



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO**



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN  
CAMPO 4**

**ANALISIS DE RESONANCIA ARMONICA Y DE  
SOBRETENSIONES TRANSITORIAS DURANTE LA  
OPERACION DE BANCOS DE CAPACITORES  
EN DERIVACION**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
P R E S E N T A N :  
RICARDO ALEJANDRO LOPEZ RABADAN  
RAFAEL PAZARAN REYES

ASESORES: ING. ARMANDO GRANDE GONZALEZ  
ING. OSCAR CERVANTES TORRES

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEXICO

1996

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES  
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN  
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la F.E.B. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:

"Análisis de Resonancia Armónica y de Sobretensiones Transitorias  
Durante la Operación de Bancos de Capacitores en Derivación"

que presenta el pasante: Rafael Pazarán Reyes  
con número de cuenta: 8916249-4 para obtener el TITULO de:  
Ingeniero Mecánico Electricista .

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlan Izcalli, Edo. de Méx., a 22 de Febrero de 1996

PRESIDENTE	Ing. Javier Hernández Verga	
VOCAL	Ing. Esteban Corona Escamilla	
SECRETARIO	Ing. Oscar Cervantes Torres	
PRIMER SUPLENTE	Ing. María de la Luz González Quijano	
SEGUNDO SUPLENTE	Ing. Margarita López López	



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES  
DIRECTOR DE LA FEB-CUAUTITLAN  
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:  
"Análisis de Resonancia Armónica y de Sobretensiones Transitorias  
Durante la Operación de Bancos de Capacitores en Derivación"

que presenta el pasante: Ricardo Alejandro López Rabadán  
con número de cuenta: 8816009-8 para obtener el TITULO de:  
Ingeniero Mecánico Electricista .

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 22 de Febrero de 1996

PRESIDENTE	Ing. Javier Hernández Vega	<u>[Firma]</u>
VOCAL	Ing. Esteban Corona Escamilla	<u>[Firma]</u>
SECRETARIO	Ing. Oscar Cervantes Torres	<u>[Firma]</u>
PRIMER SUPLENTE	Ing. María de la Luz González Quijano	<u>[Firma]</u>
SEGUNDO SUPLENTE	Ing. Margarita López López	<u>[Firma]</u>

## **AGRADECIMIENTOS**

*-A Dios, por que siempre estuvo y estará con nosotros.*

*-Queremos agradecer especialmente a los ingenieros: Armando Grande González y Gilberto Enriquez Harper, por todo el apoyo que nos brindaron para la realización de esta tesis y el desarrollo de nuestro servicio social.  
"gracias"*

*-A todo el personal de la Unidad de Ingeniería Especializada de C.F.E., ya que en todo momento nos apoyaron cuando los necesitamos.*

*-A nuestros maestros, por los conocimientos que nos heredaron.*

*-A nuestra Universidad, por todo lo que nos dio.*

*-A todos nuestros amigos.*

**RAFAEL**

**-A mis padres:**

*Sr. Rafael Pazarán R.  
Sra. Georgina Reyes B.*

*Agradeciendo profundamente su esfuerzo y sacrificios que realizaron para que fuera posible la culminación de mi carrera profesional.*

**-A mis queridos hermanos:**

*Adriana y Jorge  
Con mucho cariño.*

**-A la memoria de mi tío:**

*Jose Luis Pazarán  
Te dedico este trabajo donde quiera que estes.*

**-A toda mi familia:**

*Abuelos, Tíos, primos, sobrinos.  
Por lo mucho que los aprecio.*

**RICARDO**

*A mis padres:*

*Que me brindaron no solo su apoyo, sino también su cariño y esfuerzo.  
"GRACIAS"*

*Sra Silvia R.  
Sr Luciano B.*

*A mis hermanos:*

*Que están conmigo en los momentos buenos y malos.*

*Jose B.  
Marco A.  
Kenia  
Eva S.  
Lizet V.*

*A mi familia:*

*A mis tíos, primos, sobrinos, abuelos y a mi señor padre,  
por el aprecio que les tengo.*

*A la memoria de mi hermano:  
Cesar*

## **FINALIDAD:**

**Analizar el comportamiento de los bancos de capacitores en derivación, conectados en el nivel de 115 kV en el Área de Cd. Juárez, Chih.; desde el punto de vista de análisis armónico y de sobretensiones transitorias. El análisis se efectúa previo y posteriormente a la puesta en servicio de dos bancos de capacitores en dicha Área.**



## PROLOGO

La utilización de bancos de capacitores en derivación en baja tensión, se ha efectuado desde hace más de 30 años en los Sistema Eléctricos del mundo; por lo cual se ha acumulado una basta experiencia en su aplicación, operación y mantenimiento. Sin embargo, en el nivel de transmisión, voltajes superiores a 13.8 kV, no se tiene tanta experiencia en la aplicación de bancos de capacitores en derivación.

En las redes de transmisión básicamente los bancos de capacitores se utilizan para soporte del voltaje, el cual se ve disminuido por la transmisión de potencia. A medida que el nivel de la potencia transmitida se incrementa; la magnitud del voltaje disminuye. Al disminuir la magnitud del voltaje, se incrementan las pérdidas y sobre todo se corre el riesgo de que el Sistema Eléctrico se colapse por pérdida de estabilidad de voltaje. Esto es, al disminuir la magnitud del voltaje, la magnitud de la corriente se incrementa; al incrementarse la corriente, disminuye la magnitud del voltaje; y así sucesivamente presentandose una serie de oscilaciones hasta que finalmente el Sistema Eléctrico se colapsa.

El presente trabajo está constituido por ocho capítulos en los cuales se hace una descripción detallada de los aspectos técnicos que son necesarios considerar. Se incluyen también, conclusiones y recomendaciones. Se trató en todo momento de que lo que se plantea en este trabajo, quede ilustrado mediante ejemplos prácticos. A continuación se indica brevemente el contenido de cada capítulo.

En el capítulo 1 se hace mención de los antecedentes que dieron lugar a la fabricación del capacitor. Se describe la manera como está constituido, las pruebas a las cuales es sometido y de algunos de los aspectos que deben ser considerados en el control de calidad de los mismos.

En el capítulo 2 se indican las características generales y conexiones más comúnmente utilizadas en bancos de capacitores.

En el capítulo 3 se hace referencia de la aplicación de los bancos de capacitores en derivación en las redes de transmisión. Se observa su efecto en el soporte de voltaje y en la disminución de las pérdidas.

En el capítulo 4 se describe la interacción entre los bancos de capacitores y las ondas de corriente y de voltaje con gran contenido de distorsión armónica en éstas. Se mencionan e ilustran las condiciones de resonancias que se pueden presentar, así como las acciones correctivas y preventivas que se consideran en la actualidad.

En el capítulo 5 se hace una breve descripción de las características principales y clasificación de las sobretensiones transitorias. Se determinan las magnitudes y frecuencias de las sobretensiones que se presentan durante la energización y desenergización de bancos de

capacitores en derivación. Se incluyen simulaciones realizadas con el Programa de Transitorios Electromagnéticos EMTP.

En el capítulo 6 se contemplan algunos de los aspectos que deben ser considerados para la protección de los bancos de capacitores. Se incluyen cálculos para la determinación de corrientes y de voltajes de desbalance ante fallas de unidades capacitoras.

En el capítulo 7, se indican los estándares industriales y guías de aplicación para bancos de capacitores. Se indican los límites permisibles en corriente y en voltaje a los que pueden estar sometidos.

El capítulo 8 proporciona los resultados del análisis de sobrevoltajes y de resonancia armónica en el Área de Cd. Juárez, Chih., con motivo de la puesta en servicio de dos bancos de capacitores en derivación en la red de 115 kV.

Finalmente, se indican conclusiones y recomendaciones generales sobre la aplicación de bancos de capacitores en redes de transmisión. Consideramos que este trabajo será de gran utilidad tanto para los estudiantes de estos temas, como para el personal que trabaja directamente en la aplicación, operación y mantenimiento de bancos de capacitores.

Es oportuno mencionar, que durante nuestra estancia en la Unidad de Ingeniería Especializada, de la Comisión Federal de Electricidad, durante el desarrollo de nuestro servicio social, tuvimos la oportunidad de colaborar en la realización de un estudio del Área de Cd. Juárez, Chih. en el cual se involucraban bancos de capacitores en derivación. Para nosotros fue importante y motivante poder colaborar en dicho estudio.

**ANÁLISIS DE RESONANCIA ARMÓNICA Y DE SOBRETENSIONES  
TRANSITORIAS, DURANTE LA OPERACIÓN DE CAPACITORES EN  
DERIVACIÓN.**

## **ÍNDICE:**

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO I FABRICACIÓN DE CAPACITORES</b>	<b>2</b>
1.1.- Fabricación de capacitores de potencia.	5
1.2.- Fusibles internos y de fusibles externos.	11
1.3.- Factores que afectan la seguridad	13
1.4.- Factores que afectan las pérdidas.	14
1.5.- Factores que afectan la economía en la fabricación de capacitores.	15
1.6.- Parámetros de diseño y fabricación.	16
1.7.- Pruebas y control.	17
<b>CAPITULO II CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE UN BANCO DE CAPACITORES</b>	<b>22</b>
2.1.-Valores nominales de unidades capacitores	22
2.2.- Valores máximos momentáneos que deben soportar los capacitores	24
2.3.- Valores máximos transitorios que deben soportar los capacitores	25
2.4.- Conexiones de bancos de capacitores	29
<b>CAPITULO III APLICACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES</b>	<b>35</b>
3.1.- Efecto de los capacitores en derivación.	39
3.2.- Fundamentos sobre la compensación de corriente reactiva.	40
3.3.- Reducción de la corriente de línea.	43
3.4.- Corrección de factor de potencia.	45
3.5.- Reducción de pérdidas.	48
3.6.- Incremento en el nivel de voltaje.	51

## **CAPITULO IV ARMÓNICAS**

62

4.1.- Definición de armónicas.	63
4.2.- Características de distorsión armónicas.	64
4.3.- Relación entre el orden de las armónicas y las componentes simétricas.	66
4.4.- Factor de distorsión armónica.	67
4.5.- Límites de distorsión armónica en la corriente.	69
4.6.- Límites de distorsión armónica en el voltaje.	70
4.7.- La importancia de la comprensión de armónicas en los sistemas actuales.	70
4.8.- Condiciones de resonancia.	73
4.9.- Resonancia en paralelo.	76
4.10.- Resonancia en serie.	82
4.11.- Reactor serie.	88
4.12.- Filtros.	89

## **CAPITULO V SOBRETENSIONES**

90

5.1.- Sobretensiones por rayo.	91
5.2.- Sobretensiones temporales.	93
5.3.- Rechazo de carga.	94
5.4.- Sobretensiones por maniobra de interruptores.	95
5.5.- Energización de bancos de capacitores.	96
5.6.- Corrientes y voltajes al energizar un circuito.	97
5.7.- Corriente de energización (inrush).	103
5.8.- Los apartarrayos.	104
5.9.- Desenergización de bancos de capacitores.	105
5.10.- Energización de bancos de capacitores espalda con espalda.	106
5.11.- Corriente de outrush.	114

## **CAPITULO VI PROTECCIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES**

118

6.1.- Carga y protección a frecuencia fundamental.	119
6.2.- Sobrecarga por frecuencias armónicas y su protección.	119
6.3.- Protección con fusibles.	120
6.4.- Protección con relevadores.	124
6.5.- Balanceo de un banco de capacitores.	125
6.6.- Obtención del voltaje de desbalance en el neutro de un banco de capacitores, conectado en estrella no aterrizado	126

**CAPITULO VI ESTÁNDARES INDUSTRIALES Y GUÍAS DE APLICACIÓN. 137**

7.1.- Normas del IEEE.	137
7.2.- Valores nominales de capacitores y condiciones de servicio.	138
7.3.- Tolerancia en los valores nominales.	138
7.4.- Condiciones de servicio.	140
7.5.- Límites recomendados.	140
7.6.- Límites de corriente.	141
7.7.- Otros límites de corriente.	142
7.8.- Límites de voltaje.	144
7.9.- Aplicación de normas.	145
7.10.- Especificaciones internacionales.	148
7.11.- Corriente de energización.	150
7.12.- Capacidad de fusibles.	152
7.13.- Fusible limitadores de corriente.	153
7.14.- Tópicos de protección de capacitores.	153

**CAPITULO VIII.- OPERACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES EN DERIVACIÓN  
EN EL NIVEL DE 115 KV, EN LA SUBAREA DE CD. JUÁREZ,  
CHIH. 156**

8.1.- Antecedentes.	156
8.2.- Objetivos del estudio.	160
8.3.- Corrientes armónicas.	160
8.4.- Reactor serie.	163
8.5.- Análisis de resultados.	163
8.6.- Sobrevoltajes transitorios.	173
8.7.- Condiciones de desbalance.	178
8.8.- Comentarios de la puesta en servicio	184

**CONCLUSIONES 186**

**BIBLIOGRAFÍA 187**

## INTRODUCCIÓN

La incorporación al Sistema Eléctrico de bancos de capacitores en derivación, en el nivel de transmisión, se efectúa con mayor frecuencia hoy en día. Su incorporación es principalmente para proporcionar un soporte de voltaje en la red de transmisión. La interacción entre capacitancias e inductancias, elementos que siempre están presentes en todo Sistema Eléctrico, puede, en un momento dado, provocar condiciones resonantes, las cuales se manifiestan por el incremento de corrientes y voltajes en los diferentes componentes que integran al Sistema Eléctrico, y por consiguiente, provocar fallas en los aislamientos de dichas componentes. Por lo anteriormente expuesto, consideramos que es imprescindible analizar la interacción entre los bancos de capacitores en derivación y el Sistema Eléctrico.

Por las razones anteriores, la incorporación de bancos de capacitores en derivación en las redes de transmisión, se efectúa cada vez con mayor frecuencia, dado que la carga crece constantemente y las unidades generadoras tienden a operar con bajo factor de potencia al suministrar la potencia reactiva requerida. El costo de producir y transmitir esa potencia reactiva, nos da la oportunidad de incorporar otros equipos como pueden ser los compensadores estáticos de reactivos y los bancos de capacitores en derivación. Debido al alcance y aplicación de estos dos equipos tan diferentes, consideramos conveniente acotar el presente trabajo, exclusivamente, al análisis de los bancos de capacitores.

Los beneficios proporcionados por la aplicación de bancos de capacitores son numerosos. Sin embargo, también se presentan situaciones que involucran problemas de resonancias y de sobretensiones transitorias; ya sea durante su energización o desenergización. Este tipo de problemas constituye un reto para que podamos hacer uso de los conocimientos y técnicas aprendidas, así como de nuestras habilidades personales.

## CAPITULO I

### FABRICACIÓN DE CAPACITORES

El capacitor eléctrico o condensador, fue descubierto en el año de 1745 por Von Kleist, en Camin in Pommern y poco después e independientemente, por Cunaeus y Muschenbroek en Leyden. En su primera versión, consistió de un cilindro de vidrio recubierto en sus paredes interna y externa por una laminilla metálica y fue utilizado como "almacenador" o "condensador" de cargas eléctricas.

En 1746, Wilson enunció la ley que indica que la cantidad de carga eléctrica almacenada es inversamente proporcional al espesor del medio aislante interpuesto entre las laminillas metálicas. Más tarde, en el año 1830 aproximadamente, Faraday descubrió que dicha carga eléctrica dependía también del medio aislante empleado, mostrando que la "capacidad de almacenamiento específica" de sustancias tales como el azufre, la laca y el vidrio, era considerablemente mayor que la del aire. Faraday en sus estudios y experimentos, introdujo el concepto de dieléctrico y determinó las primeras constantes dieléctricas conocidas.

Sin embargo, fue hasta principios del siglo veinte cuando empezó a fabricarse el capacitor en forma industrial. De un primer período de demanda insignificante, el capacitor pasó rápidamente a representar un dispositivo indispensable en la explosión tecnológica de nuestro siglo. Se utilizó inicialmente como supresor de la chispa eléctrica en la desconexión de bobinas de inducción y pronto se multiplicaron sus aplicaciones, especialmente hacia la técnica de los sistemas de comunicación.

El desarrollo acelerado de la telegrafía sin hilos y la radiodifusión, dió impulso definitivo a la técnica del capacitor. Desde un principio se utilizaron dieléctricos de papel impregnado en laca, cera de abejas y parafina y poco más tarde, papel impregnado en aceite mineral, naftaleno, petróleo, aceite de siliconas y polybutano. Según las aplicaciones específicas, también se han venido utilizando dieléctricos de vidrio, cerámica, mica, óxidos de aluminio o



#### CARACTERISTICAS DE FABRICACION DE CAPACITORES

tántalo, electrolitos (ácido bórico, ácido fosfórico...etc.), plástico laminado e incluso aire; siempre en un esfuerzo constante de obtener un dieléctrico con las mejores características para cada aplicación concreta.

