores en paralelo por el de unidades de voltaje aplicado.

Para varios grupos serie, el producto del número de capacitores y de unidades de voltaje por cada grupo serie es igual a una constante (ya que la corriente es la misma en cada grupo serie). Por ejemplo, considere 2 grupos series de 10

capacitores cada uno, en los cuales un fusible ha operado, en uno de los dos grupos serie (figura 3.1). Entonces 10 unidades de voltaje, en los 9 capacitores, es un producto (corriente) de 90, y 9 unidades de voltaje en los 10 capacitores da 90 unidades de corriente. Nueve unidades de voltaje en 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 3.2), 9/19 de voltaje está en las 10 unidades y 10/19 está en las 9 unidades. Obsérvese que el voltaje promedio debe ser de 9.5 unidades, así que 10/19 representan 10/9.5 por unidad (p.u.) de voltaje, o alrededor del 5% de sobrevoltaje y que los 10 capacitores tengan solamente 9/9.5 de la corriente original, obteniéndose una reducción de corriente de aproximadamente 5% .

Esta técnica se puede extender a cualquier número de grupos serie (ver figura 3.3 para 3 grupos serie). En esta forma es útil para cálculos de bancos trifásicos conectados en estrella a tierra donde se puede considerar cada fase como un banco monofásico independiente.

Unidades capacitor (capacitores después de la operación del fusible)		Unidades de voltaje arbitrario	Capacitores por el producto de voltaje (unidades de corriente arbitraria)
9		10	90
10		9	90
		Total	19

FIGURA 3.1. Voltaje arbitrario y unidades de capacitancia para determinar el divisor de voltaje entre grupos serie

	Unidades de voltaje	Unidades de voltaje promedio	Voltaje en p.u.
9		10	$\frac{10}{9.5} = 1.05$
10		9	$\frac{9}{9.5} = .95$

corriente = $\frac{9}{9.5}$ x corriente original en 10 capacitores

FIGURA 3.2. Uso del voltaje arbitrario y unidades de capacitancia para determinar el voltaje y corriente del capacitor en por unidad.

Bancos en estrella aterrizada (3 grupos serie)

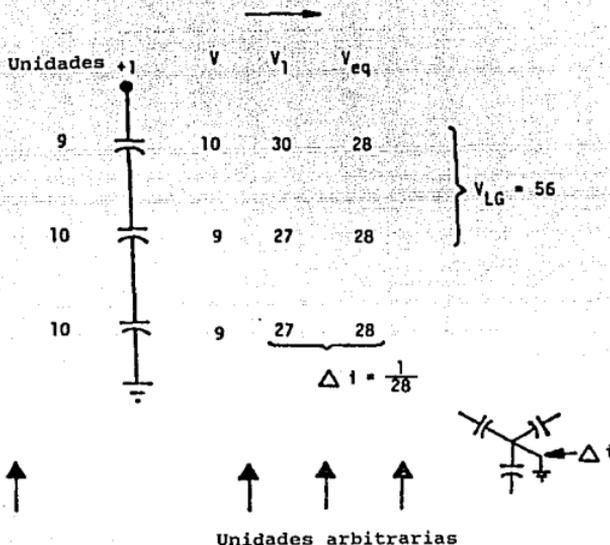


FIGURA 3.3. Unidades arbitrarias usadas para determinar el desbalance de voltaje y la reducción de corriente debidos a la operación del fusible

3.2.1 Bancos con estrella flotante

Para bancos trifásicos con estrella flotante, es conveniente considerar el instante en el ciclo eléctrico en el que la fase del banco de interés máximo está en el voltaje de pico positivo (1 p.u.). En ese instante, las otras 2 fases (ambas) están a $-1/2$ p.u. de voltaje (figura 3.4). Considere que la fase de mayor interés es la fase A. Para analizar ese instante las fases B y C pueden ser paraleleadas y conectadas a un voltaje de p.u. de $-1/2$ en un extremo y al neutro del capacitor en el otro. La

fase A se conecta al neutro a un valor en p.u. de voltaje de +1.

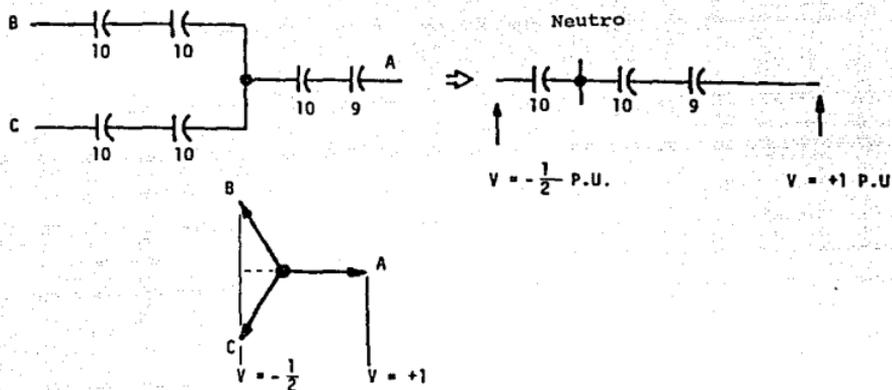


FIGURA 3.4. Banco con estrella flotante simplificado para una fase en particular

Así en la figura 3.5, un banco trifásico de grupos serie con 10 capacitores por fase puede ser representado como un simple circuito serie iniciando a -0.5 p.u. de voltaje, 20 capacitores en paralelo hasta el neutro, luego 10 capacitores en paralelo hasta $+1$ p.u. de voltaje.

Para ese circuito simplificado, se pueden considerar 20 capacitores con 1 p.u. de voltaje para un mismo producto de 20 y 10 capacitores con 10 unidades de voltaje para el mismo producto de 20. Así, 3 unidades de voltaje es equivalente a 1.5 p.u. resultando en 1 p.u. en la fase de interés al voltaje pico y 0 voltaje en el neutro como se esperaba.

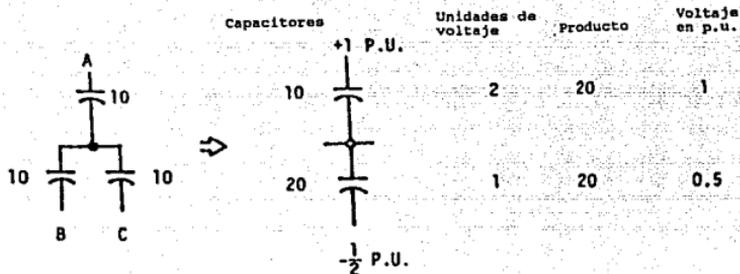


FIGURA 3.5 Banco con estrella flotante y un grupo serie.

En seguida considere que se quitó una unidad para la fase de interés. El circuito (figura 3.6) cambia a 20 capacitores conectados entre -0.5 p.u. y neutro, y 9 capacitores del neutro a $+1$ p.u. Considere 9 unidades de voltaje en los 20 capacitores, que da un producto de 180 y 20 unidades de voltaje en los 9 capacitores para el mismo producto de 180. Así, 29 unidades de voltaje equivalen a 1.5 p.u. de voltaje. Las 20 unidades de voltaje en la fase de interés representan:

$$(20/29) \times (1.5) = 30/29 \text{ p.u.}$$

voltaje en la fase de interés equivalente a un incremento del $3\frac{1}{2}\%$ de voltaje. Esto también representa un 0.03 p.u. de voltaje de neutro a tierra para propósitos de detección.

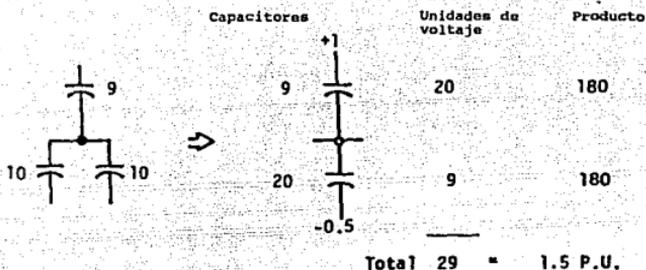


FIGURA 3.6 El banco para la figura 3.5 antes del cambio de un capacitor para la fase A.

Después, considere un banco similar flotante con dos grupos series de 6 capacitores cada uno, con un capacitor menos en los grupos serie en la fase de interés (figura 3.7). La primera simplificación es paralelear las fases B y C entre -0.5 p.u. de voltaje y neutro, 6 capacitores en serie con 6 capacitores que están en paralelo con una rama idéntica resulta simplemente en 6 capacitores conectados entre -0.5 p.u. y neutro. La fase de interés queda representada por 6 capacitores en serie con otros 5 capacitores conectados entre el neutro y +1 p.u. Considere 5 unidades de voltaje en cada uno de los grupos de 6 capacitores y 6 de voltaje en el grupo de las 5 unidades de capacitores dando un producto de 30. Así, 16 unidades de voltaje son equivalentes a 1.5 p.u. Las 6 unidades de voltaje en el grupo serie de interés es igual a:

$$(6/16) \times 1.5 = 9/16 \text{ p.u.}$$

para un sobrevoltaje de :

$$((9/16) - (1/2)) / (1/2) = 1/8 = 12.5\%$$

Así una unidad fuera es 12.5% de sobrevoltaje en las unidades restantes. Cualquier banco que resulta con más del 10% de sobrevoltaje en las unidades restantes cuando se pierde una de ellas se dice que está por abajo del dimensionamiento mínimo. Para tales casos se deben considerar más unidades de menos kVAC nominales o unidades de voltaje mayor (efectivamente otorgando más capacidad de sobrevoltaje). Para 12.5% de sobrevoltaje en el grupo serie de interés, se debe considerar el voltaje al neutro. El voltaje en la fase de interés de 11 unidades es:

$$(11/16) \times 1.5 = 16.5/16 \text{ p.u.}$$

el voltaje en el neutro por lo tanto será :

$$((16.5/16) - 1) = 0.5/16 = 1/32 = 3\%$$

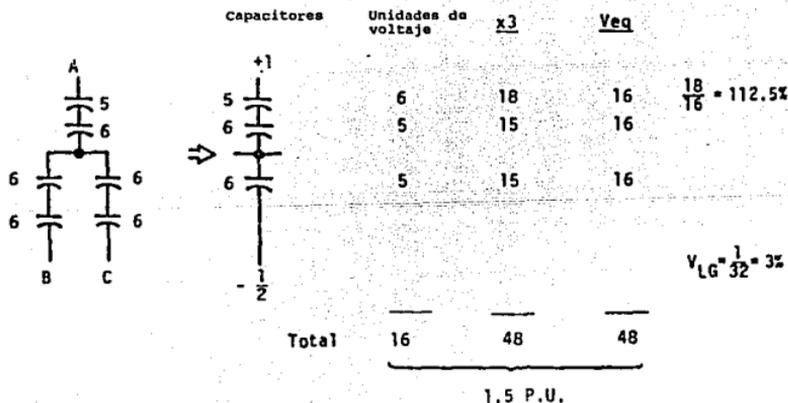


FIGURA 3.7. Banco con estrella flotante dando 112.5% de voltaje con un capacitor fuera, y 3% del voltaje de línea a tierra al neutro.

3.2.2 Bancos estrella-estrella flotante.

Para bancos estrella-estrella flotantes, la mitad del banco balanceado se puede representar en la figura 3.8, como las 3 ramas de ese banco paralelo y conectado a una fuente de voltaje 0. La mitad desbalanceada del banco está representada en la misma forma que un banco de estrella no aterrizada con una conexión adicional del neutro, que considera el banco balanceado a la fuente de voltaje cero (figura 3.9).

Considere la fase A de la mitad desbalanceada como la fase de interés. El extremo neutro de esa fase se puede representar como el voltaje que podría tenerse si la fase de interés no estuviera conectada en serie con las 5 ramas que no son de interés, en paralelo al punto neutro como se indica en la figura 3.10. Así, para 2 bancos iguales el voltaje al neutro, se determina por un divisor de voltaje de -0.5 p.u. de voltaje pasando por 2 unidades de capacitancia al punto neutro y luego a través de 3 unidades de capacitancia al punto cero.

Con las 2 unidades de capacitores teniendo 3 unidades de voltaje para un producto de 6 y 3 unidades de capacitancia, teniendo 2 unidades de voltaje para el mismo producto, el voltaje del neutro es $2/5$ de -0.5 p.u. para dar -0.2 p.u. Los voltajes en la fase de interés se pueden investigar conectando -0.2 p.u. a través de una capacitancia igual a la suma de las capacitancias de las 3 ramas de la parte balanceada del banco en paralelo con las 2 ramas que no son de interés en la parte desbalanceada del banco (6 5 unidades de capacitancia) al neutro, y luego en serie con la fase de interés hasta más 1 p.u. Este es un simple

divisor de voltaje similar al descrito anteriormente para la situación monofásica.

Para el banco estrella-estrella, la corriente en el neutro entre las 2 mitades es de interés para ajustar el relevador. Una estimación razonable de esta corriente es 0.5 de la corriente que fluiría a tierra si el banco tuviera su neutro aterrizado.

Una representación más precisa se puede obtener de la siguiente manera (figura 3.11). El neutro de la mitad desbalanceada del banco se puede representar como la fuente de voltaje cero, conectada en serie con la suma de las tres ramas capacitivas al punto neutro como vimos antes (equivalente de thevenin).

Similarmente el voltaje en el neutro de la mitad desbalanceada del banco se puede calcular como si la mitad balanceada no existiera. Entonces el neutro de la mitad desbalanceada se puede representar como el voltaje que se tendría si la ausencia 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 de thevenin). Entonces la corriente entre los puntos neutros se calcula determinando la corriente que fluirá entre los neutros si estos se conectaran. Obsérvese que entre las 2 fuentes de voltajes hay 2 grupos de capacitores en serie. Uno de los grupos lo forman las tres ramas del capacitor balanceado, el otro está formado por las tres ramas del capacitor desbalanceado, el cual es ligeramente menor que las tres ramas del capacitor antes de desbalancearse. El error usando capacitancia balanceada para la

mitad desbalanceada del banco generalmente es pequeño.

Simplificando, entonces, la corriente en el neutro se estima como el voltaje que se tendría en el neutro de la mitad desbalanceada del banco estrella-estrella en la ausencia de la otra mitad, aplicado a través de una capacitancia igual a las tres ramas de la mitad del capacitor en paralelo y en serie con la capacitancia de las 3 ramas de la otra mitad del capacitor en paralelo. Para mitades iguales, la capacitancia efectiva es simplemente un medio de la capacitancia de las 3 ramas de una mitad del banco en paralelo. Si se considera que cada rama tiene 1 p.u. de capacitancia, entonces la capacitancia efectiva para este cálculo es $3/2$ p.u. Si el voltaje que se tuviera en el neutro es, para este instante, 0.05 en p.u., entonces la corriente que fluiría en el neutro es de 0.05 ó 0.075 veces de la corriente nominal en cada mitad del banco.

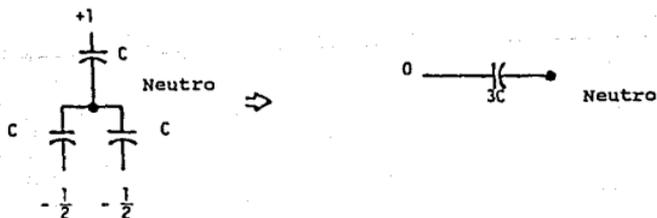


FIGURA 3.8 Simplificación del neutro de un banco trifásico balanceado

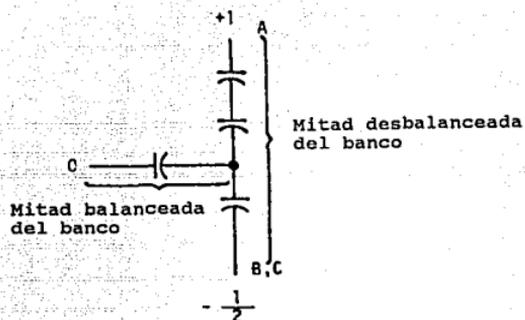


FIGURA 3.9 Combinación de las partes balanceada y desbalanceada del banco estrella-estrella flotante

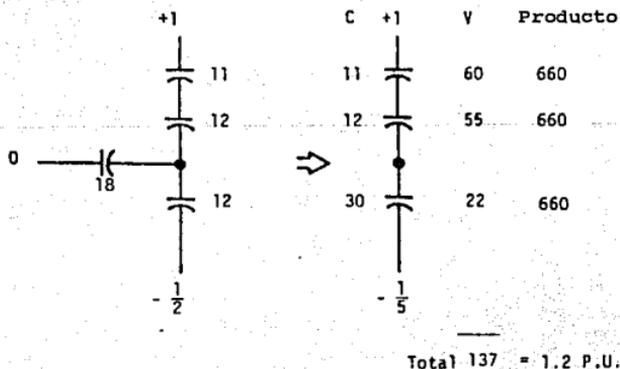


FIGURA 3.10 Simplificación adicional de la figura 3.9 para dos bancos

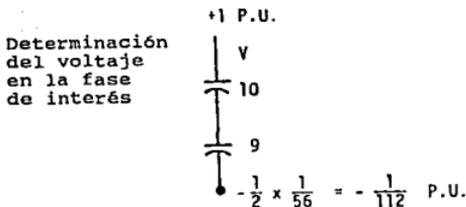
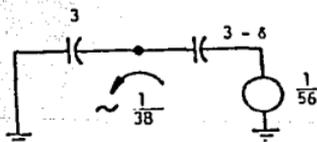
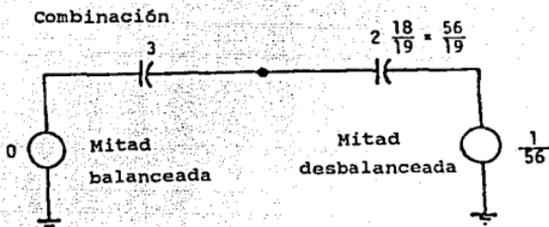
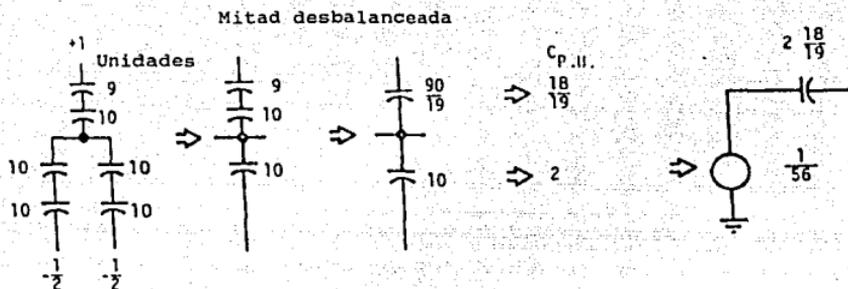


FIGURA 3.11 Determinación de la corriente al neutro en un banco estrella-estrella flotante, 2 grupos serie, 10 capacitores por grupo serie, y un capacitor fuera de un grupo

3.3 Ajuste de los relevadores de desbalance.

El ajuste mínimo de disparo del relevador de desbalance se establece por la cantidad de voltaje o corriente en el punto a sensar con el máximo sobrevoltaje permisible en el resto de las unidades después de la operación del fusible.