Una de las aplicaciones más importantes del capacitor ha sido la de corregir el factor de potencia en líneas de transmisión, distribución y en instalaciones industriales. Logrando con ello, incrementar la capacidad de transmitir energía en las líneas, aumentar la energía activa disponible en los generadores eléctricos, elevar el aprovechamiento de la capacidad de los transformadores, mejorar la regulación de voltaje en los puntos de consumo; y en general, incrementar la eficiencia de la transmisión y distribución de la energía eléctrica. Todo esto, a un costo considerablemente más bajo que el que se tendría con la inversión en nuevas líneas de transmisión, distribución y equipo o maquinaria necesarios para producir el mismo efecto de regulación de voltaje o aumento de la energía activa disponible. El capacitor dedicado a estos fines, es el llamado capacitor de potencia.

El uso del capacitor de potencia se inició aproximadamente en el año 1914. Durante los primeros años se fabricó con dieléctricos de papel impregnado en aceite mineral. En el año 1932 se sustituyen los aceites minerales por la introducción de los askareles (hidrocarburos aromáticos clorados, como el epoclor, diaclor y piraclor) como impregnantes. Esto produjo una verdadera revolución en la técnica de los capacitores de potencia; pues bajaron bruscamente los tamaños, pesos y costos de las unidades, lográndose además un gran avance en la seguridad de su uso, debido al hecho de ser un buen dieléctrico el nuevo impregnante.

En el año 1937, se produjo otro avance considerable, al aparecer el capacitor de potencia para uso tipo intemperie. Desde entonces, el uso de capacitores de potencia se ha venido incrementando año tras año, de una forma extraordinaria.

La calidad de las materias primas han venido experimentado constantes mejoras, que ha hecho posible un logro de unidades cada vez más estables, compactas, seguras y de una vida media más duradera.

Al uso de celulosa más pura y laminada con mayor precisión se han ido agregando sustancias purificadoras y estabilizadoras, como son: óxidos de aluminio, ciertas resinas... etc., que junto con una mejor purificación del impregnante, han venido incrementando paulatinamente la calidad de los dieléctricos.

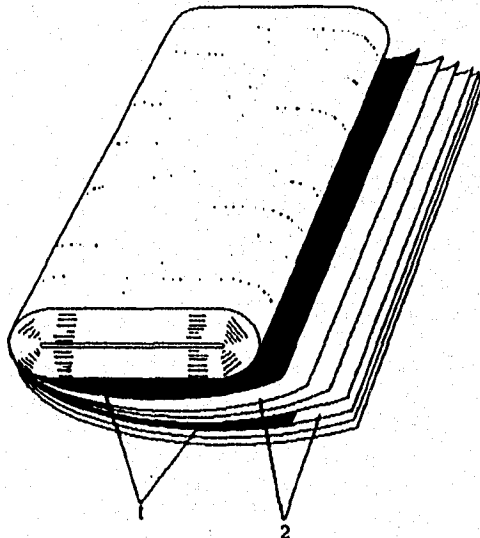
#### CARACTERISTICAS DE FABRICACION DE CAPACITORES

La introducción de los dieléctricos de plástico en los capacitores de alta tensión, ha marcado un nuevo paso adelante en la tecnología del capacitor de potencia. El nuevo sistema dieléctrico, a base de papel-plástico-askarel, ha hecho posible la aparición de unidades significativamente más compactas, más resistentes a las descargas parciales, de mayor vida media y pérdidas dieléctricas considerablemente más bajas. Aunque cabe mencionar, que el askarel se eliminó para aplicarse en la fabricación del capacitor en el año de 1970 por ser un líquido *no biodegradable* y contaminante para el medio ambiente. Siendo sustituido por aceites sintéticos como es el EKONOL III. Que es lo que se denomina como tecnología *ALL FILM*, plástico-aluminio-ekonol III.

### 1.1 FABRICACION DE CAPACITORES DE POTENCIA.

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

La hoja de aluminio y el dieléctrico se bobinan dentro de una sección, labor que realiza la maquina mostrada en la figura 1.5. 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.



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

Figura. 1.1 Bobina capacitadora

Las combinaciones serie-paralelo de bobinas o elementos capacitivos se envuelven con un aislamiento, el cual se determina de acuerdo al nivel de aislamiento, y se alojan dentro de una caja metálica, donde se debe conectar un resistor de descarga entre los polos resultantes de las combinaciones serie-paralelo de los elementos, y esto los podemos observar ya sea en la figura 1.2 y 1.5. Por separado, se ensambla un conector boquilla en lo que será la tapa del recipiente metálico mencionado soldándolo herméticamente quedando un tubo u orificio para impregnación.

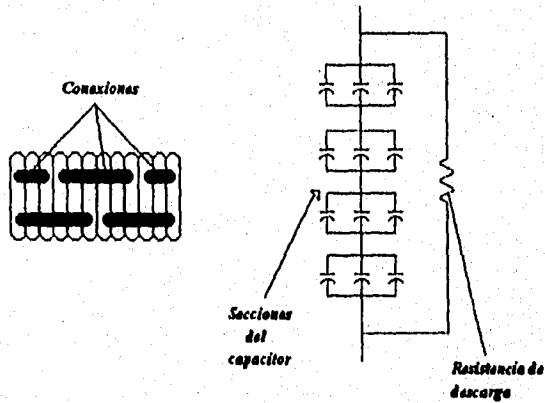
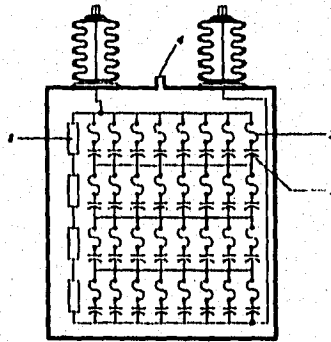


Figura 1.2 conexiones de bobinas capacitivas



- 1.- Resistencia de descarga
- 2.- Fusible (interno)
- 3.- Bobina o elemento capacitivo
- 4.- Orificio para impregnación

Figura 1.3 Integración de una unidad capacitiva

CARACTERISTICAS DE FABRICACION DE CAPACITORES

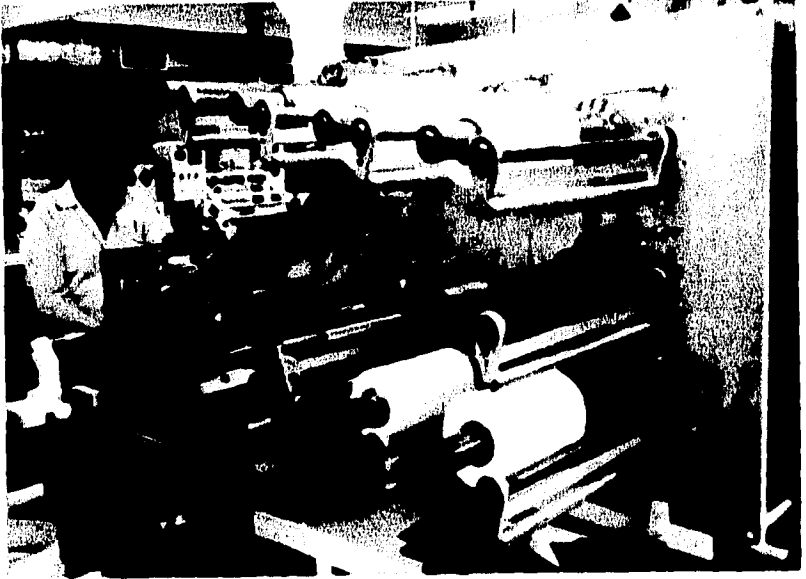


Figura 1.4 Máquina bobinadora

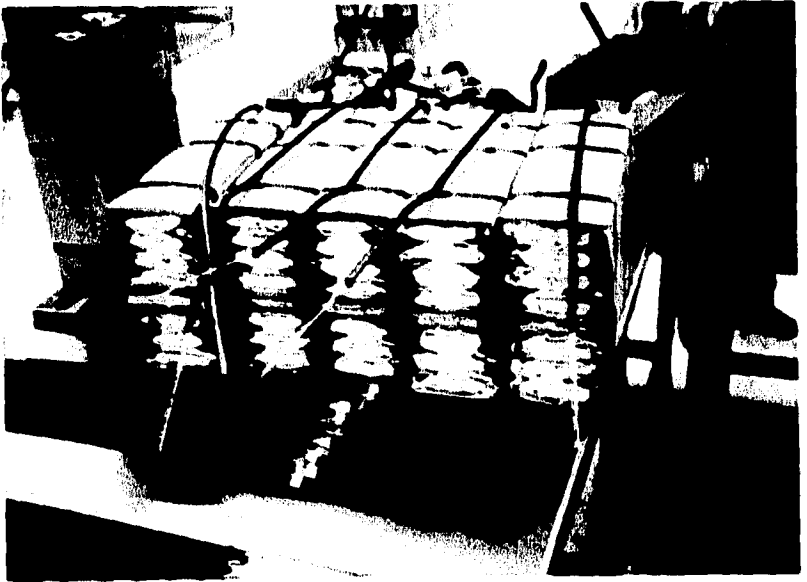
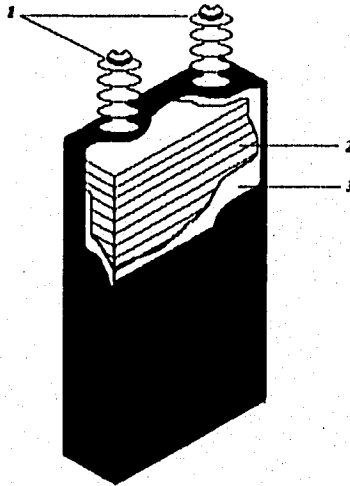


Figura 1.5 Secciones serie-paralelo de una unidad capacitora

#### CARACTERÍSTICAS DE FABRICACION DE CAPACITORES



- 1.-Roquilla
- 2.-Bobina o elemento capacitivo
- 3.-Aislamiento de la caja

Figura. 1.6 Vista exterior de una unidad

La unidad (capacitor) se suelda en su totalidad y se procesa haciendo un vacío interno para sacar los gases y la humedad que pudiese haber absorbido. Al mismo tiempo se aplica temperatura para facilitar esta etapa, en seguida 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, por lo que hay mejor distribución de voltaje, evitando el efecto corona y tener un buen funcionamiento térmico.

El dieléctrico se conforma 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 construye la sección conductora de voltaje demasiado delgada, provoca que el espesor deseado de las láminas del dieléctrico individuales, sean tan delgadas que dificultan su manejo en el proceso de fabricación del capacitor.

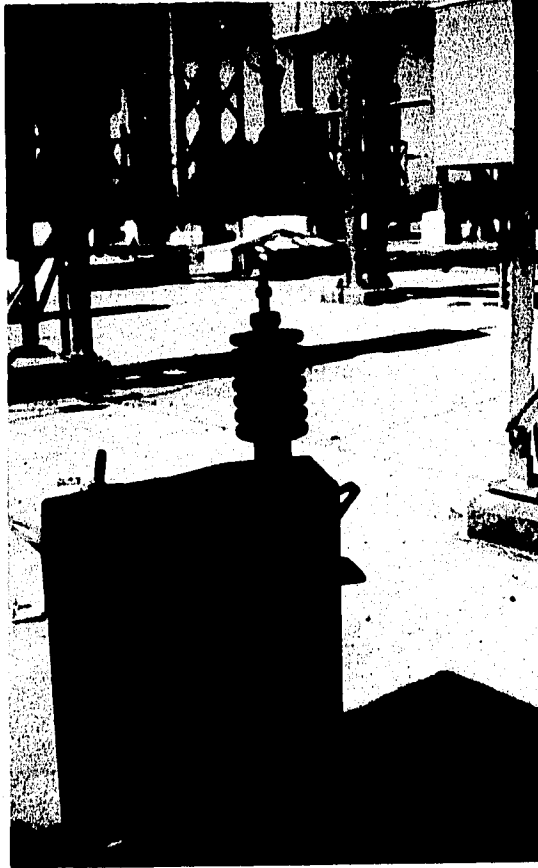


Figura 1.6 Vista real exterior de una unidad capacitadora

En la figura 1.3 se ilustra la configuración interna de una unidad capacitadora con fusibles internos y posteriormente en la 1.6 se muestra en su forma física la parte exterior de la unidad capacitadora.

Pero si se construye la sección de voltaje muy gruesa, resulta un espesor considerable 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 voltajes es una optimización para dar una operación confiable en forma económica.

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

El diseño, manufactura y prueba inciden directamente en la seguridad de la unidad capacitadora, así como 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 dieléctrico depende de la capacidad y la 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 esta etapa la fabricación.

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 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 efecto corona depende de los extremos de la 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 buen dieléctrico con el objeto de reducir el efecto corona. La fabricación del capacitor requiere preocupación permanente en el resto de su construcción, ya que se ve afectada por:

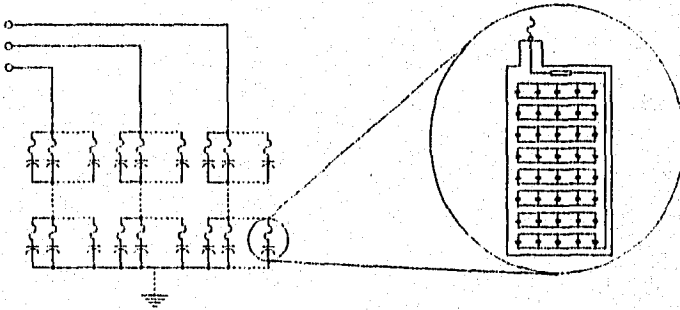
- Integridad de las soldaduras
- Durabilidad de los terminados
- Calidad de la soldadura
- Preparación para el embarque

## 1.2 FUSIBLES INTERNOS Y DE FUSIBLES EXTERNOS

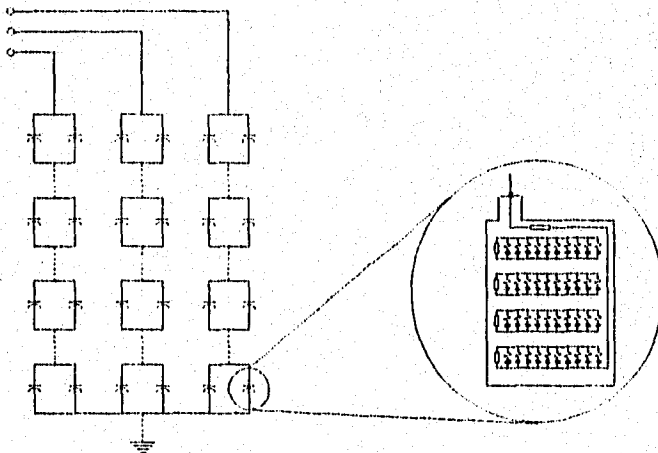
En las unidades capacitoras provistas con fusibles internos, se conecta un listón fusible en serie con cada paquete, bobina o elemento. Cada unidad capacitadora se construye con un gran número de bobinas o elementos conectados en paralelo y con unos pocos grupos de elementos conectados en serie. En general, los bancos de capacitores que usan fusibles internos, están configurados con menos unidades capacitoras en paralelo y más grupos de unidades en serie, que los bancos que emplean unidades capacitoras con fusible externo. Esta construcción es justamente la opuesta a la que se tiene en las unidades capacitoras con fusible externo, que generalmente emplean un gran número de grupos de bobinas o elementos en serie, y cada grupo con menos bobinas conectadas en paralelo.

Cuando el fusible de una unidad capacitadora opera, se puede presentar una condición de desbalance que sujeta a las unidades en el mismo grupo serie a un sobrevoltaje de 60 Hz. Un criterio común es limitar este sobrevoltaje a 110% con una unidad fuera. El fusible debe abrir lo suficientemente rápido para que no se dañen las unidades sanas debido a este sobrevoltaje.

CARACTERÍSTICAS DE FABRICACION DE CAPACITORES



(a)



(b)

Figura 1.5 Unidades capacitadoras provistas con (a) fusibles externos y (b) con fusibles internos

### 1.3 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 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 un valor de 50 volts en 5 minutos o menos (Norma de E.U. IEEE STD 18). 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.

$$R_d = \frac{t}{C_n \times \ln \left( \frac{\sqrt{2} \times V_n}{V_r} \right)}$$

donde:

- R<sub>d</sub> - Resistencia de descarga
- t - Es el tiempo de descarga
- C<sub>n</sub> - Capacitancia nominal de la unidad capacitadora
- V<sub>n</sub> - Voltaje nominal de la unidad capacitadora
- V<sub>r</sub> - Voltaje residual

Como resultado de estas pruebas, se han hecho muchos cambios que incluyen:

- Incrementos en el tamaño de la terminal conectora.
- 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 del elemento contenedor.

#### 1.4 FACTORES QUE AFECTAN LAS PÉRDIDAS

Las pérdidas de energía en un capacitor son determinados por las pérdidas en el dieléctrico, el calentamiento de la resistencia de descarga y por las pérdidas del conductor (láminas)  $I^2R$  (contacto).

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 menores 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, como se menciona en la sección anterior. 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  $I^2R$  del conductor se afectan por el diseño del capacitor, el número y localización de conexiones o taps entre bobinas, etc.