Por ejemplo, para un banco estrella aterrizada con 3 grupos serie con 10% de sobrevoltaje en el grupo serie en el que operó el fusible, se tendrá una reducción del 5% del voltaje en cada uno de los otros dos grupos de esa fase resultando un cambio neto del 5% en la corriente en la fase para un 0.05 p.u. de corriente en el neutro. Así, el disparo del relevador se debe ajustar a un 5% de la corriente nominal de fase.

Durante la operación del fusible, toda la corriente de fase es considerada a ir continuamente a la unidad fallada.

El grupo serie que contiene a la unidad fallada es considerado completamente en corto circuito con voltaje cero. Así, para el caso de tres grupos serie con estrella aterrizada, cada uno de los grupos serie sin falla tendría una y media veces el voltaje nominal, y la corriente de fase sería 1.5 Inom. La corriente de neutro resultante sería 0.5 Inom de fase.

Si el pick up del relevador esta ajustado para 5% de la corriente de fase, entonces la corriente durante la operación del fusible será:

$$0.5/0.05 = 10 \text{ veces el pick up del relevador}$$

Para aclarar las características totales del fusible, el tiempo para que opere el fusible individual, con 1.5 veces la corriente nominal continua de fase, puede ser determinado.

El tiempo de sincronía o tiempo de retardo del relevador es ajustado previamente. Asimismo, el fusible operará ligeramente después de que el relevador dispare. Generalmente las corrientes transitorias dentro de una unidad fallada aceleran la operación del fusible y la del relevador por lo que ese pequeño margen es requerido. El tiempo de retardo del relevador sería tan corto como sea posible para evitar que el daño se extienda en el caso de un arco externo no protegido con fusibles. El ajuste de los esquemas de protección que utilizan relevadores se hace frecuentemente con ajustes independientes de pick up y tiempo de retardo. Algunos relevadores son ajustados solamente para un nivel de pick up; la característica inherente del relevador (inercia, etc) es recomendada para proveer una coordinación satisfactoria para la acción propia del fusible, así como para evitar tiempos excesivos de exposición a un arco externo dentro de un grupo serie. El error más común en la aplicación son los ajustes de tiempo de retardo excesivos para relevadores con ajuste de tiempo separado.

3.4 Protección contra desbalance y falla dentro de un banco de capacitores

Para entender la necesidad de los circuitos de desbalance es necesario definir las condiciones de operación normal y anormal de las unidades capacitoras. Una condición de operación normal existe cuando el voltaje es aplicado al banco y todos los capacitores están funcionando correctamente.

Bajo condiciones normales de operación, los kVA operados del banco no deben exceder el 135% de los kVA nominales.

Este es un valor máximo y esta definido por la suma de:

- 1) Los kVA debidos al exceso de voltaje de la frecuencia fundamental.
- 2) Los kVA en exceso de los datos de placa debidos a la tolerancia de fabricación.
- 3) Los kVA causados por los voltajes de armónicas.

En un banco construido de multiples grupos serie de capacitores de distribución, las condiciones de operación normal existen cuando el voltaje de fase a neutro es dividido a través de varios grupos serie, así que ninguna de las unidades capacitor son operadas en exceso, esto es, arriba del 110% del voltaje nominal.

La operación continua antes dicha, al 110% del voltaje nominal se permitiría sólo en caso de emergencia.

Ciertos sobrevoltajes ocasionales pueden causar un exceso alrededor del 110% en períodos cortos.

3.5 Tipos de protección con detectores de desbalance.

Ya que un banco de capacitores se diseña para tener igual impedancia en cada una de las fases, el banco bajo condiciones normales de operación presentaría una carga trifásica balanceada para el sistema. El voltaje y corriente del sistema sería igual y mutuamente desplazados 120 grados eléctricos, por consiguiente, en condiciones anormales de operación pueden ser detectados por mediciones de:

- Los voltajes y corrientes dentro de las fases del banco.
- La relación del neutro del banco de capacitores y tierra.

Dependiendo de la magnitud del desbalance, el problema de detección y la función del detector de desbalance pueden no ser fáciles.

Las condiciones generales de protección son proporcionadas por el detector de desbalance y falla, estando definidas de la siguiente manera:

- a) Protección contra falla dentro del banco
- b) Protección contra desbalance severo sostenido y métodos de detección.
- c) Protección contra sobrevoltaje causado en la unidad individual por una falla.

3.5.1 Protección contra falla dentro del banco

La protección contra falla mayor, como también la de una falla entre fases o de fase a tierra, generalmente requiere de alguna forma de protección externa, ya sean fusibles de potencia, o interruptores, asociados con circuitos de relevadores. Esto puede ser fundamental para la detección de una falla de fase a tierra en un banco con estrella no aterrizada, por lo que el uso del sistema de detección sería práctico y deseable.

En un banco con estrella no aterrizada una falla de fase a tierra causará un incremento en la corriente de la fase fallada de tres veces la corriente nominal. Debido a esto, los fusibles del capacitor individual no protegerán contra una falla de fase a tierra fuera de la unidad capacitor, por lo que se requiere de otra protección.

Cabe mencionar que los bancos pueden operar a 135% del valor nominal de kVA indefinidamente, así como también a 135% del valor de la corriente de línea. La protección para esto debe permitir el 135% de la corriente a ser conducida continuamente pero, al mismo tiempo, debe quitar de operación al banco en el caso de que la corriente sea tres veces la corriente de línea.

El paso de desconexión de bancos con voltajes de distribución es muy común y esta consideración debe ser incluida en la protección. La protección más económica es proporcionada por un circuito de interrupción o fusibles de potencia en el paso de cada línea. Esto es especialmente cierto si el recurso de

interruptor para un paso individual no tiene capacidad de interrupción suficiente para servir como protección contra falla entre fases o de fase a tierra.

3.5.2 Protección contra desbalance severo.

En bancos donde las fases están compuestas por múltiples grupos serie de capacitores de distribución, existe la posibilidad de que un conductor externo pueda provocar que un grupo serie quede fuera. Una condición general es que la impedancia remanente en la fase limitará la corriente a una magnitud más baja que la requerida para operar la protección de respaldo. La detección de desbalance servirá satisfactoriamente para proteger contra este tipo de operación anormal.

3.5.3 Protección contra sobrevoltaje causado por falla en la unidad capacitor

La falla de una o más unidades capacitor en la sección de una fase ocasionará un incremento del voltaje en las unidades restantes de una sección en particular y en consecuencia un desbalance en el banco. Cuando una falla ocurre en una sección o fase del banco provoca un exceso por arriba del 110 % del valor de voltaje nominal en las unidades restantes y el banco saldrá del sistema y la unidad será reemplazada.

Aunque esto es posible para detectar la unidad fallada con un detector de desbalance, es muy difícil que se logren resultados satisfactorios, a menos que los factores del límite sean entendidos y considerados para lograr buenos resultados.

Esto, por lo regular, es recomendado para un banco conectado en estrella flotante, teniendo un grupo serie; todas las unidades en cada fase en paralelo o bancos de cualquier conexión teniendo más de un grupo serie con un tamaño mínimo del banco.

En la determinación de la protección contra fallas en una unidad capacitor, por medio de un detector de desbalance se pueden obtener los siguientes factores, los cuales serían anotados y cuidadosamente considerados en el diseño del circuito detector:

1.- El desbalance causado por el cambio de unidades en una sección se agregaría al desbalance de unidades movidas en otras secciones. Esto sería entendido para el funcionamiento conveniente del circuito de desbalance.

2.- El desbalance causado por el cambio de 1 ó 2 unidades para un grupo serie sería pequeño, entonces el cambio de impedancia de la fase como un resultado de estos cambios sería pequeña.

3.- En todos los bancos estaría algún desbalance residual o inherente lo que se agregaría al desbalance que es causado por el cambio de una o más unidades y puede, por lo tanto, incrementar o decrementar el efecto de este desbalance en la unidad capacitor. El desbalance residual puede cambiar de período a período como resultado del cambio de capacitancia, debido al efecto térmico en varias secciones del rack, y cambios en la capacitancia total,

debido al cambio y reemplazo de unidades capacitor u otras causas.

4.- El desbalance del sistema puede tener o ser tomado en consideración, dependiendo del tipo de detector de desbalance usado y el sistema al cual el banco esta conectado.

Esto es cierto si la referencia para el detector de desbalance está del neutro a tierra.

Resumiendo, existen muchos métodos para detectar desbalance y falla en unidades capacitor, algunos de estos son poco prácticos y económicos, por lo que únicamente se utilizan cuatro.

Generalmente esto se fundamenta en que sólo uno de los cuatro métodos proporciona satisfactoriamente resultados para cualquier banco bien diseñado. Aclarando que el circuito a ser usado depende del banco de capacitores que va a proteger. Dichos métodos son los siguientes:

Método 1.- Doble estrella con TC.

i) Descripción:

Bancos con estrella flotante de dos secciones, interconectando los neutros por medio de un TC con secciones generalmente hechas iguales o casi iguales en tamaño.

ii) Operación:

La impedancia de desbalance de una sección con respecto a otra causará un flujo de corriente en el neutro, y el relevador

sensitivo de corriente o el mecanismo de corriente secundaria se deberá ajustar para responder y predeterminar el grado de desbalance.

iii) Ventajas:

- No es sensible a desbalances del sistema.
- No es afectado por corrientes de terceras armónicas.
- Los relevadores de sobrecorriente pueden ser utilizados como detectores.
- En bancos grandes, en donde se tienen más de un grupo serie de unidades capacitor dentro de dos secciones, decrece la corriente de descarga para la unidad fallada.

iv) Desventajas:

- Decrece el número de unidades por grupo serie para otorgar un tamaño de banco, incrementando el sobrevoltaje como un resultado de las unidades en falla.
- Aunque relativamente inexpansible, puede requerir mayor área de subestación que un banco en estrella de igual tamaño.
- Costo elevado del material en su conexión para un banco en estrella de igual tamaño.

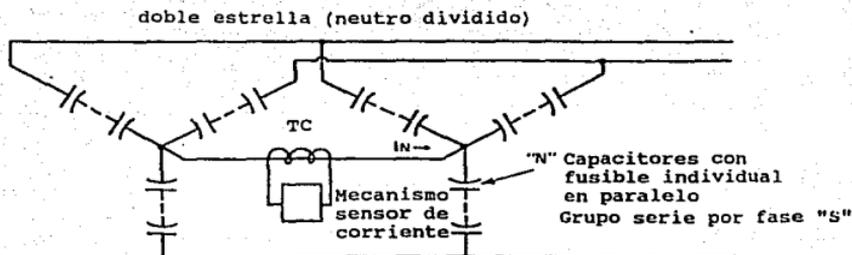


FIGURA 3.12

v) Cálculo de desbalance.

1.- La cantidad de corriente fluyendo entre el neutro de las dos partes considerando que el TC tiene impedancia cero será:

$$I_n = I_u * N * \left[\frac{V_t}{S_V} \right] * \left[\frac{3F}{6S(N - F) + 5F} \right] \quad \text{Amp.}$$

$$\%I_n(\text{total del banco}) = \frac{150 F}{6S(N - F) + 5F}$$

2.-El voltaje sobre las unidades restantes en una sección con F unidades cambiadas es:

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

3.- El número permisible de unidades que pueden ser cambiadas para una sección, y así resultar en una aportación de la regulación %Vr en las unidades restantes de esa sección, será:

$$F = \frac{6 SN}{6S - 5} \left[1 - \frac{Vt}{SV} * \frac{100}{\% Vr} \right]$$

donde :

Vt = Voltaje aplicado de línea a neutro
 V = Voltaje nominal de las unidades capacitor
 Vr = Voltaje en las unidades restantes de un grupo serie con F unidades cambiadas
 In = Corriente entre los neutros de los dos bancos
 Iu = Corriente nominal de una unidad
 S = Número de secciones por fase
 N = Número de unidades en paralelo en una sección
 F = Número de unidades cambiadas para una seccion

Método 2.- Estrella con conexión de TP

i) Descripción:

Banco en estrella flotante con un sistema de transformador de potencial (TP) unido entre el neutro y la tierra del sistema.

ii) Operación:

Las impedancias de las fases desbalanceadas del banco causarán un traslado del neutro con respecto a la tierra del sistema. La magnitud de este traslado es medido por el sensor de voltaje, el cual se ajustará para responder a un grado predeterminado de desbalance.

iii) Ventajas:

- Banco que tiene el doble de unidades en paralelo por grupo serie comparado con el banco de doble estrella de gran tamaño.
- Puede requerir menos área de subestación que el banco de doble estrella.
- Reducción del costo del material de conexión.

iv) Desventajas:

- Muy sensible a desbalances del sistema.
- Muy sensible a corrientes de terceras armónicas, por lo que requiere de un filtro o relevador especial.
- Una falla mayor causaría altos voltajes en el secundario.
- Número limitado de la relación aprovechable del transformación del TP (generalmente el primario a 120). Por lo que frecuentemente se dificulta el ajuste de los relevadores de detección.

v) Cálculo de desbalance

1.- La cantidad de traslado del neutro debido al cambio de F unidades capacitor en una sección, si el TP esta conectado entre neutro y tierra, considerando que el TP tiene una impedancia infinita es:

$$\frac{1}{3} V_{ns} = \frac{100 F}{3S (N - F) + 2 F}$$

$$V_{ns} \text{ (volts)} = \frac{\frac{1}{3} V_{ns}}{100} * V_t$$

2.- El voltaje sobre las unidades restantes en un grupo con F unidades cambiadas es:

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

3.- El número permisible de unidades que pueden ser cambiadas para un grupo serie otorgando un %Vr en el resto de las unidades de ese grupo es:

$$F = \left[\frac{3 NS}{3S - 2} \right] \left[1 - \frac{V_t}{SV} * \frac{100}{\%V_r} \right]$$

4.- El traslado del neutro cuando una sección completa es puesta fuera será:

$$\% V_{ns} = \frac{100}{3S - 2}$$

donde :

Vns = Traslado del neutro
 Vt = Voltaje aplicado de línea a neutro
 V = Voltaje nominal de las unidades capacitor
 Vr = Voltaje en las unidades restantes de un grupo con F unidades cambiadas
 S = Número de secciones por fase
 N = Número de unidades en paralelo por sección
 F = Número de unidades cambiadas para una sección

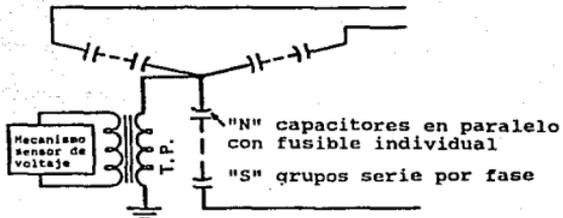


FIGURA 3.13

Método 3.- Estrella con neutro flotante y sensor de voltaje de malla de capacitancia.

i) Descripción:

Bancos en estrella con neutro flotante y sensor de voltaje de capacitor en la malla conectada entre neutro y tierra.

ii) Operación:

Un desbalance del banco causará un traslado del neutro con respecto a tierra. La malla capacitiva (impedancia dividida) es usada para detectar el traslado del voltaje en el neutro.

iii) Ventajas:

- Bancos que tienen dobles unidades en paralelo por grupo serie comparado con el banco de doble estrella para ceder kVAR en gran cantidad.
- Puede requerir menor área de subestación que el banco de doble estrella.
- La conexión entre neutro y tierra es capacitiva en lugar de inductiva. Un elemento inductivo es expuesto a sobrevoltajes destructivos cuando un banco es desconectado y la extinción del arco es extremadamente elevada.

iv) Cálculo de desbalance.

1.- El traslado del neutro debido al cambio de F unidades en una sección cuando el TP es conectado entre el neutro y tierra, considerando una impedancia del TP infinita es:

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

$$Vns \text{ (volts)} = \frac{\% Vns}{100} * Vt$$

2.- El voltaje en las unidades restantes de un grupo con F unidades cambiadas es:

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

3.- El número permisible de unidades que pueden ser cambiadas para un grupo serie otorgando un $\%V_r$ en el resto de las unidades de ese grupo es:

$$F = \left[\frac{3 NS}{3S - 2} \right] \left[1 - \frac{V_t}{SV} * \frac{100}{\%V_r} \right]$$

4.- El traslado del neutro cuando una sección completa está fuera es:

$$\% V_{ns} = \frac{100}{3S - 2}$$

donde :

- V_{ns} = Traslado del neutro
- V_t = Voltaje aplicado de línea a neutro
- V = Voltaje nominal de las unidades capacitor
- V_r = Voltaje de las unidades restantes de un grupo con F unidades cambiadas
- S = Número de secciones por fase
- N = Número de unidades en paralelo por sección
- F = Número de unidades cambiadas para una sección

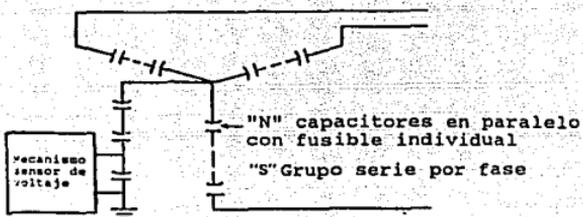


FIGURA 3.14

Método 4.- Estrella con TC.

i) Descripción:

Banco en estrella con neutro aterrizado y TC

ii) Operación:

El desbalance del banco causará un flujo de corriente del neutro a tierra, el dispositivo sensor de corriente (puede ser una resistencia y un relevador de voltaje) es ajustado para responder y predeterminar el grado de desbalance.

iii) Ventajas:

- Gran número de unidades en paralelo por grupo serie comparado con el banco de doble estrella.
- Bancos aterrizados proporcionan una mayor cantidad de protección.
- El costo inicial del banco es bajo.
- Reduce los voltajes establecidos donde el neutro es fijado y el banco es switchado como secciones trifásicas en particular.

iv) Desventajas:

- Muy sensible a desbalances del sistema.
- Muy sensible a corrientes de terceras armónicas requiriendo generalmente un circuito filtro.
- El neutro aterrizado puede causar interferencia telefónica.
- Requiere establecer un relevador de tierra en el sistema.
- Baja impedancia de falla a tierra.

v) Cálculo de desbalance:

1.- La cantidad de corriente a tierra debida al cambio de F unidades capacitor en una sección, considerando que el TC tiene impedancia cero es:

$$I_n = \frac{I_u * V_t}{S V} \left[\frac{N F}{S(N - F) + F} \right] \quad \text{Amp.}$$

$$\%I_n \text{ (de la corriente de fase nom.)} = \frac{V_t}{SV} \left[\frac{100 F}{S(N - F) + F} \right]$$

2.- El voltaje en el resto de las unidades en una sección con F unidades móviles es:

$$\%V_r = \frac{V_t}{SV} * \left[\frac{100 SN}{S(N - F) + F} \right]$$

donde:

Vt = Voltaje aplicado de línea a neutro
 V = Voltaje nominal de las unidades capacitor
 Vr = Voltaje en las unidades restantes de un grupo con F unidades cambiadas
 In = Corriente en el neutro
 Iu = Corriente nominal de una unidad
 S = Número de secciones serie por fase
 N = Número de unidades en paralelo por serie
 F = Número de unidades cambiadas para una sección

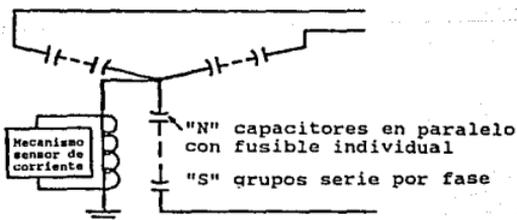


FIGURA 3.15

CAPITULO 4

BANCO DE CAPACITORES SIN FUSIBLES

Generalidades:

En este capítulo se analizan varias facetas del diseño de bancos de capacitores sin fusibles, se describen algunas instalaciones y se comentan brevemente las experiencias de operación obtenidas recientemente.

4.1 Antecedentes.

El diseño de las unidades capacitor ha cambiado notablemente en los últimos 50 años. Las primeras unidades utilizaron papel kraft sumamente refinado como principal material sólido dieléctrico. Aún con este heróico refinado, el papel kraft tenía muchas fallas o grietas, hubo necesidad de colocar varias capas de papel entre los electrodos para asegurar una buena probabilidad de obtener la adecuada resistencia aislante. El resultado fue un sandwich más bien grueso con muchas capas de papel entre los electrodos. En el caso de una perforación, la celulosa del papel kraft se podría carbonizar, manteniendo los electrodos separados, tendiendo a gasificar con el arco resultante. La rápida desconexión de las unidades falladas por medio de fusibles se hizo un requerimiento mínimo, para lograr una baja probabilidad de ruptura de la caja en el caso de falla de una unidad.

El uso de película de polipropileno en los capacitores de hoy en día ha conducido a menos fallas o grietas. En la mayor parte de las secciones de alto voltaje solamente se usan dos capas de película dieléctrica, con un espesor total de 0.0254 mm. El sandwich dieléctrico resultante es mucho más uniforme, tiene menos grietas, y no deja una carbonización en el caso de perforación. Cuando una película de polipropileno se perfora, tiende a "retroceder" y permite que se haga una buena soldadura entre los electrodos metálicos. Las antiguas unidades capacitor con papel en el sistema dieléctrico, casi siempre se hinchaban considerablemente en el caso de una falla interna. Los capacitores de hoy en día generalmente no se hinchan nada en caso de perforación del dieléctrico dentro de la sección.

Con las unidades antiguas se requerían fusibles. Con las nuevas unidades, el principal propósito del fusible es generalmente desconectar una unidad fallada para que la instalación pueda continuar en servicio.

Basándose principalmente en los requerimientos de la protección con fusibles individuales para evitar la ruptura de la caja, hace muchos años se desarrollaron prácticas de protección normalizadas. Dichas prácticas incluían fusibles individuales como protección primaria en caso de falla de una unidad, una protección por desbalance que proporciona una alarma cuando se pierde una o un pequeño número de unidades y un disparo en el caso de que la pérdida de las unidades sea tal que conduce a voltajes excesivos en las unidades restantes.

Estas prácticas de protección se han mantenido básicamente sin cambios por 50 años.

La construcción del banco de capacitores sin fusibles que aquí se describe, aprovecha los cambios ocurridos en las unidades capacitor para proporcionar un banco de capacitores que ofrece varias ventajas.

4.2 Verificación del comportamiento de la unidad fallada.

Antes de tener el primer banco de capacitores sin fusibles, se efectuaron pruebas de ingeniería para asegurar que el concepto "sin fusibles" fuera sano. Las pruebas a las unidades falladas se dirigieron a 3 áreas de interés: Corriente continua, transitorios durante la apertura o cierre del capacitor y pérdidas en el capacitor (factor de potencia).

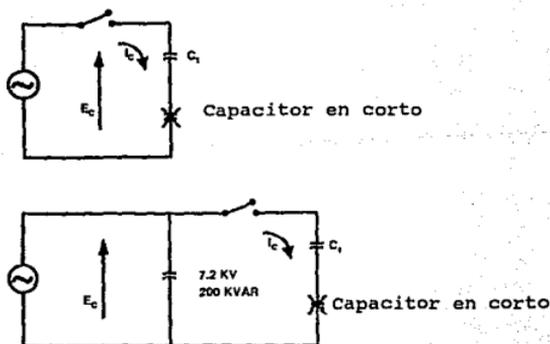
4.2.1 Corriente continua

Se efectuaron pruebas en unidades capacitor que habían sido completamente cortocircuitadas por la aplicación de un sobrevoltaje entre las terminales. Los capacitores en corto se sometieron a corrientes continuas iniciando con 30 amperes por una hora, aumentando a 40 amperes por una hora, etc. en pasos de 10 amperes hasta los 200 amperes.

No se presentó hinchado inusitado o indicación de inestabilidad en las "soldaduras" cortocircuitadoras en las unidades.

4.2.2 Switcheo de capacitores.

Para determinar los efectos del switcheo de capacitores con unidades en corto, se efectuaron ensayos usando un transformador de corto circuito de alto voltaje para conmutar capacitores. La corriente de carga continua era controlada conectando uno o varios capacitores apropiados como se muestra en la figura 4.1. El capacitor con corto se colocaba en serie con este capacitor para permitir que la corriente transitoria de switcheo seguida por una corriente de estado estable de los capacitores fluyera a través del capacitor con corto. La operación de switcheo se hizo con un minuto dentro, dos minutos fuera.



Switcheo de capacitores con unidades en corto

FIGURA 4.1

Los capacitores en corto recibieron conmutación 150 veces hasta 90 amperes, 40 veces hasta 118.3 amperes sin problemas.

Un tercer capacitor se switcheo 40 veces hasta 118.3 amperes con un capacitor en paralelo para proveer una corriente de Inrush de alta frecuencia. Este capacitor tampoco experimentó problema alguno.

4.2.3 Pérdidas en los capacitores.

Cuando una sección del capacitor queda en corto, la película de polipropileno se funde para dejar que las hojas del capacitor se suelden unas con otras. Para verificar la estabilidad a largo plazo y que las pérdidas constantes fueran bajas en las unidades parcialmente en corto, se tomaron tres unidades de capacitores a las que les falló una sección durante la prueba final de producción y se les hizo una prueba de duración.

Estas tres unidades se operaron en un ambiente de 50 grados celcius con 125% de voltaje de régimen (9000/7200) pero con una sección en corto de cada unidad. El sobrevoltaje real en las secciones buenas de los capacitores fue 167% del voltaje nominal (3000/1800) y una corriente continua de 23 amperes. Después de más de 5400 horas de prueba de envejecimiento acelerado las pérdidas de 0.08 y 0.09 watts/kVAR (factor de potencia) se mantuvieron en un nivel bien adentro del valor permisible de la norma de producción.

4.2.4 Experiencia de campo.

Antes de que el capacitor "all-film" (todo de película) llegara a ser la norma de la industria, se hicieron varios diseños y se probaron en el campo.

Un diseño específico se había embarcado a una empresa del sureste de U.S.A. Como éste era un nuevo diseño de capacitores "all-film", se hicieron visitas con regularidad para medir cada capacitor. En total fueron 294 unidades.

Desafortunadamente se presentó una tasa alta de falla de unidades. Afortunadamente se obtuvo información muy valiosa.

Por un período de 2 años, todas las unidades capacitor del banco se midieron 5 veces en intervalos regulares. Lo interesante fué que el número de secciones de capacitor en corto se incrementó en una tasa estable hasta un total de 69 unidades parcialmente en corto, algunas con más de una sección en corto. No se fundieron fusibles ni se hincharon las cajas. Al fin de los dos años todas las unidades de capacitores de la instalación fueron reemplazados con nuevas unidades "all-film" que todavía están en servicio.

Esta experiencia de campo demostró tres puntos importantes:

-Todos los capacitores "all-film" que tuvieron corto, permanecieron con él, sin arqueado o ruptura de la caja.

-Los fusibles no siempre operaron con un corto en un capacitor.

-La observación del número de fusibles volados en un banco de capacitores no es necesariamente una indicación segura de la condición real de las unidades capacitor del banco.