### 1.5 FACTORES QUE AFECTAN LA ECONOMÍA EN LA FABRICACIÓN DE CAPACITORES.

Los kVAR capacitivos que pueden obtenerse a partir de un volumen dado son:

$$Q = kVARC = 1000(2\pi f)E_0 * K * v \left( \frac{KV}{t} \right)^2$$

donde:

f - frecuencia nominal

E<sub>0</sub> - permeabilidad del espacio libre

K - constante dieléctrica efectiva

v - volumen del dieléctrico

KV - voltaje RMS aplicado al capacitor en kV

t - espesor del dieléctrico

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 volumen 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 actualidad, 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.

## 1.6 PARÁMETROS DE DISEÑO Y FABRICACIÓN.

Es necesario para entender los problemas que existen durante el diseño, fabricación y también durante el control de calidad de capacitores de potencia, mencionar los parámetros de diseño y fabricación importantes.

### 1.6.1 *Parámetros de diseño*

- Esfuerzo dieléctrico alto, que se encuentra en el orden de 50-55 Vrms/micrones a través de la película a voltaje nominal.
- Una delgada hoja de relleno, de casi 30 micrones para un dieléctrico de 1500 V, generalmente formado por 2 películas.
- Ampliación de áreas aisladas, aproximadamente 500 m<sup>2</sup> en una unidad de 250 KVAR con elementos de 1500 V.
- Unidades de considerable tamaño, o sea, entre 250-300 KVAR a 60 Hz.

### 1.6.2 *Secuencia de fabricación*

- Los materiales sólidos dieléctricos y las hojas electrodo de aluminio se enrollan en una máquina bobinadora especial para formar un elemento con dimensiones determinadas.
- Los elementos se apilan uno arriba del otro junto con un entreelemento aislante y en grupo serie aislante para crear un paquete de ciertas dimensiones.
- Posteriormente 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 boquillas, etc.
- Uno o varios de esos paquetes forman generalmente el interior de una unidad capacitadora y se le enrollará con aislamiento externo al contenedor.
- Una vez que este paquete se encuentra casi completo, se coloca en el interior del contenedor metálico, y después es equipado con las terminales y boquillas. Un pequeño tubo de impregnación el cuál se encuentra en el contenedor, será ahora la única entrada al interior de la unidad.

- Después la unidad es expuesta a un proceso de secado en vacío con alta temperatura. Cuando está completamente seca, es llenada e impregnada con cierto fluido, que previo a este proceso de llenado, se ha tratado y probado separadamente.
- Una vez que se elimine la grasa y se realicen las pruebas contra fugas, se llevarán a cabo las pruebas dieléctricas.
- Ya que se han pintado y equipado con abrazaderas o herrajes de conexión, placas con datos, etc., pueden también ser montadas en estructuras, las unidades quedan listas para embarque.

### **1.7 PRUEBAS Y CONTROL**

Se hace mención en este capítulo de la pruebas y control de fabricación, ya que por medio de estas se pueden comprobar las características de los bancos de capacitores.

Cuando se analizan los parámetros de diseño y los pasos de fabricación, resulta obvio que para tener un capacitor o banco de capacitores de potencia, de alta calidad, se debe de tener un control de materias primas, un proceso de fabricación que sea rigurosamente supervisado y un sistema de control y pruebas seguro. El sistema que se ha utilizado para asegurar la calidad de los capacitores de potencia consisten en:

1. Exposición de cada unidad a una serie de pruebas de rutina.
2. Control de el diseño de una unidad exponiendo algunas unidades a varias pruebas de tipo independiente y también una exposición de algunas unidades a pruebas especiales.

Por otra parte las medidas de control de calidad han sido:

- a) Supervisión y control de todas las etapas de fabricación con un programa de aseguramiento de calidad.

Exposición de las unidades con defectos de diseño y las unidades fabricadas de acuerdo a procesos distintos a pruebas severas de resistencia para determinar los parámetros que estos tendrán en las diferentes condiciones de servicio.

Para comprender el porque se necesitan, la prueba de resistencia y un PAC, es necesario entender el objetivo de las diferentes pruebas de rutina, pruebas tipo y pruebas de control de calidad.

Cabe señalar que las pruebas de rutina o de tipo se llevarán a cabo, siempre que sean requeridas en una norma nacional.

### **1.7.1 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 boquilla 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

Los propósitos de esta serie de pruebas de rutina son: Descartar las unidades que tienen valores medidos fuera de los límites de tolerancia, o que no soportan los voltajes aplicados y además se obtiene la capacitancia individual y los valores del factor de pérdidas en cada unidad.

Ya que la hoja del dieléctrico es delgada y que hay grandes áreas aisladas, habrá un porcentaje de falla por imperfecciones de fabricación. Pero este porcentaje de falla no es un índice muy preciso para cuestionar la calidad de un diseño, del material y de la fabricación de las unidades. 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 aplicara con corriente alterna ( $2.15 V_n$ ) en lugar de aplicarla con corriente directa ( $4.3 V_n$ ) que son las dos opciones normalizadas.



Habr  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 sobretensiones, especialmente a temperaturas de operación bajas.

Por otra parte, 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" (all film) y los de dieléctrico mezclado, que tienen buen margen a la inestabilidad térmica o a temperaturas del dieléctrico para las cuales 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 en voltaje nominal.

Todas las pérdidas se miden con voltaje nominal a temperaturas de  $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$  en el dieléctrico. El factor de pérdidas medido después de 20 horas de servicio ha sido marcado como 100% para cada unidad probada. La dificultad para medir valores de pérdidas del orden de 0.2 watts/kVAR es un aspecto que hay que tomar en cuenta.

### ***1.7.2 Pruebas prototipo***

Son pruebas separadas, en las cuales han de ser sometidas unidades de cada diseño diferente. Estas pruebas est n bajo la norma internacional IEC70

- ◆ **Determinación de pérdidas a temperaturas elevadas**
- ◆ **Prueba de estabilidad térmica**
- ◆ **Prueba de voltaje de CA seco y húmedo entre terminales y contenedor (aplicado a unidades de contenedor aislado)**
- ◆ **Prueba de voltaje de impulso entre terminales y contenedor (para terminales de contenedor aislado)**
- ◆ **Prueba de descarga**
- ◆ **Prueba de ionización**

- ◆ Las unidades con fusibles internos deben exponerse, de acuerdo a la IEC593
- ◆ Prueba de perforación de elemento
- ◆ Prueba de calda de voltaje
- ◆ Prueba de resistencia dieléctrica

El propósito de estas pruebas es asegurarse que las unidades sean adecuadas para las condiciones de servicio especificadas.

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 el tipo de aislamiento seleccionado.

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 son los que tienen un alto margen para inestabilidad térmica.

La medición de pérdidas a temperaturas elevadas (generalmente medidas al final de la prueba de estabilidad térmica) se puede utilizar únicamente como comprobación de que no se ha excedido un cierto nivel contractual de pérdidas máximas para esta condición específica.

La prueba de descarga se utiliza para comprobar que el diseño de cierta unidad soportará las fuerzas electromagnéticas que pueden ocurrir durante transitorios en servicio.

La prueba de ajuste de voltaje de corriente directa (NEMA) a  $6.25 V_n$  en diseños especiales, siempre indica que existe la probabilidad de que ocurra una perforación en una unidad que anteriormente solo ha sido probada a  $4.3 V_n$  con CD, o probada a  $2.5 V_n$  de CA.

Por último tenemos que para los resultados de estas pruebas, 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 iguales.

#### **1.7.4 Pruebas de resistencia**

Durante los últimos 15 años, el diseño de capacitores ha cambiado completamente, ya que, se ha usado película para reemplazar el papel en el dieléctrico y además se han venido desarrollando nuevos líquidos impregnantes.

Estas innovaciones han permitido incrementar el esfuerzo dieléctrico, con factores de pérdidas bajos que han conducido al uso de densidades de potencia más altos lográndose con ello obtener más potencia por cada unidad a menor tamaño.

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 que se denominan pruebas de resistencia.

Resulta muy claro que para recibir una respuesta de una prueba de resistencia, dentro de un tiempo razonable, el capacitor tiene que ser sometido a grandes esfuerzos. Pero es muy importante que al esfuerzo de prueba aplicado (voltaje, temperatura, etc) no se le deje causar cualquier fenómeno irreal en el capacitor, por ejemplo, un deterioro térmico del dieléctrico debido a temperaturas en un punto. De este modo el dieléctrico puede soportar un gran número de transitorios sin sufrir daño permanente. Debido a la naturaleza de los dieléctricos impregnados, estos requieren soportar con mayor frecuencia interconectados con el servicio a bajas temperaturas. De esta manera el dieléctrico no presenta deterioro durante una larga exposición a altos esfuerzos y temperatura cuando es sometido a sobrevoltajes transitorios.

## CAPITULO II

### CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE UNA BANCO DE CAPACITORES

#### 2.1 VALORES NOMINALES DE UNIDADES CAPACITORAS

Los parámetros que determinan a una unidad capacitora se indican a continuación:

- |                      |  |
|----------------------|--|
| a) Marca             | h) Clase de aislamiento entre terminal y caja (o tierra) |
| b) Potencia          | i) Valor de la resistencia de descarga                   |
| c) Voltaje           | j) Temperatura   |
| d) Corriente nominal | k) Tipo de servicio (intemperie, interior)               |
| e) Capacitancia      | l) Tipo de impregnante                                   |
| f) Frecuencia        | m) Fecha   |
| g) Número de serie   | n) Lugar de fabricación                                  |

A continuación se presenta un ejemplo en el cual se observan los parámetros que identifican a una unidad capacitora.

Marca	-----		Niv. de aisl.	125 000	Volts
Potencia	300	KVAR	R. descarga	16	Mohms
Voltaje	13 280	Volts, rms	Temperatura	-10/40	°C
Corriente	15.5	Amperes	Servicio	Intemperie	
Capacitancia	3.00	µF	Impregnante	Biodegradable	15 dm <sup>3</sup>
Frecuencia	60	Hz	Fecha	9-1989	
No. de Serie	3928921		Lugar	-----	

### 2.1.1 Tolerancias en los valores nominales <sup>11</sup>

- Los capacitores deberán proporcionar una potencia no menor a su valor nominal, ni mayor al 115% de este valor, a tensión y frecuencia nominal, medidos a una temperatura interna y uniforme en el gabinete o contenedor de 25 °C.
- Los capacitores pueden operar de manera permanente al 135% de su potencia nominal. Esta potencia máxima incluye los siguientes factores:
  - Voltaje de operación superior al valor nominal
  - Presencia de corrientes armónicas
  - Valores de capacitancias superiores a los límites permitidos
- El voltaje de operación no deberá ser mayor del 110 % del voltaje nominal, rms.
- La corriente de operación no deberá ser superior al 180 % de la corriente nominal, rms, incluyendo corriente fundamental y corrientes armónicas.
- El valor de la capacitancia puede variar dentro de un margen comprendido entre 0 y +15% de su valor nominal.
- Los capacitores están diseñados para operar en forma continua a la intemperie, con ventilación no restringida, y a la luz directa del sol bajo temperaturas ambientales de acuerdo a lo especificado por el usuario.

## 2.2 VALORES MÁXIMOS MOMENTÁNEOS QUE DEBEN SOPORTAR LOS CAPACITORES

Los capacitores deben ser capaces de soportar durante toda su vida útil esperada (20 años, aproximadamente), sobrevoltajes momentáneos con valores picos de hasta  $1.2\sqrt{2}$  veces el voltaje rms nominal, considerando la presencia de armónicas, pero excluyendo los producidos por transitorios.

En la tabla 2.1 se muestran los límites máximos permisibles de sobrevoltajes momentáneos, a frecuencia fundamental, que soporta un capacitor 300 veces en su vida útil (20 años, con una probabilidad del 90%).

TIEMPO QUE PERMANECE APLICADO EL SOBREVOLTAJE	MÁXIMO VALOR MOMENTÁNEO PERMISIBLE DE VOLTAJE APLICADO (FACTOR DEL VOLTAJE NOMINAL, RMS)
6 ciclos	2.20
15 ciclos	2.00
1 segundo	1.70
15 segundos	1.40
1 minuto	1.30
30 minutos (cada 24 horas)	1.25

Tabla 2.1 Límites máximos permisibles de sobrevoltajes momentáneos, a frecuencia fundamental, que debe soportar un capacitor.

### 2.3 VALORES MÁXIMOS TRANSITORIOS QUE DEBEN SOPORTAR LOS CAPACITORES

Dado que un capacitor está expuesto a sobrevoltajes provocados por descargas atmosféricas y/o por maniobras, su diseño considera la magnitud de los posibles sobrevoltajes a los que puede estar sujeto. En la tabla 2.2 se indica el número esperado de transitorios por año, que debe poder soportar un capacitor o bien una unidad capacitadora.

PROBABLE NÚMERO DE TRANSITORIOS AL AÑO, QUE DEBE SOPORTAR EL CAPACITOR	MÁXIMO VALOR PICO PERMISIBLE, DE VOLTAJE APLICADO (FACTOR DEL VOLTAJE NOMINAL, RMS)
4	5.0
40	4.0
400	3.4
4000	2.9

Tabla 2.2 Límites máximos permisibles de sobrevoltajes transitorios que debe soportar un capacitor

Se espera también, que un capacitor ( o una unidad capacitadora) soporte la magnitud de las corrientes transitorias indicada en la tabla 2.3.

PROBABLE NÚMERO DE TRANSITORIOS AL AÑO, QUE DEBE SOPORTAR EL CAPACITOR	MÁXIMO VALOR PICO PERMISIBLE, DE CORRIENTE APLICADA (FACTOR DE LA CORRIENTE NOMINAL, RMS)
4	1500
40	1150
400	800
4000	400

Tabla 2.3 Límites máximos permisibles de sobrecorriente transitoria que debe soportar un capacitor

Al realizar una selección de capacitores para una aplicación determinada se debe tomar en cuenta a cuatro parámetros, los cuales son los siguientes:

## CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE UN CAPACITOR

1. Voltaje
2. Corriente
3. kVAC
4. Temperatura ambiente.

1.- El límite de la aplicación de sobrevoltaje que se recomienda se encuentra ilustrado en la tabla 1. En esta figura se muestra la aplicación del voltaje mediante el elemento activo del capacitor. Debe considerarse que para unidades no conectadas al recipiente, el nivel básico de impulso es aplicado al aislamiento que se encuentra entre el elemento activo y el recipiente. El nivel básico de impulso para unidades conectadas al recipiente se refiere solamente al esfuerzo del bushing o boquilla. A continuación se mencionan algunas circunstancias que han conducido a extender los límites recomendados.

a) El reencendido en los interruptores del capacitor produce voltajes en exceso de los límites de impulso que se recomiendan.

b) El elevación del voltaje en los reactores que se encuentran conectados en serie con el banco de capacitores, ya que estos se utilizan para la disminución de cortocircuito o sintonizar al banco a una frecuencia determinada.

c) La protección de bancos de capacitores trifásicos, con fusibles que agrupan a varias unidades, provocará que durante un corto circuito en una de las unidades; haya mayor posibilidad de que se tengan sobrevoltajes en las unidades que están en paralelo, y estos sobrevoltajes pueden exceder los límites recomendados por el fabricante.

d) Si el voltaje en el bus de la subestación se mantiene continuamente por encima del valor nominal, se puede someter al equipo de capacitores a un voltaje que esté por arriba del recomendado. Por lo tanto, en una aplicación real deberá ser considerada esta situación.

e) La presencia de armónicas, además de crear una corriente alta y por consecuencia una 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.



Dichas aplicaciones pueden ocurrir cuando los capacitores paralelo se apliquen 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 recomendados, exponen a la unidad capacitadora a un posible daño. Según la importancia que se dé a la confiabilidad de una instalación, se deberán evitar los voltajes por encima de los límites recomendados para minimizar los riesgos en la probabilidad de falla del equipo.

2.- El límite de la aplicación que se recomienda para sobrecorriente en unidades capacitoras se ilustra en la tabla 2.3. Esta aplicación de sobrecorriente se tiene considerada en los comités de normalización de NEMA e IEEE.

Otro aspecto, que debe considerarse es la capacidad de sobrecorriente de los fusibles, interruptores, buses, transformadores de corriente (TC'S) , etc., que se emplea en los bancos de capacitores. Ya que su capacidad no será siempre la misma que la capacidad de sobrecorriente de las unidades capacitoras. Esta es la razón por la cuál las aplicaciones que se encuentran dentro del área sombreada de la tabla 2.3 deben ser verificadas con el fabricante del equipo. Las situaciones que ocurren con mas frecuencia para las cuales se deben de tener en cuenta las sobrecorrientes son:

- Instalaciones con rectificadores grandes.
- Hornos de arco o soldaduras 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 capacitadora debida solamente a la corriente. Los problemas más comunes atribuidos a la corriente, han sido fusibles fundidos y TC's quemados a causa de las sobrecorrientes armónicas. Es más común que las unidades capacitoras sean limitadas por las KVAR capacitivos totales que por la corriente únicamente.

#### CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE UN CAPACITOR

**3.- Los KVAR capacitivos totales continuos en una unidad capacitadora se deben limitar a 1.35 veces los nominales. Para determinar los KVAR capacitivos totales, se deben tomar en cuenta los siguientes factores:**

- El voltaje del sistema (en porcentaje con respecto del nominal)
- La capacitancia de la unidad como un porcentaje de la nominal (límites normales de 0 a +15%)
- La cantidad de corrientes armónicas

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

Este tipo de instalaciones en general traen como resultado la selección de unidades capacitoras, en un voltaje nominal más alto para cubrir tanto los requerimientos de voltaje como los de potencia (KVAR capacitivos). Una falla al "deratear" (cuando un elemento no opera a su máxima capacidad) las unidades en forma apropiada ha conducido a aplicar unidades que exceden los límites recomendados de KVAR capacitivos que a su vez, crea temperaturas muy altas.

**4.- Se intenta que las unidades capacitoras individuales sean estables térmicamente a 46°C y se proyectan para una temperatura ambiente promedio anual no mayor de 35°C. Los límites más realistas para equipos se encuentran en el rango de 35 a 40°C para el día más caluroso esperado en el lugar 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, como por ejemplo en aquellos edificios que en su interior contienen hornos grandes, necesita de una cuidadosa consideración de la temperatura ambiente. El calor disipado por las propias unidades se puede sumar al de la temperatura ambiente en una área cerrada. En aquellas aplicaciones en que se tiene alta temperatura, se recomienda usar un relevador que proporciona disparo.

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

## 2.4 CONEXIONES DE BANCOS DE CAPACITORES

Son cinco las conexiones de bancos de capacitores que más comúnmente son empleadas. La conexión seleccionada depende de la mejor utilización de los voltajes y capacidades nominales normalizadas, del tipo de aplicación de fusibles y del esquema de protección del banco de capacitores, como se verá posteriormente en el capítulo V. Virtualmente todos los bancos tipo subestación se conectan en estrella. Sin embargo, los bancos de distribución se pueden conectar en estrella o en delta. Los diversos tipos de conexión se ilustran en la Figura 2.10, y son:

- (a) Delta
- (b) Estrella con neutro a tierra
- (c) Estrella con neutro aislado
- (d) Doble estrella con neutro aislado
- (e) Doble estrella con neutro a tierra

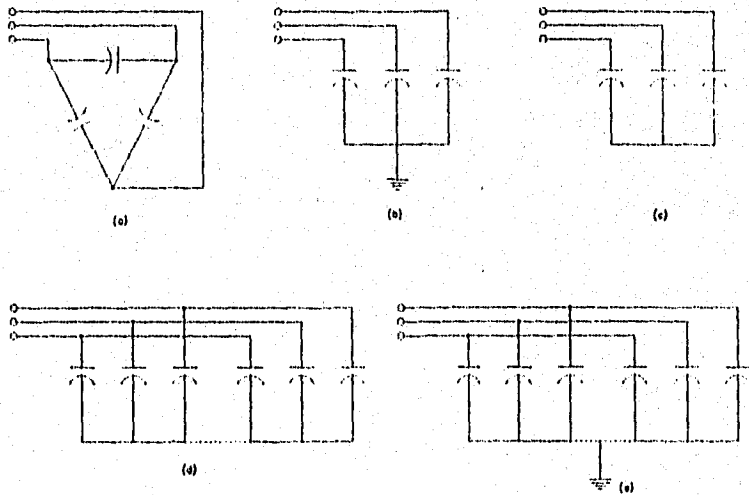


Figura 2.1 Tipos de conexiones más comúnmente empleadas en bancos de capacitores de potencia.

#### ***2.4.1 Bancos de capacitores conectados en delta***

Los bancos de capacitores conectados en delta se usan generalmente en voltajes de distribución y se configuran con un solo grupo serie de capacitores de un voltaje nominal igual al voltaje entre fases del sistema. Los bancos conectados en delta requieren de capacitores con dos boquillas y con la estructura (rack) conectada a tierra, o de unidades con una sola boquilla y un rack aislado. El uso más amplio de bancos de capacitores conectados en delta, es en 2400 Volts. Las unidades capacitoras para conexión en estrella a 2400 Volts no están disponibles como unidades de tamaño estándar.

Cuando se tiene un solo grupo serie por fase de unidades capacitoras, no se presenta sobrevoltaje en las unidades restantes como resultado del aislamiento de una unidad fallada y, por lo tanto, no se requiere detección de desbalance para protección. No puede circular corriente de secuencia cero o de tercera armónica en un banco conectado en delta. Además, cuando se usa un grupo serie por fase, los fusibles de las unidades capacitivas individuales deben ser capaces de interrumpir la corriente de corto circuito entre fases del sistema. Ésto requiere, con frecuencia, fusibles limitadores de corriente. Estos fusibles son mucho más costosos que los de tipo expulsión.

#### ***2.4.2 Bancos de capacitores conectados en estrella, con neutro a tierra***

Los bancos de capacitores conectados en estrella, con neutro a tierra, son empleados comunmente en voltajes mayores o iguales a 34.5 kV, y están compuestos de dos o más grupos serie de unidades capacitoras por fase. Los bancos de capacitores con neutro conectado a tierra proporcionan una trayectoria de baja impedancia para las corrientes transitorias provocadas por descargas atmosféricas.

También los bancos de capacitores con neutro conectado a tierra, proporcionan una trayectoria de baja impedancia para las corrientes armónicas. Estas corrientes armónicas pueden causar interferencia con las señales de comunicaciones, si los circuitos operan en paralelo con las líneas de fuerza. Adicionalmente, una fase abierta en el sistema de potencia o en el banco produce corrientes de secuencia cero que pueden provocar la operación de los relevadores de tierra. También, puede ser un problema la resonancia armónica.

Cuando se conecta el neutro a tierra, se reducen los voltajes de recuperación que se presentan durante maniobras (suitcheos). Sin embargo, se deben hacer cuidadosas consideraciones con el efecto de la corriente de energización (inrush) en el comportamiento de los relevadores de protección y en el método de conexión a tierra.

**-Un solo grupo serie por fase**

Como sucede en los bancos conectados en delta, no se presentan sobrevoltajes entre las unidades restantes al salir por falla una de las unidades capacitadoras, y por lo tanto, no se necesita una protección contra desbalance. Similarmente, las unidades capacitadoras deben ser capaces de interrumpir la corriente de falla del sistema.

**-Varios grupos en serie por fase.- Una sola estrella**

Los bancos de capacitores en estrella con el neutro a tierra conectados en voltajes por encima de 34.5 kV están compuestos generalmente de dos o más grupos serie de unidades capacitadoras conectadas en paralelo, por cada fase. La presencia de varios grupos de unidades limita la corriente máxima de falla, así que usualmente no se requieren fusibles limitadores de corriente, a menos que los kVAR en paralelo excedan de 4650 kVAR.

**-Varios grupos en serie por fase.- Doble estrella**

Cuando la capacidad requerida de un banco de capacitores, es superior a 4650 kVAR máximos por grupo, para fusibles de expulsión, o es suficientemente grande para satisfacer el requerimiento del número mínimo de unidades por grupo; el banco de capacitores se puede dividir en dos secciones en estrella. Las características del banco doble estrella con neutro a tierra, son similares a uno en estrella sencilla con neutro a tierra. Los dos neutros pueden conectarse directamente a través de una sola conexión a tierra.

### **2.4.3 Bancos de capacitores conectados en estrella, con neutro aislado**

Los bancos de capacitores con neutro aislado no permiten la circulación de corrientes de tercera armónica o el paso de las grandes corrientes de descarga capacitivas provocadas durante fallas a tierra en el sistema. Sin embargo, el neutro debe estar aislado para el voltaje pleno entre fases del sistema, ya que momentáneamente se pone a potencial de fase cuando se efectúan maniobras (suitcheo) del banco, o cuando una unidad capacitadora falla en bancos configurados con un solo grupo serie de unidades.

#### **-Un solo grupo en serie por fase**

Para sistemas con voltaje de fase a neutro que corresponde con el estándar nominal de una unidad capacitadora, se pueden utilizar bancos de capacitores conectados en estrella con un solo grupo serie por fase. Generalmente, el neutro del banco de capacitores no se conecta a tierra para evitar la necesidad de utilizar fusibles de potencia para interrumpir la corriente de falla de corto circuito del sistema. Ésto también requiere que las unidades capacitadoras de provistas de una sola boquilla, sean montadas en un rack aislado. Sin embargo, si se usan unidades con dos boquillas y con un rack conectado a tierra, el fusible de la unidad capacitadora debe ser capaz de interrumpir la corriente de falla de fase a tierra del sistema. Si se utilizan fusibles de capacidad nominal más baja, puede ser que una falla en la caja de la unidad capacitadora no sea liberada por el fusible y se requiera que la falla sea liberada por la protección contra sobrecorriente del banco de capacitores. Los bancos de capacitores en estrella con neutro aislado no requieren, en general, fusibles limitadores de corriente, ya que la corriente a través de la unidad capacitadora queda limitada a tres veces la corriente de fase normal. Sin embargo, es necesario tomar precauciones al reemplazar fusibles en un banco de este tipo ya que los capacitores fallados en fases diferentes pueden resultar en una falla entre fases del sistema.

#### **-Varios grupos en serie por fase.- Una sola estrella**

Los bancos en estrella con varios grupos en serie pueden también estar con el neutro aislado de tierra. Tales bancos no pueden, hacia adentro de ellos o hacia afuera de ellos, proporcionar ninguna protección contra sobrevoltajes (surges) transitorios, y no

proporcionan trayectoria alguna a tierra para las corrientes de tercera armónica. El banco completo, incluyendo el neutro, debe estar aislado para sobrevoltajes de línea.

**-Varios grupos en serie por fase.- Doble estrella**

Cuando la capacidad de un banco de capacitores, es superior a los 4650 kVAR máximos por grupo para fusibles de expulsión, y es lo suficientemente grande para satisfacer el número mínimo de unidades por grupo requerido; el banco se puede dividir en dos estrellas. Cuando los dos neutros están aislados, el banco tiene algunas de las características del banco conectado en una sola estrella con neutro aislado. Estos dos neutros pueden o no estar conectados entre si. Como para cualquier banco en estrella con neutro aislado, el neutro debe estar aislado de tierra para el voltaje pleno entre fases.

Es práctica utilizada en Comisión Federal de Electricidad (CFE), utilizar bancos de capacitores conectados en una sola estrella y con el neutro aislado de tierra. Las unidades capacitoras están provistas con fusibles externos tipo expulsión, y se utilizan varios grupos en serie, y a su vez, cada grupo serie constituido por varias unidades en paralelo. A continuación se indican las ventajas y desventajas de conectar o no conectar el neutro a tierra, en bancos de capacitores con conexión en estrella.

**2.4.4 Ventajas y desventajas de la conexión en estrella, con y sin el neutro conectado a tierra**

Como ya se ha mencionado, los bancos de capacitores tipo subestación, generalmente están conectados en estrella. El neutro de la estrella puede o no estar conectado a tierra; existen ventajas y desventajas a este respecto:

Las ventajas del arreglo que considera el neutro de la estrella conectado a tierra, en comparación al arreglo que considera el neutro aislado o flotante, son:

- El costo inicial del banco puede ser menor, ya que el nivel básico de aislamiento del neutro, no tiene que ser igual al del sistema.
- Se reducen los voltajes de recuperación en el conmutador del banco de capacitores

#### CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE UN CAPACITOR

- Los esfuerzos mecánicos (por ejemplo sísmicos) pueden ser menos severos para la estructura

Las desventajas del arreglo que considera el neutro de la estrella conectado a tierra, en comparación al arreglo que considera el neutro aislado, son:

- Se pueden presentar corrientes de energización (inrush) altas en las tierras y estructuras de la subestación, que puede ser causa de problemas con la instrumentación.
- El neutro conectado a tierra puede conducir corrientes armónicas de secuencia cero y causar interferencia telefónica.
- El arreglo en estrella con el neutro conectado a tierra proporciona una trayectoria de baja impedancia a las corrientes de fallas monofásicas y puede requerir reajuste de los relevadores de tierra en el sistema. Esta es una de las razones del porque los bancos en estrella con el neutro conectado a tierra, no se aplican generalmente en sistemas no aterrizados.
- En bancos de capacitores con un solo grupo serie, el arreglo en estrella con el neutro conectado a tierra, requiera la utilización de fusibles limitadores de corriente debido a las magnitudes de falla de fase a tierra.



### APLICACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

La aplicación característica de los capacitores es reducir la corriente del sistema y elevar el voltaje del mismo. No se debe pasar por alto que los KVAR's que fluyen del sistema causan pérdidas. Si los KVAR's demandados por la carga se suministran ahí mismo, esto implica que las pérdidas se reduzcan. En realidad para un F.P. de 0.9 en la carga, los KVAR's suministrados desde las áreas de generación son del orden de 2 a 3 veces mayores que los requeridos por la carga.

Algunos de los beneficios que se logran con la aplicación de capacitores son los siguientes:

- a).- Corrección de factor de potencia
- b).- Incremento del nivel de voltaje (incremento en el nivel de transmisión)
- c).- Reducción de pérdidas

En la operación de los sistemas eléctricos de potencia 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 lugar de su consumo, invitan reflexionar sobre algunas consideraciones con respecto a los elementos que consumen estos reactivos, admitiendo 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:

## APLICACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

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 bancos de capacitores. Estos proporcionan la potencia reactiva de carácter capacitivo que sea necesaria, pudiéndose 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 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.

Según las normas americanas, se denominan capacitores de alta tensión aquellos cuyo voltaje nominal oscila entre 2400 volts y 19920 volts, tomando cualquiera de los voltajes nominales entre fase y neutro de las líneas de distribución de hasta 34.5 kV.

Cuando se conectan capacitores en paralelo o derivación en un sistema eléctrico, forman una fuente estática de corriente reactiva.

Teóricamente, toda la carga tanto real como reactiva debe ser suministrada 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 eso 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 nos lleva 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.

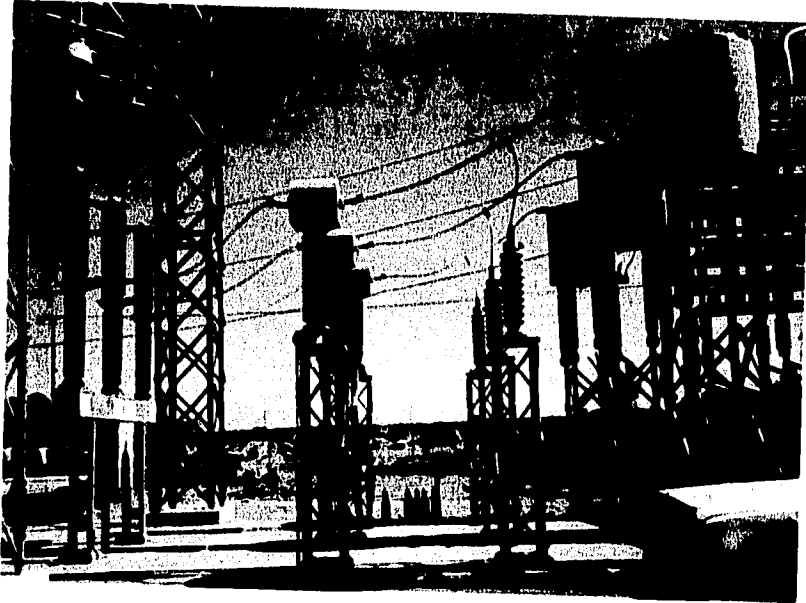
La ubicación óptima de un banco de capacitores en el sistema de potencia sólo se puede determinar con un análisis completo y exhaustivo del sistema de potencia, tanto desde el punto de vista económico de su operación. Sin embargo, la mayoría de quienes planean el sistema, no buscan la aplicación óptima de los capacitores. Inicialmente, cuando una compañía requiere de compensación reactiva instalará bancos fijos o con interruptores en alimentadores de distribución.

Tres cuartas partes de la carga reactiva de un sistema de potencia 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 cierta forma 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, será una 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:

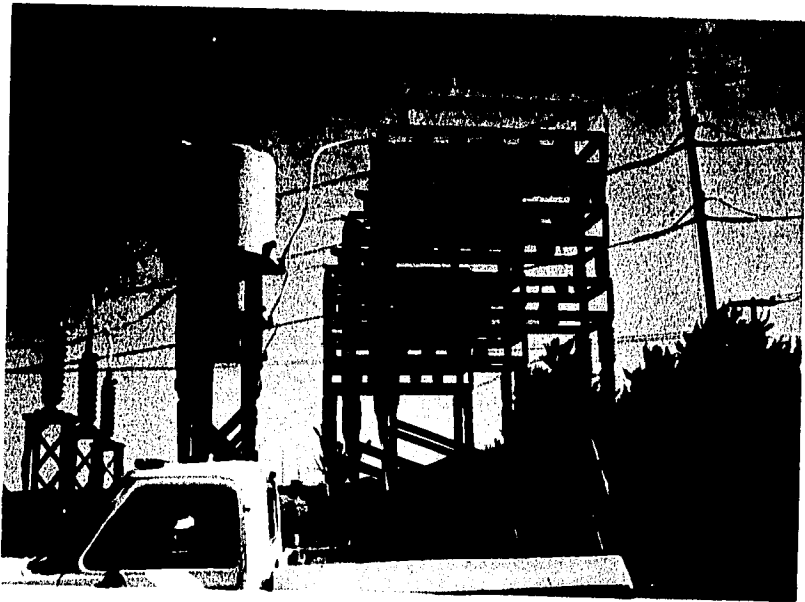
- 1.- Compensar su propia carga reactiva.
- 2.- Compensar en los circuitos de distribución los VARS acumulados de la carga.