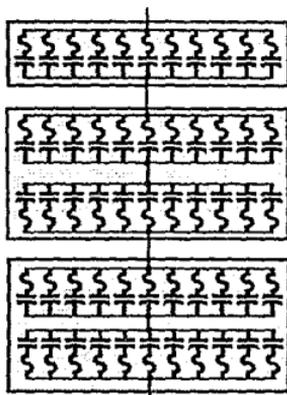
En resumen: los ensayos con unidades capacitor con falla indicaron que el concepto "sin fusibles" era sano. Una unidad con falla puede operar continuamente aún con corrientes grandes y sobretensiones transitorias debidas al switcheo de capacitores sin llegar a producir hinchazones o ruptura de la caja.

4.3 Construcción de bancos de capacitores sin fusibles.

La figura A ilustra esquemáticamente una fase de un banco de capacitores en derivación de alto voltaje con fusibles individuales.

En esta construcción estandar con fusibles, la falla parcial en una unidad capacitor comúnmente trae como resultado un esfuerzo considerablemente grande en la parte restante de esa unidad y la falla completa de la unidad. En caso de falla de la unidad, el fusible individual opera. Si no tuviera fusible, la corriente a través de la unidad con falla sería muy alta. Esencialmente, la corriente total de fase irá a través de la unidad con falla. Esta puede ser de varios cientos de amperes, lo que conduciría a la sobrecarga térmica de los bushing de la unidad, etc.

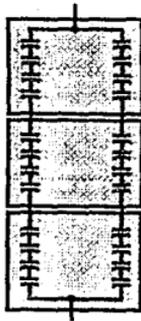
Para bancos sin fusibles, es preferible usar el esquema que se ilustra en la figura 4.2



Esquema de una fase de un banco de capacitores con fusibles

FIGURA A.

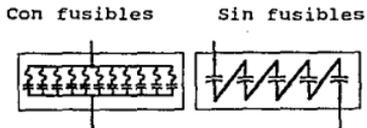
En esta configuración, la falla de una sección individual del capacitor conduce a muy poco incremento en el voltaje de las secciones restantes de esa cadena. No se espera que fallen otras secciones en esa cadena a causa del aumento de voltaje que se presenta después de la falla de una o varias secciones. Aún si una o dos unidades de capacitores fallaran completamente en esa cadena el aumento de corriente es modesta. En el contexto de la presente introducción, el concepto de banco sin fusibles, no sólo quiere decir el quitarle los fusibles a los bancos de capacitores convencionales. Es más bien un arreglo totalmente nuevo de un banco que no usa fusibles.



Una fase de un banco de capacitores sin fusibles

FIGURA 4.2

La figura 4.3 muestra una unidad apilada de un banco de capacitores sin fusibles junto con una unidad apilada de un banco convencional con fusibles. En el banco convencional, las unidades se conectan en paralelo unas con otras. En el banco sin fusibles, las unidades se conectan en serie unas con otras.



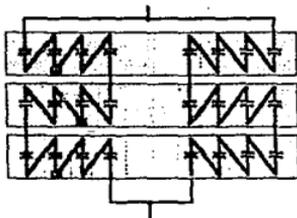
Esquema de una unidad de un banco convencional y sin fusibles

FIGURA 4.3

Cada una de las estructuras (conjuntos apilados) que soportan las unidades capacitor están ligadas a una de las cadenas de unidades capacitor. Esto establece el potencial de cada una de las estructuras y permite una operación confiable de la protección por desbalance en el caso de una descarga indeseable a una de las estructuras.

En la figura 4.4 se muestra una fase del banco. Cada cadena tiene 12 unidades.

Para 115 kV (69 kV de fase a tierra) cada unidad sería de 5.75 kV. Con doce unidades de 300 kVAC, de 5.75 kV por cadena, dos cadenas por fase y tres fases, este arreglo daría 21.6 MVAC.



Esquema de una fase de un banco sin fusibles

FIGURA 4.4

4.4 Características de los bancos de capacitores sin fusibles.

Siete atributos de bancos de capacitores de alto voltaje sin fusibles serán comparados con la construcción convencional de capacitores con fusibles :

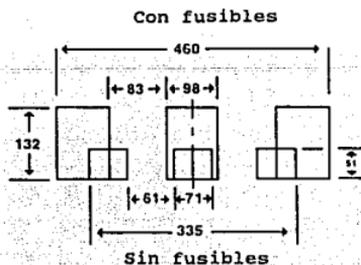
4.4.1.- Simplicidad. No existe necesidad de rieles para fusibles y aisladores, fusibles y desviadores, ni del espacio requerido entre unidades para la operación apropiada de los fusibles.

La eliminación de los fusibles incrementa la seguridad de la instalación pues parte de las fallas de bancos convencionales están asociadas con fallas de fusibles (más que con fallas en la unidad capacitor). La construcción más simple trae como resultado una instalación menos vulnerable, más confiable. Mientras que los fusibles pueden aumentar la disponibilidad de un banco convencional al eliminar una unidad con falla, el uso de series de cadenas de unidades en la construcción sin fusibles da el mismo incremento en la disponibilidad sin la necesidad de fusibles.

4.4.2.- Protección de efectos indeseables. Todas las partes vivas expuestas en un banco de capacitores sin fusibles están cubiertas de la misma manera que están cubiertas en un equipo de capacitores de distribución montados en poste. Muchos bancos de capacitores de subestación han quedado fuera de servicio o se han dañado seriamente a causa de efectos indeseables (bichos) que han

entrado al banco. El que sean a prueba de bichos deberá aumentar la disponibilidad del banco y reducir su vulnerabilidad al daño relacionado con los problemas causados por estos.

4.4.3.- Tamaño. Generalmente el banco de capacitores sin fusibles es casi de un tercio del volumen físico de un banco con fusibles figura 4.5. Esto se debe a la eliminación de los fusibles y del espaciamiento requerido entre unidades para la operación apropiada de fusibles. Las fases se pueden colocar ligeramente más cerca unas de otras pues no hay necesidad de dejar margen para expulsión de gases durante la operación con fusibles. Esta reducción de tamaño puede ser una ventaja importante para subestaciones en donde las dimensiones del equipo son importantes.

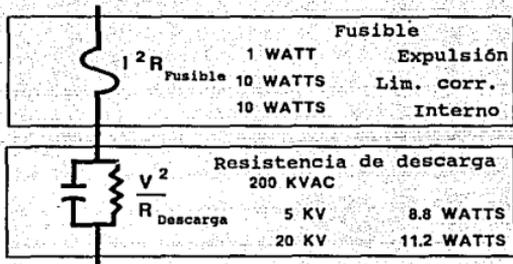


Aspecto de un plan relativo para bancos de capacitores

FIGURA 4.5

4.4.4.- Armado en campo. Los fusibles individuales de unidades de capacitores se dañan fácilmente cuando se transportan armados. El pre-armado de las interconexiones entre unidades de capacitores en el diseño sin fusibles reduce realmente la posibilidad de daño del equipo durante el transporte. Este pre-armado y la eliminación de la necesidad de instalación de fusibles en el campo puede reducir considerablemente el trabajo de ensamble en el mismo.

4.4.5.- Pérdidas. La eliminación de los fusibles suprime todas la pérdidas ² I R asociadas con los fusibles figura 4.6. Además, el banco de capacitores sin fusibles usa unidades capacitor de voltaje más bajo. El requisito de la industria de la reducción del voltaje en la unidad a 50 volts en cinco minutos significa que las unidades de voltaje más bajo tienen menores pérdidas internas en el resistor de descarga. Como resultado, las pérdidas totales del banco de capacitores sin fusibles son más bajas que un banco de capacitores de similar valor nominal que usa un fusible individual en cada unidad.



Reducción de pérdidas con la construcción sin fusibles

FIGURA 4.6

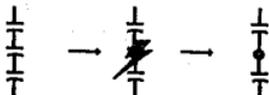
4.4.6.- Tamaño mínimo de banco. Los bancos de capacitores que usan fusible individual por unidad deben tener suficientes unidades en paralelo en cada grupo, de modo que la operación de un fusible (figura A) no traiga como resultado voltajes excesivos a través de las unidades restantes. Esto a menudo trae como consecuencia la necesidad de utilizar muchas unidades de pocos kvAC para lograr una capacidad instalada baja. Con el banco sin fusibles, el número de unidades se puede reducir frecuentemente en forma considerable puesto que un banco de capacitores sin fusibles puede operar hasta con una sola cadena de unidades (figura 4.2). Esto a menudo trae como resultado una reducción considerable en el número total de unidades y del tamaño físico para un banco de capacitores pequeño.

4.4.7.- Energía paralela. Hay una gran investigación en la industria respecto a la instalación de fusibles y la protección de las unidades contra la ruptura de cajas a causa de la energía descargada sobre la unidad fallada desde los capacitores en paralelo (Figura A).

El arreglo de unidades capacitor en cadenas de unidades en serie entre fase y neutro (figura 4.2) elimina esta preocupación en su totalidad.

4.5 Consideraciones de protección

En un banco de capacitores sin fusibles, la primera línea de protección contra falla del dieléctrico de un elemento capacitor es la soldadura estable que ocurre en el punto de perforación figura 4.7.



Falla de un capacitor en una sección dentro de un banco de capacitores sin fusibles

FIGURA 4.7

Pruebas de laboratorio y experiencia de campo han demostrado que esta soldadura puede fácilmente llevar la corriente que se presenta a continuación de la falla de la sección (corriente en la cadena), incluyendo todas las corrientes transitorias por switcheo que puedan ocurrir.