La instalación de capacitores en los sistemas de distribución, es el primer paso para llevar el factor de potencia a la unidad en 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. La instalación de grandes bancos de capacitores de alto voltaje se ilustra en la figura Figura.3.1, en la cual se muestra la disposición física de interruptores, transformadores de corriente, apartarrayos, reactores de amortiguamiento y del banco de capacitores.

APLICACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES



a)



b)

Figura 3.1 Ubicación del banco de capacitores de 115 kV y equipo asociado en la subestación Ríverola

### 3.1 EFECTOS DE LOS CAPACITORES EN DERIVACIÓN

Como se menciona anteriormente los capacitores en derivación son una fuente estática de corriente reactiva. La figura 3.2 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 lo tanto necesario el completo entendimiento de este principio básico.

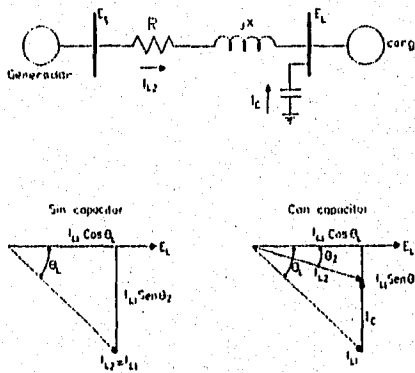


Figura. 3.2 Diagrama unifilar y vectorial del efecto del capacitor en derivación

### 3.2 FUNDAMENTOS SOBRE LA COMPENSACIÓN DE CORRIENTE REACTIVA

En las redes eléctricas de corriente alterna, se pueden distinguir dos tipos fundamentales de cargas: Cargas óhmicas o resistivas y cargas reactivas.

Las cargas resistivas toman corrientes que se encuentran en fase con la tensión aplicada a las mismas; debido a esta circunstancia, la energía eléctrica que consumen se transforma por completo en trabajo mecánico, en calor o en cualquier otra forma de energía no retornable directamente a la red eléctrica. Este tipo de corrientes se conocen como corrientes activas.

Las cargas reactivas ideales toman corrientes que se encuentran desfásadas  $90^\circ$  respecto a la tensión aplicada y, por consiguiente, la energía eléctrica que les llega no se consume en ellas sino que se almacena en forma de campo eléctrico o magnético, durante un corto lapso (un cuarto de ciclo), y regresa a la red en un tiempo idéntico al que tardó en almacenarse. Este proceso se repite en forma periódica, siguiendo las oscilaciones de la tensión aplicada a la carga. Las corrientes de este tipo se conocen como corrientes reactivas.

Una carga real siempre puede considerarse como compuesta por una parte puramente resistiva, dispuesta en paralelo con otra parte reactiva ideal. En cargas eminentemente resistivas, como lámparas incandescentes y aparatos de calefacción, la parte de la carga reactiva puede considerarse prácticamente nula, en especial a las bajas frecuencias que son normales en las redes eléctricas industriales que son 50 o 60 Hz; por consiguiente, las corrientes que toman son denominadas corrientes activas. Pero en las cargas representadas por transformadores, líneas de transmisión y distribución, lámparas fluorescentes, motores de inducción, equipos de soldadura eléctrica, hornos de inducción, etc., se puede considerar que la corriente que toman está formada por dos componentes: uno, la corriente activa y el otro, la llamada "corriente magnetizante", o corriente reactiva, que es la que debe alimentar a los circuitos magnéticos de los sistemas eléctricos y está atrasada  $90^\circ$  respecto a la tensión aplicada; esta parte reactiva suele ser de magnitud comparable a la parte puramente resistiva; es decir, en estos casos, además de la corriente activa necesaria para producir trabajo, calor o la función requerida, la carga también toma una parte adicional de corriente reactiva, comparable en magnitud a la corriente activa. Esta corriente reactiva, es indispensable, principalmente para energizar los circuitos magnéticos de los sistemas mencionados, pero

#### APLICACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

representa una carga adicional de corriente para los circuitos de transmisión, las plantas generadoras, los transformadores de potencia, las líneas eléctricas de distribución e incluso los circuitos internos de las plantas industriales.

En el caso particular de las redes de transmisión, la corriente reactiva necesaria para energizar los circuitos magnéticos de los transformadores es de carácter inductivo; es decir, está desfasada  $90^\circ$  en atraso respecto a la tensión. En la figura 3.3 se muestra el diagrama unifilar de un sistema eléctrico, compuesto por un sistema de generación, uno de transmisión y otro de distribución. La carga que alimentan los generadores está compuesta por una parte resistiva y otra reactiva. La parte resistiva demanda una corriente  $I_A$  (corriente activa) y la reactiva una corriente  $I_L$  (corriente inductiva). La corriente total se denomina simplemente con  $I$ .

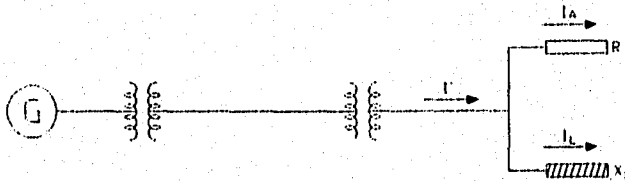


Figura. 3.3. Esquema de alimentación eléctrica de una carga

En circuito de corriente alterna, la tensión es una variable que es función del tiempo. La corriente también es una variable que es función del tiempo, su magnitud y ángulo, el cual depende del valor de la carga. En cada instante, el producto de la tensión por la corriente se llama potencia instantánea y está dada por la siguiente expresión:

$$p(t) = v(t) i(t)$$

La cuál permite conocer el valor instantáneo de la potencia que demanda la carga de un circuito de corriente alterna; sin embargo, en la práctica se trabaja con valores eficaces de tensión, corriente y potencia. A la potencia demandada por la componente resistiva de un circuito de corriente alterna se le conoce como potencia activa; a la demandada por la componente reactiva, como potencia reactiva, y a la suma vectorial de las dos, como

potencia aparente. Debe tenerse presente que estas componentes no existen como entidades separadas, pero para fines de análisis es conveniente manejarlas así.

Las potencias activa, reactiva y aparente de un circuito de corriente alterna se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} P &= VI_A \cos \theta = RI^2 = V^2/R \text{ en watts} \\ Q &= VI_A \text{sen } \theta = XI^2 = V^2/X \text{ en vars} \\ S &= VI = ZI^2 = V^2/Z \text{ en VA} \end{aligned}$$

Al coseno del ángulo  $\theta$ , que forma la corriente activa  $I_A$  con la corriente total resultante  $I$  se le llama factor de potencia, debido a que representa la relación existente entre la potencia real consumida  $I_A V = W$ , o potencia activa y la potencia aparente  $I V = W_0$ , que llega a la carga. Es decir

$$W = W_0 \cos \theta$$

$$\cos \theta = W/W_0 = I_A V / IV$$

En la práctica, suele multiplicarse por cien el factor  $\cos \theta$ , quedando medido el factor de potencia en tanto por ciento: Porcentaje de potencia real consumida, con relación a la potencia aparente.

En la figura 3.4 se muestra que conforme se incremente la corriente reactiva  $I_L$ , mayor será el ángulo  $\theta$  y por consiguiente, más bajo el factor de potencia. Es decir, que un bajo factor de potencia en una carga, implica un consumo alto de corrientes reactivas y por tanto, un riesgo de incurrir en pérdidas excesivas y sobrecargas en los equipos eléctricos y líneas de transmisión y distribución. Bajo el punto de vista económico, esto puede traducirse en la necesidad de cables de energía de mayor calibre, por lo tanto más caros, e incluso en la necesidad de invertir en nuevos equipos de generación y transformación si la potencia demandada llega a sobrepasar la capacidad de los equipos ya existentes.



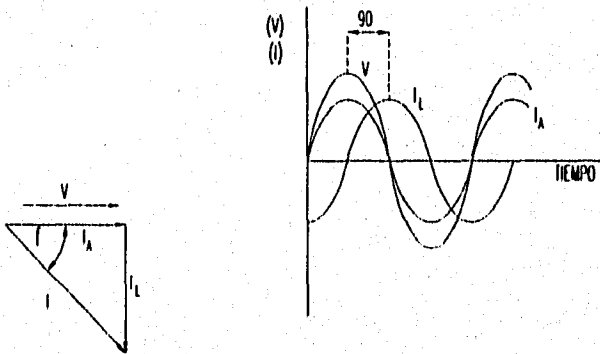


Figura 3.4. Diagrama vectorial y ondas senoidales de voltaje de corriente.

### 3.3 REDUCCIÓN DE LA 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 3.2 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 3.2 es:

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

donde:

$I_{L1}$  - Corriente de línea sin capacitores

$I_{L2}$  - Corriente de línea con capacitores

$\cos\theta_L$  - Factor de potencia inicial

## APLICACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

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 es 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  $I_{L1}$ .

Entonces:

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

en donde:

$$kvac = \frac{I_c}{I_{L1}} = \frac{kVAR}{kVA}$$

Si no se agrega carga después de que se instalen 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:

$$|I_{Lp.u.}| = 1 - \left[ \cos \theta_{LL} + (\text{sen } \theta_L - kvac)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

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.

### 3.4 CORRECCIÓN DE FACTOR DE POTENCIA

Una manera sencilla y económica de resolver este tipo de problemas, es instalar capacitores de potencia.

Los capacitores de potencia conectados en paralelo (derivación) a la carga, representan una carga reactiva de carácter capacitivo ( $X_C$ ), que toma corrientes desfasadas  $90^\circ$ , en adelante, respecto al voltaje. Estas corrientes, al hallarse en oposición de fase con respecto a las corrientes reactivas de tipo inductivo, tienen por efecto reducir la corriente reactiva total que consume la carga.

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.

La figura 3.5 muestra la carga dividida en sus dos tipos diferentes, pero ahora con un tercer tipo de carga la cuál es la capacitiva que esta en paralelo con estas.

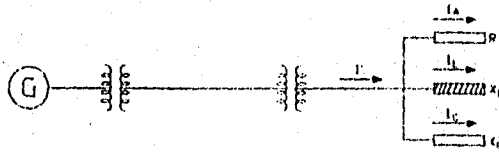


Figura. 3.5. Diagrama de alimentación de una carga a la cual se le añadió un banco de capacitores

En la figura 3.6 vuelve a representarse el voltaje y las corrientes en su forma vectorial y senoidal, mostrándose la corriente reactiva de tipo capacitivo  $I_C$ , la nueva corriente reactiva resultante  $I'_L$ , que en la figura continua siendo de carácter inductivo y la nueva corriente total  $I'$ , resultante en la línea de alimentación. Se puede ver como  $I_L$  y por tanto, también  $I$ , se han reducido considerablemente.

Físicamente no se ha anulado la corriente capacitiva  $I_C$ , ni tampoco la parte equivalente  $I_L - I'_L$ , de corriente inductiva. Lo que pasa, es que la corriente  $I_L - I'_L = I_C$  fluye del banco de capacitores, en lugar de venir de la línea; es decir, hay un flujo local de corriente entre los capacitores y la carga  $X_L$ .

De la figura 3.6 se desprende que variando la carga capacitiva ( $X_C$ ), o sea la potencia del banco de capacitores, el ángulo  $\theta$ , convertido en  $\theta'$ , puede reducirse tanto como se quiera y por consiguiente, el factor de potencia puede aproximarse al valor de 100% tanto como sea conveniente.

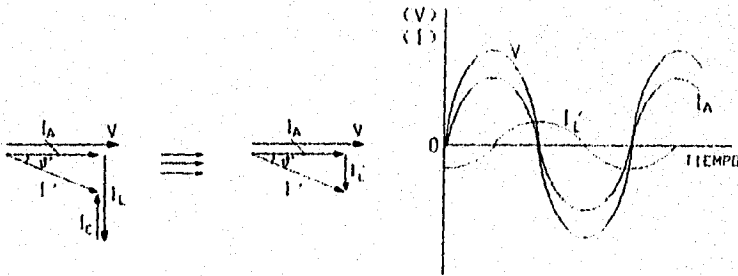


Figura. 3.6. Corriente reactiva total de línea al instalar un banco de capacitores de potencia

## APLICACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

En la práctica, cuando se resuelven casos de bajo factor de potencia, suele operarse con consumos de potencia más bien que de corrientes. El producto del voltaje de operación, medido en kilovolts, por las corrientes  $I_A$  e  $I$ , medidas en amperes, determina la potencia consumida en kilowatts y en KVA, respectivamente (incluyendo el factor  $\sqrt{3}$ , cuando se trata de corrientes trifásicas). Por definición, el producto del voltaje de operación en kilovolts, por la corriente reactiva, en amperes, determina la llamada potencia reactiva, medida en KVAR.

En la figura 3.7 se muestra el paso del triángulo de corrientes al conocido triángulo de potencias, más usado en la práctica. Ambos triángulos son semejantes, puesto que el segundo se obtiene de multiplicar por una misma cantidad las magnitudes que forman los tres lados del primero. El subíndice L que aparece en la magnitud KVAR, indica que se trata de una potencia reactiva de tipo inductivo.

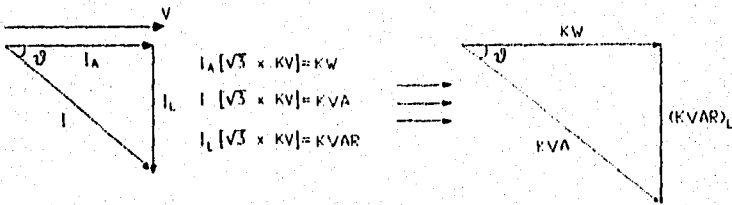


Figura. 3.7. Paso del triángulo de corrientes al triángulo de potencias, cuando se trata de corrientes trifásicas balanceadas.

En la figura 3.8, puede verse como añadiendo potencia reactiva de tipo capacitivo  $(KVAR)_C$ , proporcionada por un banco de capacitores de potencia conectado en paralelo, el factor de potencia puede acercarse al valor de 100%, tanto como se quiera.

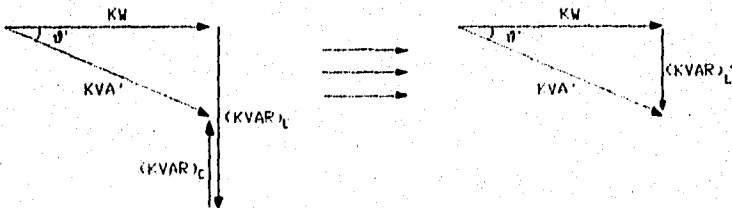


Figura. 3.8. Corrección del factor de potencia, añadiendo potencia reactiva proporcionada por un banco de capacitores de potencia.

## APLICACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

Conociendo la potencia activa KW (medida en Kilowatts) que se consume en una carga y el  $\cos \theta_1$ , que el factor de potencia al que se opera, es fácil determinar la potencia en KVAR, del banco de capacitores que es necesario instalar para aumentar el factor de potencia a un nuevo valor ( $\cos \theta_2$ ) deseado.

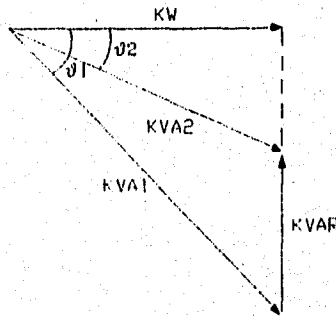


Figura 3.9. Método práctico para corregir el factor de potencia

De la figura 3.9 se deduce la relación:

$$\text{KVAR} = \text{KW} (\text{tg } \theta_1 - \text{tg } \theta_2)$$

### 3.5 REDUCCIÓN DE PERDIDAS

Además de los beneficios mencionados anteriormente, la instalación de bancos de capacitores de potencia produce otro beneficio adicional: Es la reducción de pérdidas por efecto Joule, en los tramos de línea que van desde los generadores a los puntos donde están localizados o instalados los capacitores. Es decir, la reducción de pérdidas por efecto Joule en las líneas que van desde las fuentes hasta el punto donde se desea compensar la potencia reactiva, se debe a la cancelación de una parte de la componente de la corriente reactiva  $I_r$  por la corriente capacitiva  $I_c$  de los capacitores.

#### APLICACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

En efecto, las pérdidas por calor producidas en las líneas provienen, tanto de las corrientes activas como de las corrientes reactivas que circulan por las mismas y representan una energía perdida, que el consumidor paga como si la hubiese transformado en trabajo útil.

Llamando  $P$  a estas pérdidas y  $R$  a la resistencia óhmica total de una carga, se tiene :

$$P = RI_A^2 + RI_L^2.$$

Teniendo en cuenta que  $I^2 = I_A^2 + I_L^2$ , esta expresión toma la forma:

$$P = RI^2$$

Denominaremos a  $P_1$  a las pérdidas correspondientes al factor de potencia  $\cos \theta_1$  y  $P_2$  a las pérdidas correspondientes al nuevo factor de potencia  $\cos \theta_2$ , el cuál se obtiene al instalar capacitores en la localización de la carga. Suponiendo que tanto la demanda de potencia activa, como el voltaje, no cambian apreciablemente después de haberse instalado los capacitores, tendremos:

$$KW = \sqrt{3}(KV)I_1 \cos \theta_1 = \sqrt{3}(KV)I_2 \cos \theta_2$$

La expresión anterior relaciona las corrientes totales  $I_1$  e  $I_2$ , antes y después de la instalación de los capacitores, con los factores de potencia respectivos.

llamando

$$-\Delta P = 100 \times \frac{P_1 - P_2}{P_1}$$

se tiene

$$-\Delta P = 100 \left[ 1 - \left( \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2} \right)^2 \right] \%$$

La expresión anterior determina la disminución de pérdidas por efecto Joule, en tanto por ciento, que se obtienen cuando se mejora el factor de potencia de un valor  $\cos \theta_1$ , al nuevo valor  $\cos \theta_2$ .

Puede comprobarse que el paso de un factor de potencia del 70% al 85%, por ejemplo, produce una disminución de pérdidas por valor de más de 30%. Este efecto es particularmente importante en las líneas de transmisión. Por razones económicas, es conveniente que en éstas, se mantenga constante la relación (P/KW), independientemente de la potencia activa transportada.

Según la expresión

$$\frac{P}{KW} = \frac{R}{3(KV)^2} \times \frac{KW}{\cos^2 \theta}$$

(R: resistencia óhmica de la línea)

Puede notarse que para que esto sea posible, es necesario que la relación  $\frac{KW}{\cos^2 \theta}$  se mantenga constante.

Llamando KW máx a la potencia activa transmitida cuando  $\cos \theta = 1$  (máxima posible), se concluye que

$$KW = KW_{\max} \cos^2 \theta$$

Puede verse que siguiendo este criterio, la potencia activa transportable es proporcional al cuadrado del factor de potencia al que se efectúa la distribución. Para el factor de 0.70, la potencia transportable sería el 49% de la máxima posible; de donde se deduce la importancia del control del factor de potencia para lograr una distribución más económica. La potencia activa transportable es el porcentaje de la potencia máxima que llega a la carga y que depende del factor de potencia



### 3.6 INCREMENTO EN EL NIVEL DE VOLTAJE

Otro efecto importante que se logra con la instalación de capacitores de potencia en líneas y cargas, es la de regular el voltaje de operación.

En la figura 3.10, se representa esquemáticamente una línea de distribución, que partiendo de un generador G, alimenta una carga de impedancia Z.

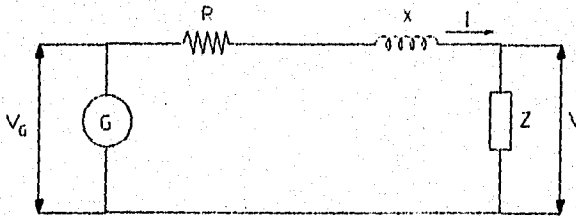


Figura.3.10. Representación esquemática de una línea de distribución

Denominemos a  $V_G$  voltaje de operación del generador (prácticamente constante),  $V$  al voltaje que llega a la carga  $Z$ , e  $I$  a la corriente que circula por cada fase de la línea. La resistencia y reactancia equivalentes, por fase, de la línea se representan por  $R$  y  $X$ , respectivamente, siendo esta última de carácter inductivo, en el caso más frecuente de líneas aéreas operando con una carga superior a su carga crítica.

La figura 3.10a, nos muestra el diagrama vectorial de las caídas de tensión en la línea y en la carga.

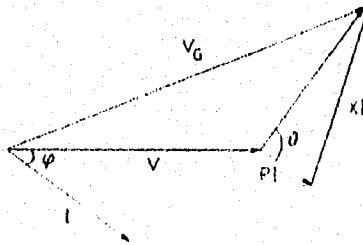


Figura.3.10a. Caídas de tensión en la línea y en la carga Z, de la figura 3.10

## APLICACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

En la figura 3.10a se observa, que la caída de tensión total en la línea (suma de los vectores  $R I$  Y  $X I$ ), depende de la corriente que circula por la misma y por consiguiente, de la potencia solicitada por la carga  $Z$ . Vemos pues, que la configuración del diagrama vectorial, va a variar según varíe la demanda de potencia en KW de la carga (la demanda de potencia reactiva de las cargas suele experimentar variaciones mucho menores que las que experimenta la demanda de potencia activa). Al incrementar la demanda de potencia KW, aumentará la corriente  $I$ , por tanto, la caída de tensión total en la línea; como  $V_G$  se mantiene constante (en módulo), esto implicará una disminución de  $V$  (en módulo), siempre que los ángulos  $\theta$  y  $\phi$  se mantengan constantes. Donde el ángulo  $\phi$  (de la carga) si puede ser modificado y el ángulo  $\theta$  (de la impedancia de la línea) no puede ser modificado, al menos que se conecten capacitores serie en la línea.

NOTA: el ángulo  $\theta$  no está relacionado con los ángulos que anteriormente se han mencionado en este capítulo.

La disminución incontrolada del voltaje  $V$ , puede ocasionar graves perturbaciones en los centros de consumo de energía eléctrica, que es necesario evitar por medio de una regulación adecuada. Una forma económica y eficaz de lograr esta regulación consiste en controlar el ángulo  $\theta$ , o bien el ángulo  $\phi$ , por medio de la instalación de bancos de capacitores en las líneas o en los centros de consumo, respectivamente. Resultan así dos procedimientos posibles de regulación de voltaje:

a) *Compensación de la línea.* Disminuyendo el ángulo  $\theta$ , o lo que es igual, la relación  $\text{tg } \theta = X/R$ , la caída de tensión total en la línea disminuye, y por consiguiente, tiende a aumentar el voltaje  $V$ .

a) *Compensación de la carga.* Disminuyendo el ángulo  $\phi$ , es decir, aumentando el  $\cos \phi$ , los vectores  $V_G$  y  $V$  tienden a formar los lados iguales de un triángulo isósceles, aumentando el voltaje  $V$ . Por añadidura, este efecto resulta especialmente favorecido por la reducción de corriente que los capacitores ocasionan en las líneas.

Se debe tener en cuenta que, en la práctica, las magnitudes  $V_G$  y  $V$ , son mucho mayores que la caída de tensión total de la línea, es posible sustituir, a efectos de cálculo, la caída de tensión real  $|V_G - V|$ , por el valor aproximado:

APLICACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

$$\Delta V = RI \cos \varphi + XI \sin \varphi$$

Definiendo por  $\mu = \frac{\Delta V}{V}$ , la caída de tensión relativa y teniendo presente que

$$KW = \sqrt{3} (KV) I \cos \varphi$$

se obtiene

$$\mu = \frac{R}{10^3 (KV)^2} KW + \frac{X}{10^3 (KV)^2} KW \operatorname{tg} \varphi \quad (a)$$

En la práctica, debe lograrse que  $\mu$  no pase un valor predeterminado (por lo regular es pequeño), manteniéndose  $V$  prácticamente constante.

La máxima potencia transportable por una línea dada, sin sobrepasar este valor de  $\mu$ , la obtendremos cuando se anule la componente reactiva  $X$  de la línea y al mismo tiempo se anule el ángulo  $\varphi$ . Esta potencia máxima viene dada por la expresión

$$\mu = \frac{R}{10^3 (KV)^2} KW \max.$$

Eliminando el voltaje  $V$ , entre esta expresión y la anterior, e introduciendo la notación  $\operatorname{tg} \theta = \frac{X}{R}$ , queda:

$$KW = \frac{KW \max}{1 + \operatorname{tg} \theta \operatorname{tg} \varphi} \quad (b)$$

Esta expresión aproximada proporciona errores despreciables, siempre que se opere con valores de  $\cos \varphi$  abajo de 0.95, cosa que es normal en la práctica y valores de  $\mu$  del orden del 5%. De lo contrario, puede recurrirse a la expresión exacta, bastante más complicada en su forma, pero también muy sencilla de deducir partiendo del valor exacto de la caída de tensión en la línea  $|V_G - V|$ , en lugar del aproximado  $\Delta V$  y siguiendo el mismo razonamiento expuesto anteriormente.

La expresión anterior, nos permite conocer la potencia activa que es posible transmitir sin llegar a producir una caída de voltaje que sobrepase el porcentaje  $\mu$  (KW más, depende de  $\mu$ ), en función del factor  $\text{tg } \theta$  y del factor de potencia a que se efectúa el suministro de energía eléctrica.

En la tabla 3.1 se dan cuatro valores máximos de potencia activa que, según este criterio, es posible transmitir contando con las combinaciones  $\text{tg } \theta$  y  $\cos \phi$ .

$\text{tg } \theta$	$\cos \phi$	KW/KWmáx
4	0.70	19.7%
4	0.85	28.9%
4	0.95	43.5%
1	0.85	61.9%

Tabla 3.1

Inversamente, de la expresión (b) se puede deducir para cada valor de la potencia activa transmitida KW, el factor  $\text{tg } \theta$  a que debe operar la línea (compensación de la línea), o el factor  $\text{tg } \phi$  y por consiguiente, el  $\cos \phi$ , con que debe operar la carga (compensación de la carga). De dicha expresión se deduce que, cuando crece la demanda de potencia activa KW, debe disminuir el término  $\text{tg } \theta$  (línea compensada), o bien el término  $\text{tg } \phi$  (carga compensada). Este último implica el aumentar el  $\cos \phi$ , o sea, mejorar el factor de potencia de la carga en las horas de mayor demanda. Ambos efectos pueden lograrse controlando la potencia de los bancos de capacitores instalados en la línea o en la carga, respectivamente. En la práctica, este tipo de regulación se efectúa de una forma automática, por medio de controles adecuados.

De la expresión (b), se deduce fácilmente la elevación de voltaje que se obtiene al conectar un banco de potencia reactiva total Q, al final de una línea. Dicha elevación de voltaje puede calcularse con la siguiente expresión

$$\varepsilon = \frac{X}{10(KV)^2} Q$$

Donde:

$\varepsilon$  es la elevación de voltaje, expresada en tanto por ciento

Q es la potencia reactiva del banco de capacitores en KVAR.

A continuación se ilustra mediante el empleo del simulador PSSE (power system simulation and emulation), el efecto de la presencia de banco de capacitores en sistemas de transmisión, y para este caso en particular se analiza en estado estable el sistema de 115 kV, subárea cd. Juárez, la cuál se encuentra enlazada con EPECO (El Paso Electric Company). Mostrándose en la tabla 3.2 el efecto de los bancos de capacitores en el sistema.

Posteriormente tenemos los diagramas realizados con el simulador, los cuáles muestran la variación de voltaje en los buses, flujos de potencia y pérdidas en el sistema dependiendo de la configuración de los bancos de capacitores en las subestaciones Rivereña e Insurgentes.

La figura 3.11 ilustra el caso, que es el sistema en condiciones de operación en estado estable con un consumo de potencia de 591 MW. Se puede notar en esta figura que esta potencia que consume el sistema, es aportada por EPECO y por los bancos de capacitores que se encuentran instalados en las subestaciones. Posteriormente tenemos la figura 3.12, la cuál esquematiza al caso base en condiciones de operación en estado estable pero con la diferencia de que en este caso se encuentra desactivado el banco de capacitores que se encuentra instalado en la subestación Rivereña. Bajo esta condición puede apreciarse que hay menor aportación de potencia reactiva al sistema, por lo cuál EPECO tiene que aportar esa potencia reactiva que demanda el sistema, y esto se puede notar al ver la potencia que ahora se transmite por las líneas de transmisión Diablo-Insurgentes y Azcarate-Rivereña, la cuál se duplico con respecto al caso anterior. Esta se duplico ya que se dividieron la potencia que el banco de capacitores aportaba, la cuál era de 14.6 MVAR, y por lo tanto ahora cada línea lleva aproximadamente 7.3 MVAR más que en el caso anterior. Por tal motivo también habrá un incremento en las pérdidas de las líneas. Otro efecto que puede notarse en el sistema con la desactivación del banco de capacitores en la subestación Rivereña es que hay una disminución en el nivel de voltaje en todo el sistema ya que un banco de capacitores se usa como dispositivo de soporte de voltaje, como se ha mencionado anteriormente en este capítulo.

Posteriormente se muestra la figura 3.13 en la cuál el sistema en condiciones de operación en estado estable, tiene fuera de servicio los bancos de capacitores en las subestaciones Rivereña e Insurgentes, y como consecuencia el nivel de voltaje en el sistema disminuye aun más con respecto al caso anterior, ya que son dos bancos de capacitores los que están fuera de servicio, y como consecuencia las líneas de transmisión se tendrán que

## APLICACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

repartir nuevamente la potencia reactiva que aportaban los bancos, y que es demandada por el sistema. En este caso son aproximadamente 14 MVAR más, en cada línea. Y de esta manera, también aumenta la magnitud de la pérdidas en las líneas.

Y por último tenemos la figura 3.14, que es el caso base en condiciones de operación en estado estable, pero con un incremento en la carga de 10% en Riverería y la operación de todos los bancos de capacitores en el sistema.

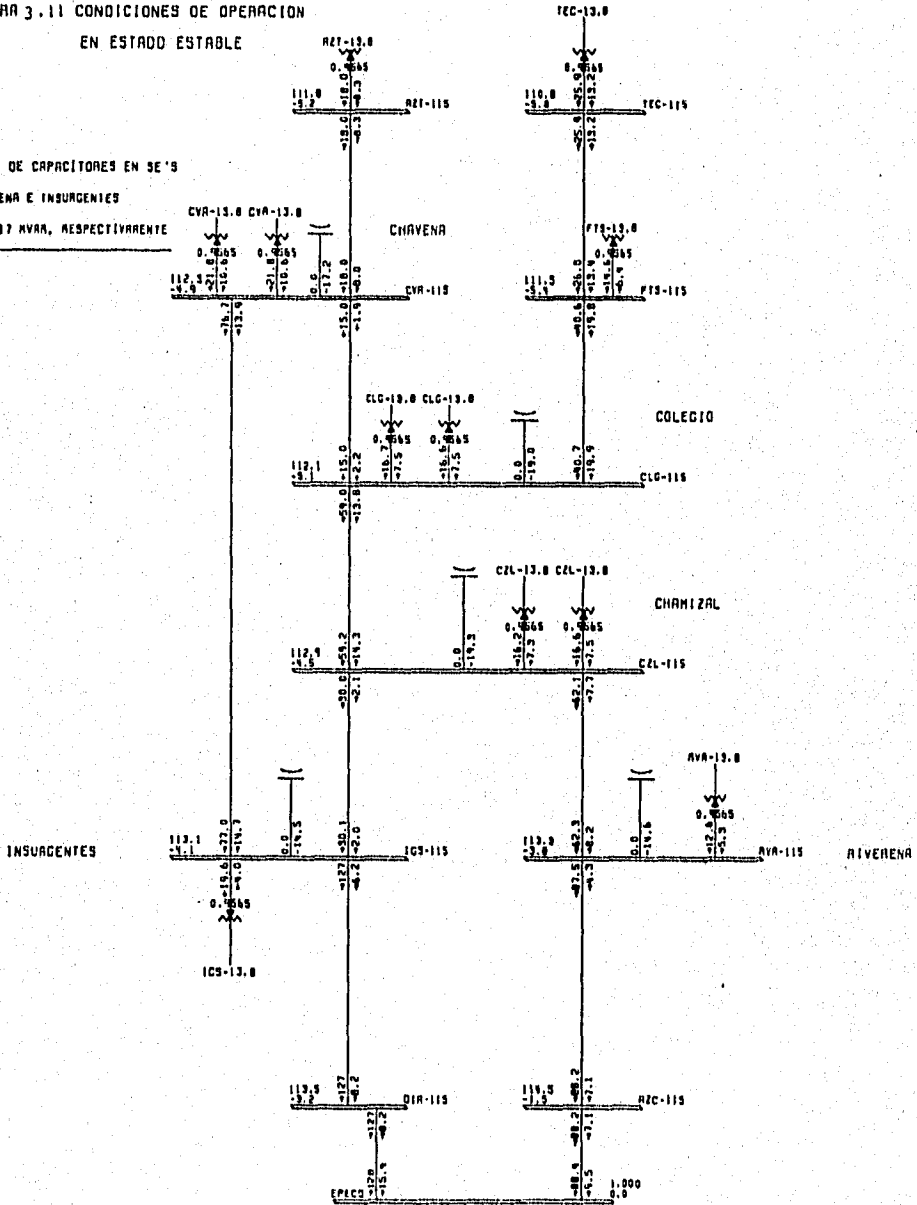
Puede notarse que las líneas de transmisión Diablo-Insurgentes y Azcarate-Riverería aportan este incremento de potencia que es demandado por Riverería y por los bancos de capacitores del sistema, mostrándose así la relevancia de estos en el sistema.