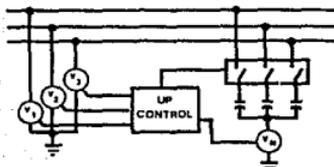
En un banco sin fusibles no existe la consideración del tipo o tamaño de fusible que se va a usar.

El diseño de la protección para un banco de capacitores sin fusibles se enfoca a la protección de desbalance (figura 4.8) que proporciona un disparo en el caso de que se presente un considerable desbalance dentro del banco y una alarma para indicar la presencia de un desbalance a consecuencia de la falla de una unidad.

La protección de desbalance ilustrada es para bancos de capacitores no aterrizados. Se usan arreglos ligeramente diferentes para bancos en estrella puestos a tierra.

Los requisitos para la protección contra fallas importantes implican el uso de relevadores de sobrecorriente y de interruptores automáticos, que son exactamente los mismos para bancos de capacitores sin fusibles y con fusibles.

En la operación del banco, existe también la consideración de ubicar una unidad con falla.



Protección de desbalance para un banco de capacitores en estrella flotante

FIGURA 4.8

La protección de desbalance para un banco de capacitores sin fusibles es muy similar a la usada en bancos convencionales con fusibles. El corto circuito de una unidad capacitor en un banco sin fusibles da esencialmente la misma señal de desequilibrio que la operación de un fusible individual de un capacitor en un banco con fusibles.

No hay nada respecto al banco de capacitores sin fusibles, que requerirá más complicación en la protección de desbalance que lo usado en bancos convencionales con fusibles.

El retardo de tiempo para el relevador de disparo deberá ser mínimo. No se necesita retardo para la coordinación con un fusible externo del capacitor. Generalmente un retardo del orden de un cuarto a un medio de segundo es adecuado para evitar el disparo indeseable del banco. Todavía más, este retardo tan corto hace mínimo el daño que puede ocurrir a un banco de capacitores

(ya sea con fusibles o sin fusibles) en el caso de un accidente serio dentro de un banco. El tiempo de retardo para el relevador de alarma puede ser mucho más largo, pues este relevador se usa sólo para indicar un desbalance más prolongado en el banco.

4.6 Localización de una unidad capacitor dañada dentro de un banco de capacitores sin fusibles.

Una unidad capacitor dañada se puede localizar fácilmente en un banco sin fusibles sin desconectar ninguna de las unidades de capacitores. La falla de una sección de un capacitor en la unidad capacitor ocasiona que se incremente la capacitancia de la unidad. Este incremento en la capacitancia se puede usar para identificar la cadena de unidades con el capacitor dañado y localizar el capacitor que falló dentro de la cadena. Primero las tres conexiones de fase del banco de capacitores y el neutro se conectan a tierra. Esta medida de seguridad provee una configuración conveniente del banco para localizar una unidad fallada.

Se mide la capacitancia entre el punto medio de cada una de las cadenas de unidades capacitor y tierra. Si ha fallado alguna de las unidades capacitor (ya sea arriba o abajo del punto medio), la capacitancia medida será más alta que la capacitancia antes de la falla para la cadena y más alta que las cadenas similares sin falla en el mismo banco.

La cantidad por la cual se espera que aumente esta capacitancia para una sección con falla en una unidad de capacitores se puede estimar de la siguiente manera: La capacitancia entre el punto medio y tierra es la suma de dos capacitancias; una desde el punto medio hacia abajo hasta neutro (tierra) y otra desde el punto medio hacia arriba hasta la conexión de línea (tierra). La falla de una unidad aumentará la capacitancia de una de estas dos piernas. El incremento de la capacitancia en P.U. en esa pierna es aproximadamente 1500 dividido entre la mitad del voltaje de línea a neutro para el banco. (1500 volts es un voltaje aproximado para una sección individual en el interior de una unidad capacitor). Puesto que este cambio ocurre en sólo una de las dos piernas (ramas), el cambio total por unidad es un medio del valor calculado. Así el cambio esperado por unidad es aproximadamente 1500 dividido entre el voltaje de línea a neutro del banco. Un banco de 115 kV tiene aproximadamente 66.4 kV a tierra.

La falla de una sección daría un aumento en la capacitancia para la medición del punto medio a tierra de 1500 dividido entre 66400 o ligeramente mayor que el 2%. Este cambio es fácilmente medido y es considerablemente mayor que la diferencia esperada entre cadenas similares en el mismo banco.

Una vez que se ha identificado la cadena de unidades en la que se localiza un capacitor con falla, el paso que sigue es identificar el bastidor con la unidad defectuosa.

Se mide a través de la parte de la cadena que falló en cada una de las estructuras con capacitores, nuevamente sin desconectar ninguna de las terminales de los capacitores. Los

capacitores en el armazón con la unidad fallada mostrará una lectura de capacitancia notablemente más alta que los capacitores de las otras armazones.

Por último, la unidad fallada puede ser localizada midiendo cada una de las unidades capacitor del armazón que tiene la unidad con falla.

La capacitancia de la unidad fallada será mucho más alta que la de los otros capacitores del mismo armazón. (Si la unidad esta completamente en corto, el medidor de capacitancia dará un valor de falla, en algunos casos de 0 milifarads). Estas mediciones se hacen sin desconectar las puntas.

Todas las mediciones de capacitancia para localizar una unidad fallada se hacen sin perturbar el banco. Hay un agujero pequeño en el extremo de la cubierta del bushing a través del cual se puede colocar un medidor de capacitancia para las mediciones.

4.7 Principios de diseño.

Varios conceptos útiles en el diseño de bancos de capacitores sin fusibles son los siguientes:

4.7.1.-Corriente de cadena. La corriente de cadena se limita normalmente a unos 60 amperes. Aplicando el factor nominal de 1.35 veces para tener en cuenta los efectos de sobrevoltaje de sistema, armónicas y tolerancia de capacitor da una corriente máxima esperada de cadena de 80 amperes. Esto está bien dentro de

la capacidad nominal de los bushing usados en unidades capacitor de alto voltaje. Además, da margen considerable para la estabilidad de la soldadura que ocurre en el caso de una falla dentro de la unidad.

Unidades de más capacidad (más kVAC) a un voltaje nominal dado dan como resultado corrientes de cadena más altas. Las unidades de voltaje menor de una capacidad nominal dada de kVAC traen como resultado corrientes de cadena más altas. Generalmente, el diseño más simple de bancos trae como resultado un número más pequeño de cadenas en paralelo, y unidades de mayor capacidad.

Un buen punto de arranque en el diseño de un banco es dividir la corriente deseada de fase total por 60 para encontrar el número de cadenas requeridas de 60 amperes.

4.7.2.- Máximo voltaje a la estructura. El potencial de la estructura se establece por una cadena de unidades. Las unidades dentro de una estructura están en serie unas con otras, el voltaje a través de los bushing externos necesita estar dentro de la capacidad de esos bushing y dentro de la capacidad de la envoltura de caja dentro de la unidad.

El bushing comúnmente usado para esta clase de construcción se aplica normalmente hasta 14.4 kV. El requerir un bushing de más alto voltaje en las unidades individuales trae como resultado un gasto adicional y una instalación más frágil. Comúnmente el voltaje se limita a no más de 14.4 kV para la estructura, o un voltaje total a través de la estructura de menos de 28.8 kV. La utilización de máximo voltaje a través de cada estructura hace

mínimo el número total de marcos requeridos para una instalación y comúnmente trae como resultado el diseño más sencillo. Un buen punto de arranque para el diseño de la instalación es dividir el voltaje de línea a tierra entre 28.8 kV para determinar el número mínimo de estructuras requeridas.

4.7.3.- Establecimiento del potencial de la estructura. Con objeto de establecer el potencial de cada una de las estructuras y asegurar la operación apropiada de la protección de desbalance en el caso de una falla para una de las estructuras, es deseable conectar las estructuras a una cadena de unidades. Para esta cadena de unidades es deseable tener un número par de unidades (4 ó 2) en cada estructura de esa cadena. De este modo, la estructura puede estar al mismo potencial del punto medio de las unidades de esa estructura.

Si se desea, las otras cadenas pueden tener un número impar de unidades en cada estructura, para lograr la capacidad deseada del banco con un número mínimo de unidades.

4.7.4.- Selección de la unidad. La unidad capacitor utilizada en un banco de capacitores sin fusibles se diseña normalmente en forma específica para esta aplicación. Una unidad estandar de dos bushing de 4800 V, puede no tener bushing o envoltura de caja adecuados para una aplicación sin fusibles.

A las unidades de 4800 V para bancos sin fusibles se les ponen bushing usados normalmente en unidades de 14.4 kV y una envoltura de caja equiparable. Es importante que esas unidades usadas para construcción sin fusibles no sean unidades antiguas con papel en el sistema dieléctrico.

4.7.5.- Capacidad de la unidad. La protección del banco trabaja mejor si todas las unidades tienen los mismos kVAC, de esta manera aún si las cadenas no tienen el mismo número de unidades unas que otras, la protección de desbalance dará la misma señal cuando falla una unidad. La mezcla de capacitores de diferentes capacidades en kVAC en un banco, trae como resultado requerir más unidades en el banco y consideraciones más complejas para fijar la protección de desbalance.

4.7.6.-Protección. Los criterios más usuales de protección para bancos de capacitores con fusibles es dar una alarma cuando se pierde la primera unidad y un disparo en un punto en donde el voltaje en las unidades restantes pueda alcanzar el 110% del nominal.

Este concepto es evidente para bancos con fusibles pues la falla parcial de una unidad trae como resultado esfuerzos por voltaje en el resto de esa unidad que probablemente conducirá rápidamente a la falla de toda la unidad.

Con los bancos sin fusibles, la falla de una sección trae como resultado muy poco aumento de voltaje en las secciones restantes de la cadena. Al considerar los ajustes de la protección para un banco de capacitores sin fusibles puede ser deseable dar alarma en el caso de una falla de una o varias secciones de una cadena, y el disparo cuando el voltaje en las secciones restantes sea del 110% .

La falla de una sección en una unidad capacitor no aumenta el esfuerzo en las secciones restantes en esa unidad lo bastante para acelerar significativamente las fallas de esas secciones. Es mejor planear la protección del banco considerando el número de secciones en serie entre fase y tierra en vez de considerar el número de unidades de capacitores entre fase y tierra. Hay comunmente como una sección por 1600 volts.

CONCLUSIONES

- El clamor mundial por una utilización racional de la energía,
- la necesidad de hacer óptima la utilización de la infraestructura de las compañías que proporcionan el servicio eléctrico, así como de las compañías consumidoras,
- y los requerimientos cada vez más estrictos en la calidad del servicio,

implica la aplicación de técnicas para mejorar el factor de potencia, controlar los perfiles de voltaje, confinar las armónicas, eliminar el transporte de reactivos a través de los elementos de la red, producir reactivos en sitios cercanos a donde se consumen, liberar las máquinas y las redes de pérdidas atribuibles al transporte de reactivos.

Todo esto conduce a la aplicación presente y futura, de bancos de capacitores que, por su costo, técnica y beneficios que presentan, se perfilan como los equipos más adecuados para ayudar a resolver o satisfacer los requerimientos industriales.

Ante su difusión inminente a lo largo del sistema eléctrico, sugiere perfeccionar las técnicas de construcción y mejorar el conocimiento sobre su comportamiento cuando opera en estado estable o durante transitorios, cuando el banco está completamente sano o cuando tiene fallas internas.

Aunque los materiales y las técnicas modernas que se usan para construir capacitores tienden a disminuir el número de fallas que puedan presentar éstos, aún existe la probabilidad de que la falla parcial o total de este equipo contamine al sistema eléctrico o dañe al resto del banco que está sano. Es necesario, por lo tanto, proponer un esquema de protección que haga mínimo el daño al equipo y lo aisle del sistema eléctrico cuando se requiera.

En resumen, por ser el banco de capacitores el elemento más económico, sencillo y confiable, que se pueda instalar en cualquier punto de una red para satisfacer en un lapso de tiempo muy breve los requerimientos actuales, este trabajo presenta una síntesis de sus aplicaciones, técnicas de construcción, pruebas y protecciones y pretende ofrecer suficiente material actualizado para que sea útil en su trabajo a los ingenieros involucrados en este problema y que sirva de base para trabajos futuros relacionados con el tema.

BIBLIOGRAFIA

- 1.-A STUDY OF STATIC REACTIVE POWER COMPENSATORS FOR HIGH-VOLTAGE POWER SYSTEMS, R. T. BYERLY, R. J. BENNON, E. R. TAYLOR AND D. T. POZMANIAK, DEPT. OF ENERGY AND THE LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY, 1981.
- 2.-AN EVALUATION OF POWER FACTOR CORRECTION ON A SYSTEM BASIS, H. R. TOMLISON AND R. O. BIGELOW, AIEE TRANSACTIONS, VOL. 73, 1954, PP. 1677-1684.
- 3.-ANALYSIS OF CAPACITOR APPLICATION AS AFFECTED BY LOAD CYCLE, R. F. COOK, AIEE TRANSACTIONS, VOL. 78, 1959, PP. 950-957.
- 4.-AMERICAN NATIONAL STANDARD, "SHUNT POWER CAPACITORS" ANSI C55.1-1968.
- 5.-CAPACITOR BANK PROTECTION, JOHN HARDER, WESTINGHOUSE 1981.
- 6.-CAPACITOR BANK PROTECTION, JOHN E HARDER, IEEE RURAL ELECTRIC POWER CONFERENCE, 1980.
- 7.-CAPACITOR SWITCHING PHENOMENA, R. C. VAN SICKLE AND J. ZABORSZKY, AIEE TRANSACTIONS, VOL. 70, 1951, PP. 151-159.
- 8.-CONDENSADORES DE POTENCIA OPTIMOS PARA ALTA TESION, ESBJORN ERIKSSON, REVISTA ABB 3/90.
- 9.-ECONOMIC MERITS OF SECONDARY CAPACITORS, R. A. ZIMMERMAN, AIEE TRANSACTIONS, VOL. 72, 1953, PP. 694-697.
- 10.-EXTENDING THE USE OF SHUNT CAPACITORS BY MEANS OF AUTOMATIC SWITCHING, W. H. CUTINO, AIEE TRANSACTIONS, VOL. 63, 1944, PP. 674-678.

- 11.-FUSELESS CAPACITOR BANKS,
PETER H. THIEL, JOHN HARDER, GEORGE TAYLOR,
ABB POWER T & D COMPANY, 1991.
- 12.-FUSELESS HIGH CAPACITOR BANKS - DESIGN AND EXPERIENCE,
ROBERT S. NOWELL, JOHN E. HARDER, SOUTHEASTERN ELECTRIC
EXCHANGE, 1990.
- 13.-LOSS REDUCTION FROM CAPACITORS INSTALLED ON PRIMARY
FEEDERS, N. H. NEAGLE AND D.R. SAMSON,
AIEE TRANSACTIONS, VOL. 75 PARTE III, 1956, PP. 1200-
1207.
- 14.-NATURAL FREQUENCY OF PARALLEL CAPACITOR BANKS,
W. H. CUTTINO AND MILES MAXWELL,
AIEE TRANSACTIONS, VOL. 75, 1956, PP 662-666.
- 15.-NEMA STANDARDS PUBLICATION,
"SHUNT CAPACITORS" NO. CP1-1976.
- 16.-OPTIMUM SHUNT CAPACITOR GROUP FUSING,
JOHN E. HARDER,
IEEE POWER APPARATUS AND SYSTEMS, 1977.
- 17.-OVERVOLTAGE AND VOLTAGE INVERSION ON FOUR WIRE CIRCUITS
WITH UNGROUNDED SHUNT CAPACITORS, W. H. FERGUSON,
WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION.
- 18.-POWER CAPACITORS,
R. E. MARBURY,
MCGRAW-HILL BOOK CO.
- 19.-POWER CAPACITOR CONSTRUCTION, CAPABILITY AND PROTECTION,
JOHN E. HARDER,
ASEA KABEL AB SWEDEN, 1981.
- 20.-POWER CAPACITOR ECONOMICS,
W. H. FERGUSON,
ELECTRIC LIGHT AND POWER, 1955.
- 21.-PROTECTION OF SHUNT CAPACITOR BANKS,
W. H. CUTTINO,
WESTINGHOUSE ENGINEERING, 1955.

- 22.-REACTIVE POWER CONTROL IN ELECTRIC SYSTEMS,
EDITED BY TIMOTHY J. E. MILLER,
WILEY-INTERSCIENCE.
- 23.-REPORT ON A SURVEY ON THE CONNECTION OF SHUNT CAPACITOR
BANKS, AIEE COMMITTEE REPORT,
AIEE TRANSACTIONS, VOL. 77 PARTE III, 1958.
- 24.-REPORT ON THE OPERATION OF SWITCHED CAPACITORS,
AIEE COMMITTEE REPORT,
AIEE TRANSACTIONS, VOL. 74 PARTE III, 1955, PP. 1255-
1261.
- 25.-SHUNT CAPACITOR,
APLICATION TO ELECTRIC UTILITY SYSTEMS,
WESTINGHOUSE AD-39-593, 1982.
- 26.-SOME CONSIDERATIONS IN THE PROTECTION OF HIGH VOLTAGE
CAPACITOR BANKS, N. R. SHEPPARD AND N. R. SCHULTZ,
AIEE TRANSACTIONS, VOL. 75 PARTE III, 1956, PP. 686-694.
- 27.-STACK TYPE CAPACITORS FOR HIGH VOLTAGE CIRCUITS,
WESTINGHOUSE INSTRUCTION LEAFLOT 39-421-1, 1968.
- 28.-STATIC SHUNT COMPENSATION FOR VOLTAGE FLICKER REDUCTION
AND POWER FACTOR CORRECTION, L. GYUGYI AND R. OTTO,
PROCEEDINGS OF THE AMERICAN POWER CONFERENCE, 1976.
- 29.-TRANSMISSION AND DISTRIBUTION REFERENCE BOOK,
WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION,
EAST PITTSBURGH.
- 30.-TESTING AND QUALITY ASSURANCE FOR MODEM HIGH VOLTAGE
POWER CAPACITOR,
OWE NERF, PAPER PRESENTED AT IEMA SEMINAR ON CAPACITOR
ASEA KABEL AB SWEDER, DECEMBER 1982.
- 32.-138 KV SHUNT CAPACITOR RESEARCH BANK DESING - EXPERIENCE,
JOHN E. HARDER, DONALD E. HUTCHINSON AND WILLAM B. RUST,
IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, 1990, PP. 337-342.