Tal vez exista la pregunta de porque solamente estas líneas de transmisión aportaban el exceso de potencia que demandaba el sistema al estar fuera de servicio cualquier banco de capacitores, y no otro sistema de generación que pudiera estar enlazado al sistema. La respuesta es que el área, esta configurada de tal manera que bajo estas contingencias, EPECO es el único sistema de generación que aportará potencia a esta área ya que existe un contrato entre C.F.E y EPECO.

# AREA JUAREZ - EPECO

FIGURA 3.11 CONDICIONES DE OPERACION  
EN ESTADO ESTABLE

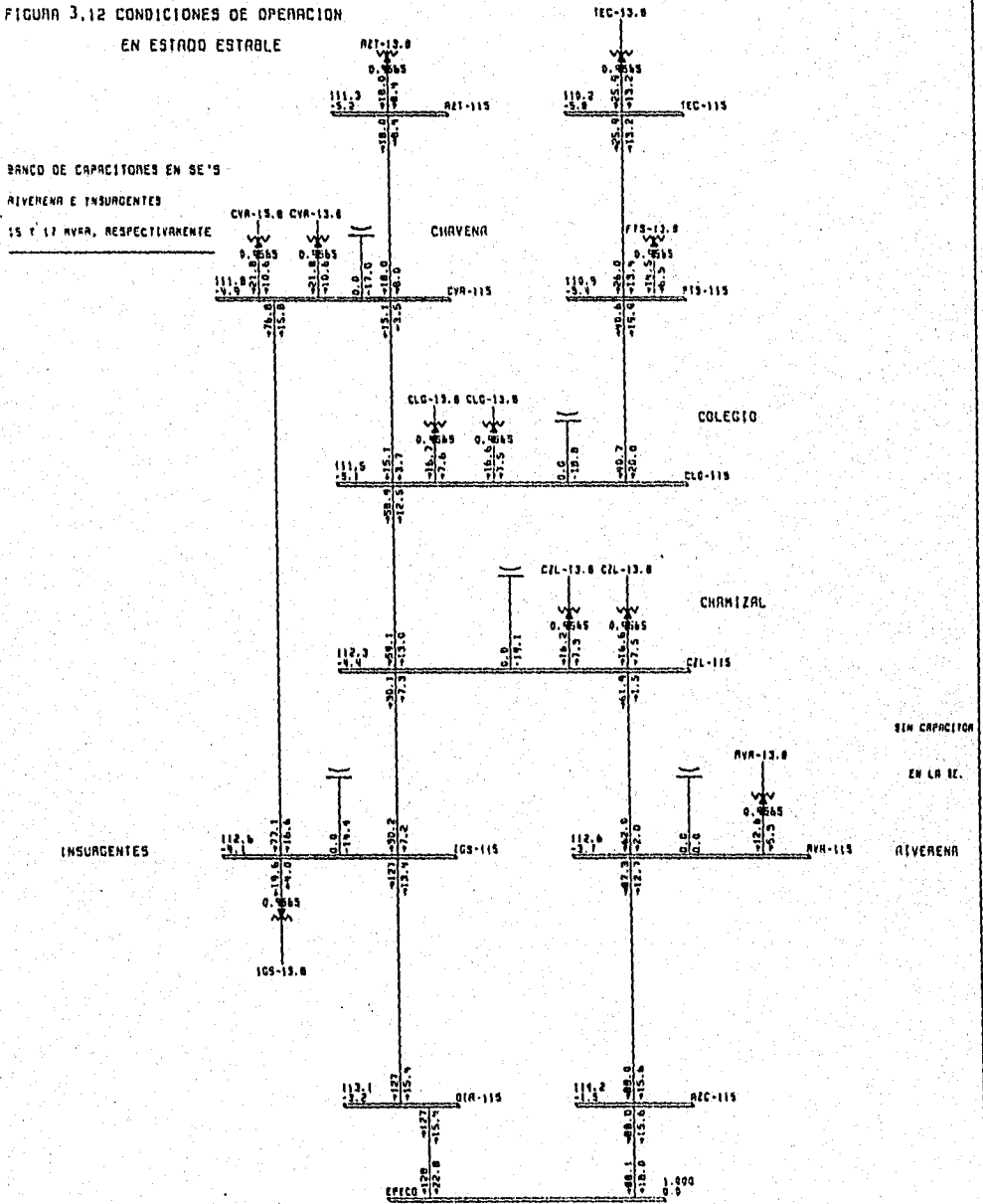
BANCO DE CAPACITORES EN SE'S  
RIVERENA E INSURGENTES  
15 Y 17 MVAR, RESPECTIVAMENTE



DEMANDA MAXIMA ESPERADA EN 1996 -- 591 MW  
215 MW HACIA EPECO, SIN TURBOGAS EN JUAREZ  
A S O B A S E TUE, JAN 09 1996 13:22

# AREA JUAREZ - EPECO

FIGURA 3.12 CONDICIONES DE OPERACION  
EN ESTADO ESTABLE



	DEMANDA MAXIMA ESPERADA EN 1996 --591 MW 215 MW HACIA EPECO, SIN TURBOGAS EN JUAREZ SIN CAPACITOR EN SE. RVA TUE, JUN 09 1996 13:29		
--	---	--	--



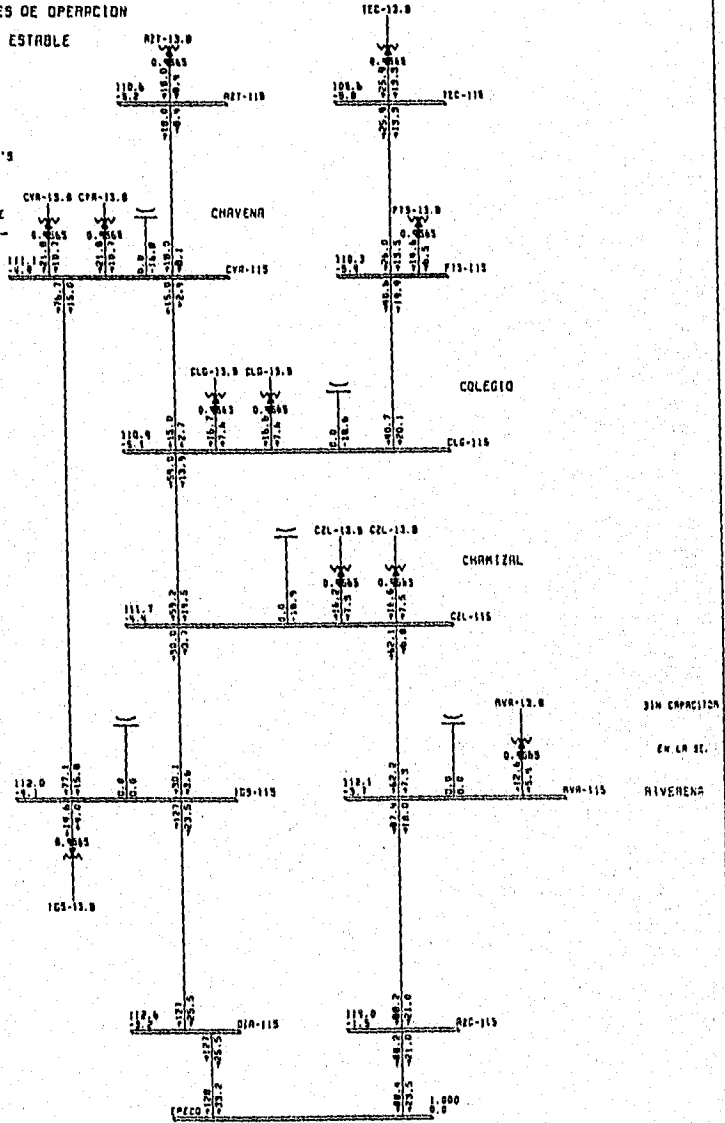
# AREA JUAREZ - EPECO

**FIGURA 3.13 CONDICIONES DE OPERACION  
EN ESTADO ESTABLE**

**BANCO DE CAPACITORES EN SE'S  
RIVERENA E INSURGENTES  
15 Y 17 AVR, RESPECTIVAMENTE**

**SIN CAPACITOR  
EN LA SE.  
INSURGENTES**

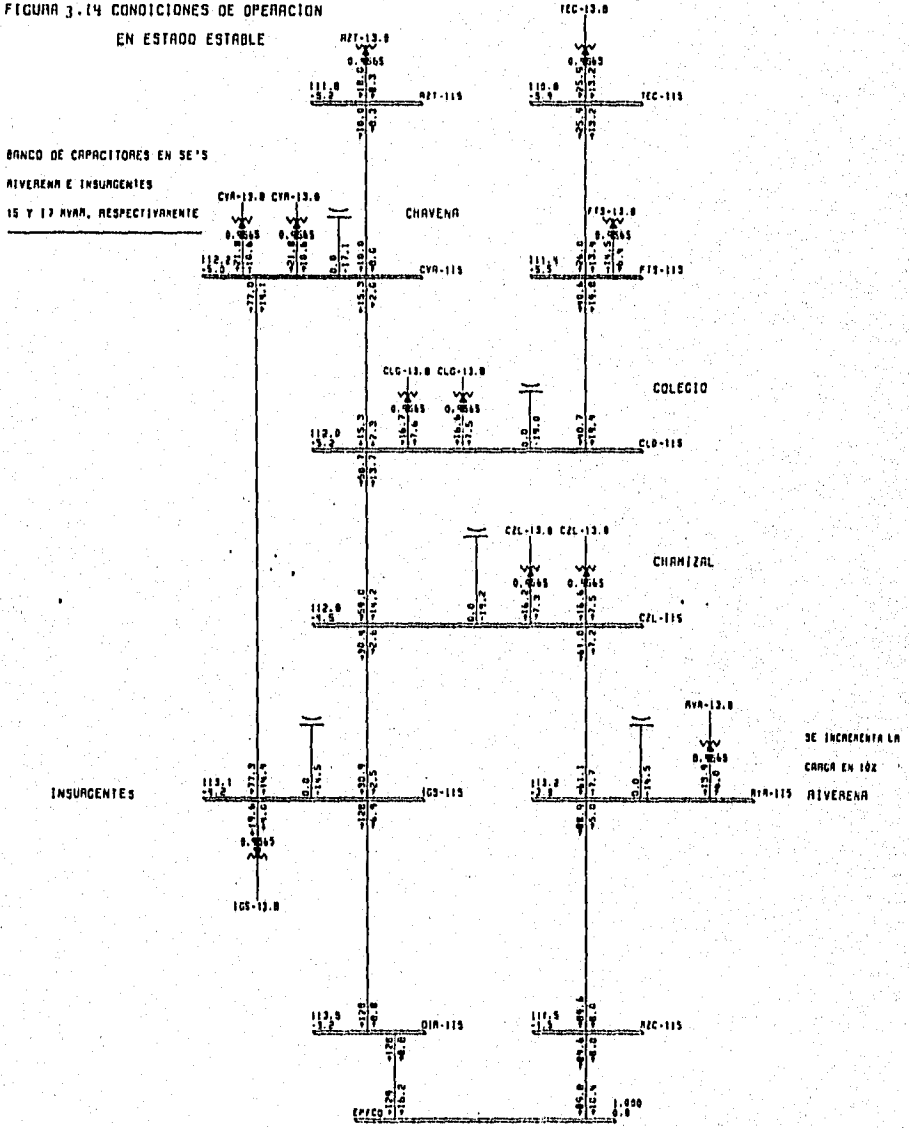
**SIN CAPACITOR  
EN LA SE.  
RIVERENA**



	DEMANDA MAXIMA ESPERADA EN 1996 --571 MW 215 MW HACIA EPECO, SIN TURNOGAS EN JUAREZ SIN CAPACITORES EN RVA E ICS TUE, JAN 09 1996 13:35	
--	---	--

# AREA JUAREZ - EPECO

**FIGURA 3.14 CONDICIONES DE OPERACION  
EN ESTADDO ESTABLE**



	DEMANDA MAXIMA ESPERADA EN 1996 --591 MW 215 MW HACIA EPECO, SIN TURBOGAS EN JUAREZ SE INC. LA CARGA EN 10% EN RYA WED, JAN 19 1996 10:03		
--	---	--	--

CONDICION OPERATIVA	CARGA EN LA SUBESTACION RIVEREÑA (MW)	VOLTAJE EN LAS SUBESTACIONES INSURGENTES Y RIVEREÑA (KV)		PERDIDAS EN LA LINEA DE TRANSMISION DE 115 KV AZCARATE-RIVEREÑA (MW)	APORTACION DE MVAR'S POR LAS DOS LT'S AZCARATE-RIVEREÑA Y DIABLO-INSURGENTES, POR PARTE DE EPECO
		IGS	RVA		
1) REFERENCIA CASO BASE	12.6	113.2	113.3	0.70	AZC - RVA = 7.1 DIA - IGS = 8.2
2) SIN BANCO DE CAPACITORES EN LA SUBESTACION RIVEREÑA	12.6	112.6	112.6	0.75	AZC - RVA = 15.6 DIA - IGS = 15.4
3) SIN BANCO DE CAPACITORES EN LAS SUBESTACIONES INSURGENTES Y RIVEREÑA	12.6	112.0	112.1	0.80	AZC - RVA = 21.0 DIA - IGS = 25.5
4) IDEM AL CASO 1), PERO CON UN INCREMENTO EN LA CARGA DE 10 %	13.9	113.1	113.2	0.75	AZC - RVA = 8.0 DIA - IGS = 8.8

Tabla 3.2 Efecto de la presencia de bancos de capacitores en las subestaciones Insurgentes y Riverena, en las magnitudes del voltaje y en pérdidas.

### ARMÓNICAS

La finalidad de este capítulo, es conocer la naturaleza y origen de las armónicas e identificar los posibles daños que ocasionan a los equipos eléctricos y electrónicos; que nos permitan para asumir las medidas preventivas y correctivas necesarias, que nos permitan eliminar o limitar sus efectos.

La necesidad creciente de la industria nacional de actualizar, para mantener su competitividad, la ha obligado en los últimos años a emplear nuevas tecnologías para el manejo de los procesos, surgiendo la electrónica de potencia por su gran aplicación y su bajo costo. Esta reciente tecnología aunado a las características no lineales de la carga, en ocasiones han provocado serios problemas a las compañías suministradoras de energía eléctrica, distorsionando en sus circuitos alimentadores, las señales de voltaje y de corriente. Esta distorsión consiste en la adición a la señal de suministro en su frecuencia fundamental, de otras ondas similares cuyas frecuencia son múltiplos de la anterior. este fenómeno se conoce como distorsión armónica, y en los sistemas de eléctricos de potencia, su presencia ocasiona daños en los equipos de generación, distribución, consumo y en la comunicación telefónica origina interferencia.

En un sistema ideal de potencia, el voltaje suministrado y la corriente de carga son dos señales senoidales perfectas. En la práctica las condiciones nunca son ideales, por lo que existen algunas formas de onda que presentan distorsiones. Esta deformación de la senoidal perfecta usualmente suele expresarse en términos de distorsión armónica de las señales de voltaje y de corriente.

La combinación del capacitor y una fuente de armónicas, puede llevar a una resonancia en paralelo entre la reactancia capacitiva y la reactancia inductiva del sistema de potencia, resultando una gran oscilación de corrientes y en consecuencia altos voltajes armónicos.

## ARMÓNICAS

Reconociendo primeramente los efectos dañinos en las cargas de consumo y en las redes de potencia se pueden obtener resultados satisfactorios en la confinación de armónicas.

### 4.1 DEFINICIÓN DE ARMÓNICAS

El término de armónicas se originó en el campo de la acústica, en donde se refiere a la vibración de una señal a una frecuencia que es múltiplo de la frecuencia básica o fundamental. Similarmente para señales eléctricas, una armónica está definida como: "una componente senoidal de una onda periódica cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental." Para sistemas de potencia a 60 Hz, una onda armónica senoidal tiene una frecuencia expresada, donde  $n$  es un número entero, es decir, una armónica de tercer orden tiene una frecuencia de 180 Hz:

$$f_{\text{arm}} = n \times 60 \text{ Hz}$$

La figura 4.1 ilustra la onda senoidal de frecuencia fundamental (60 Hz) y la 2ª, 3ª, 4ª y 5ª armónicas.

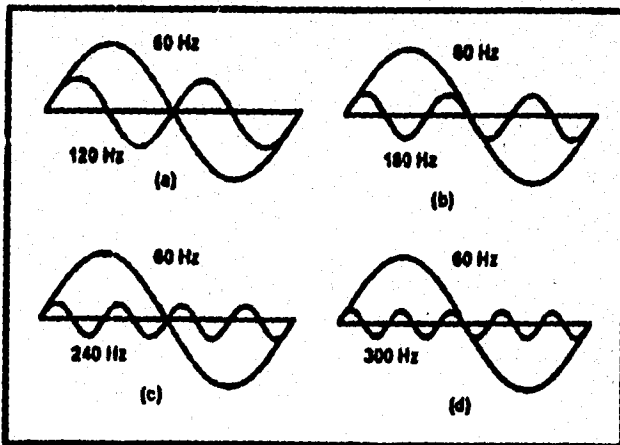


Figura. 4.1 Onda senoidal a frecuencia fundamental (60 Hz) y las armónicas: a) 2ª armónica (120 Hz), b) 3ª armónica (180 Hz), c) 4ª armónica (240 Hz) y d) 5ª armónica (300 Hz).

## 4.2 CARACTERÍSTICAS DE DISTORSIÓN ARMÓNICA

### 4.2.1 Composición de una onda distorsionada

La figura 4.2 muestra el efecto de superposición que tiene una onda armónica sobre la onda de frecuencia fundamental. Cuando la onda (1.0 p.u.) de 60 Hz  $e_1$ , es combinada con la onda  $e_2$ , que es la 3ª armónica en fase (y tiene un valor aproximado de 0.3 de la amplitud fundamental); el resultado es una onda cuadrada distorsionada  $e_r$ , que tiene una frecuencia igual a la fundamental (60 Hz).

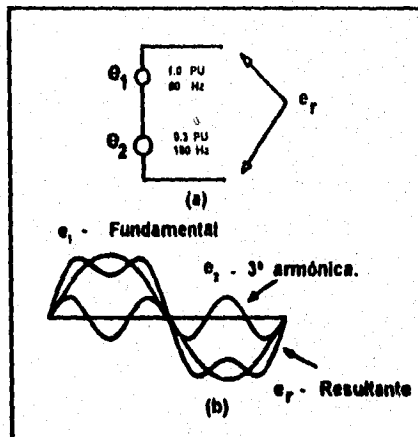


Figura. 4.2 Composición de una onda distorsionada : a) diagrama del circuito; b) onda resultante ( $e_r$ ) obtenida por superposición de la fundamental ( $e_1$ ) sobre la 3ª armónica en fase ( $e_2$ ).

En el caso de la figura 4.2 se observó la resultante a la salida del sistema cuando la tercera armónica se encuentra en fase con la fundamental, teniendo una onda distorsionada.. Ahora observaremos el comportamiento del sistema cuando la tercera armónica se encuentra desfasada noventa grados con respecto a la fundamental, se obtendrá una señal resultante distorsionada producida por el sistema y con una frecuencia igual a la fundamental, esto es ilustrado en la figura 4.3. Si la armónica fuera de mayor magnitud, la resultante sería la fundamental más la armónica de tercer orden, es decir, una onda de mayor magnitud, esto ocasionaría problemas al sistema.

## ARMÓNICAS

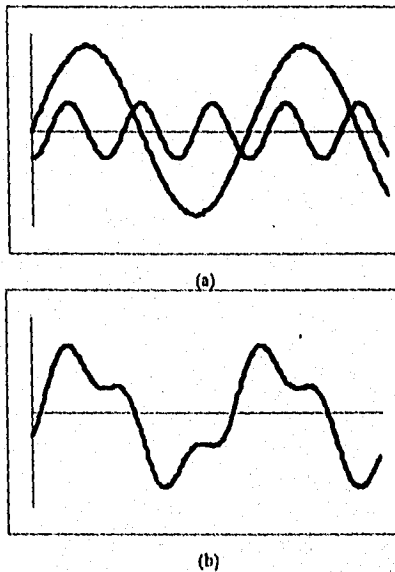


Figura. 4.3 Composición de una onda distorsionada: (a) onda fundamental y tercera armónica (b) onda resultante obtenida por superposición de la fundamental con la tercera armónica.

Por efecto de otras armónicas de frecuencia y amplitudes diferentes, nosotros podemos producir una onda distorsionada de cualquier forma concebible, esto se observara posteriormente.

### 4.2.2 Descomposición de una onda distorsionada

Así como cualquier onda periódica distorsionada puede ser conformada, ésta también puede ser descompuesta en una onda fundamental y una serie de armónicas. La figura 4.4 ilustra una onda periódica distorsionada la cual puede ser disociada en una fundamental y dos componentes armónicas en fase (la 3ª y la 5ª). La precisión para descomponer cualquier forma de onda periódica, independientemente de su grado de distorsión, es importante desde el punto de vista del análisis del sistema.

A la descomposición de cualquier onda periódica en sus componentes fundamentales y armónicas se le refiere como, "Análisis de Fourier".

## ARMÓNICAS

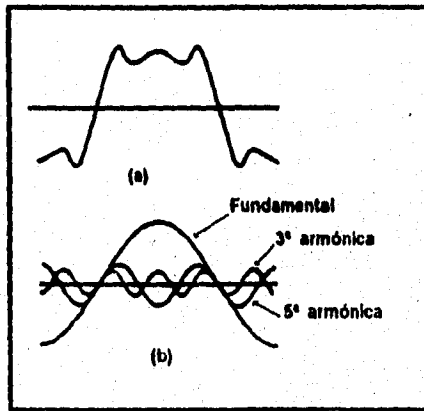


Figura. 4.4 Descomposición de una onda distorsionada: a) onda distorsionada; b) descomposición de la onda distorsionada en la fundamental y sus componentes armónicas.

### 4.3 RELACIÓN ENTRE EL ORDEN DE LAS ARMÓNICAS Y LAS COMPONENTES SIMÉTRICAS

En una red completamente balanceada donde todas las armónicas son directamente el resultado de una distorsión trifásica de secuencia positiva, existe una relación entre el orden de una armónica y la correspondiente secuencia. Esta relación se indica en la tabla 4.3.1

Orden de la armónica	1	2	3
"	4	5	6
"	7	8	9
"	10	11	12
"	(etc.)	(etc.)	(etc.)

Tabla 4.3.1 Relación entre el orden de las armónicas y las componentes simétricas



## ARMÓNICAS

Como un ejemplo, la tercera armónica puede ser mostrada para tener una cantidad de secuencia cero como referencia. Para la figura 4.6 las componentes fundamentales de las fases A, B y C de voltaje o corrientes son balanceadas como se muestra. Sin embargo, nosotros podemos mostrar gráficamente que la fase A de 3ª armónica, la fase B de 3ª armónica y la C de 3ª armónica, están todas en fase con cada una de las ondas de voltaje o de corriente.

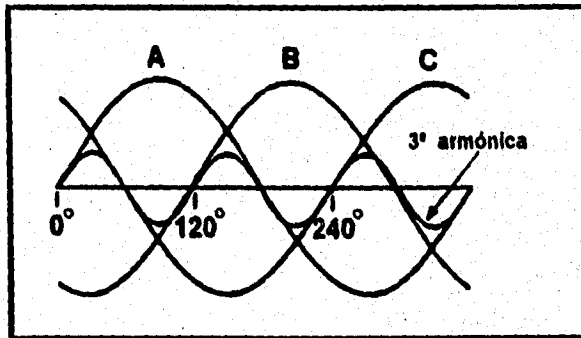


Figura. 4.6 Voltaje o corriente trifásica balanceada con 3ª armónica.

### 4.4 FACTOR DE DISTORSIÓN ARMÓNICO

El factor de distorsión (FD) o factor armónico, proviene de la cantidad de armónicas contenida en una onda distorsionada. Está definido como *"la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las armónicas contenidas en la onda, dividido entre el valor de la cantidad fundamental"*.

FD esta dado por la siguiente ecuación :

$$FD(\%) = \frac{\sqrt{(\text{Sumatoria de los cuadrados de todas las amplitudes de las armónicas})}}{\text{Amplitud fundamental}} \times 100$$

A manera de ejemplo para la aplicación de esta ecuación, se considera la forma de onda de la figura 4.7.

## ARMÓNICAS

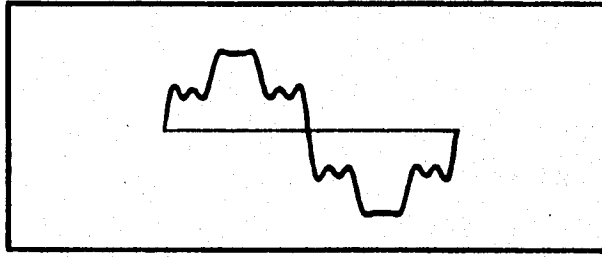


Figura. 4.7 Señal compuesta por armónicas

Orden de la armónica	Frecuencia (Hz)	Amplitud relativa a la fundamental
Fundamental	60	1=1.000
5ª	300	1/5=0.200
7ª	420	1/7=0.143
11ª	660	1/11=0.091
13ª	780	1/13=0.077

Tabla 4.4.1 Composición una onda distorsionada

El contenido de armónicas de la onda es resumido en la tabla 4.4.1 correspondiente, presentada en la figura 4.7. Entonces el factor de distorsión de la onda es :

$$DF = \frac{\sqrt{((.2)^2 + (.143)^2 + (.091)^2 + (.077)^2)}}{1.0} \times 100$$

$$DF = 27 \%$$

**4.5 LIMITES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN LA CORRIENTE.**

La distorsión armónica del voltaje en un red de suministro se encuentra en función de la corriente armónica total inyectada y de la impedancia que presenta dicha red a cada una de las frecuencias armónicas. El total de la corriente va a depender a su vez del número de cargas individuales que inyectan corrientes armónicas, así como de la magnitud de cada una de ellas. Por lo tanto, la limitación de las corrientes armónicas generadas por las cargas de los consumidores, se establece en función del tamaño de las mismas, teniendo las cargas más grandes, límites más restrictivos, por representar un porcentaje mayor con respecto a la carga total alimentada por la red. Los límites individuales de corriente armónica se expresan en porciento de la corriente de carga máxima del usuario, medida en el punto de interconexión del consumidor con la red (punto de acoplamiento común) siendo su valor expresado con respecto a la frecuencia fundamental. Estos límites son definidos por la norma IEEE Std. 519-1992, que establece los límites máximos permisibles para las componentes armónicas individuales.

<b>DISTORSIÓN DE CORRIENTE ARMÓNICA MÁXIMA EN PORCIENTO DE LA <math>I_L</math>. NORMA IEEE-519 PARA UN VOLTAJE DE SUMINISTRO DE 69 001 A 161 000 VOLTS</b>						
<b><math>I_{cc}/I_L</math></b>	<b>2ª</b>	<b>3ª</b>	<b>4ª</b>	<b>5ª</b>	<b>6ª</b>	<b>TDD</b>
<20	0.5	2.0	0.5	2.0	0.5	2.5
20<50	0.875	3.5	0.875	3.5	0.875	4.0
50<100	1.25	5.0	1.25	5.0	1.25	6.0
100<1000	1.5	6.0	1.5	6.0	1.5	7.5

Tabla 4.5.1

Donde :

$I_{cc}$  = Corriente máxima de cortocircuito en el PAC.

$I_L$  = Máxima corriente de carga (componente a la frecuencia fundamental en el PAC).

#### 4.6 LIMITES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN EL VOLTAJE

Cuando el contenido de armónicas en la corriente de carga de cada consumidor se encuentra por abajo de los límites establecidos por la norma IEEE Std. 519-1992, se logra generalmente en el punto de acoplamiento común que los índices de distorsión armónica en el voltaje de suministro sean inferiores a los límites establecidos.

LIMITES DE DISTORSIÓN DE VOLTAJE. NORMA IEEE-519		
Voltaje de bus en el PAC	Distorsión de voltaje por armónica individual. (%)	Distorsión de voltaje total. (%)
69 kV y menores	3.0	5.0
69.001 a 161 KV	1.5	2.5
161.001 KV y mayores	1.0	1.5

Tabla 4.6.1

#### 4.7 IMPORTANCIA DE LA COMPRESIÓN DE ARMÓNICAS EN LOS SISTEMAS ACTUALES.

Es necesario crear métodos de mitigación de armónicas, principalmente por tres razones

- 1.- El uso de convertidores estáticos de potencia que recientemente han proliferado.
- 2.- Las redes resonantes que tienden a aumentar.
- 3.- Los equipos del sistema de potencia y cargas que son sensibles a las armónicas.

El término "convertidor estático de potencia" se refiere a los dispositivos semiconductores que convierten potencia de una frecuencia en potencia de otra frecuencia.

Los convertidores más usados en la industria son del tipo rectificador, convertidores de potencia de CA a CD, y los inversores, convertidores de CD a CA.

Además el problema de las armónicas frecuentemente se ve agravado por la tendencia de las plantas industriales de instalar capacitores de potencia para mejorar el factor de potencia o para controlar el voltaje

Si una corriente armónica es inyectada (por un convertidor estático de potencia) a una frecuencia cercana a la frecuencia de resonancia, podría fluir una alta corriente de oscilación fundiendo los fusibles del capacitor y produciendo altos voltajes armónicos.

Con el estudio de este fenómeno se han entendido perfectamente los problemas que pueden ocasionar las armónicas si no son controladas adecuadamente. Las consecuencias más obvias de la presencia de armónicas en una red se manifiestan como; degradación telefónica y en las comunicaciones en general, error en ángulos de disparo de los convertidores estáticos, operación errónea de los equipos de protección y control, fallas en equipo de cómputo, fallas en banco de capacitores, incremento en las pérdidas por calentamiento.

Los problemas mencionados pueden llegar a amplificarse debido a las condiciones de resonancia como resultado de la variación de la impedancia de la red con la frecuencia. Existen múltiples dispositivos que generan armónicas, a continuación sólo mencionaremos algunos de éstos:

Los grandes convertidores estáticos de potencia han sido una fuente importante de armónicas en los sistemas eléctricos de potencia: Una aplicación de los convertidores de gran potencia se presenta en la industria electroquímica y electrometalúrgica puesto que los rectificadores son usados en la reducción del aluminio, refinamiento del cobre, producción química y otros procesos industriales. Una aplicación más para los convertidores de gran potencia es el control ajustable de velocidad para grandes motores de CD.

El principio de operación de un transformador establece un campo magnético en el núcleo de éste para inducir un voltaje en el lado secundario; al aplicar una corriente en el lado primario conocida como corriente de excitación. La corriente de excitación inducida por el transformador no es completamente senoidal y contiene varias armónicas. La forma

## ARMÓNICAS

de onda en la corriente de excitación es rica en 3ª armónica, que típicamente alcanza el 50% de la corriente de frecuencia fundamental. La 5ª, 7ª, y 9ª, armónicas están presentes pero son muy pequeñas. Afortunadamente los transformadores son diseñados para operar cerca del quiebre de la curva de saturación, donde la corriente de excitación es uno o dos por ciento de la corriente de carga plena, así aunque los transformadores son numerosos en el sistema de potencia, su corriente de excitación usualmente no causa problemas de armónicas.

El sistema de potencia energiza gran cantidad de equipos que funcionan por medio de la descarga de arco. Algunos ejemplos de estos son: Los hornos de arco, las soldadoras de arco, y las lámparas fluorescentes. La producción más grande de armónicas, probablemente proviene de las lámparas luminosas, debido a que se encuentran distribuidas en toda la red. sin embargo, son los hornos de arco eléctrico los que pueden causar los problemas más severos, porque representan una fuente de armónica de gran capacidad concentrada en un lugar específico.

En las lámparas fluorescentes las armónicas generadas incluyen una fuerte componente de 3ª armónica de corriente, debido a que las balastras son elementos ferromagnéticos que requieren corriente de excitación de 3ª armónica. La distorsión armónica causada por sistemas de iluminación de descarga de arco cada día son más importantes, especialmente en áreas donde la iluminación es parte importante de la carga comercial.

4.8 CONDICIONES DE RESONANCIA

4.8.1 Inductancia

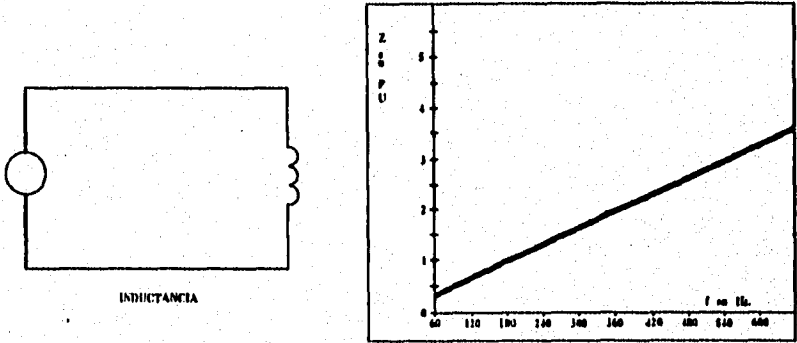


Figura. 4.8 Diagrama eléctrico y gráfica característica de la inductancia

4.8.2 Capacitancia

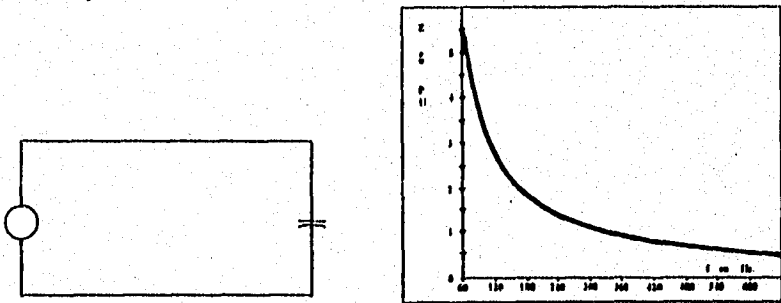


Figura. 4.9 Diagrama eléctrico y gráfica característica de la capacitancia

Los bancos de compensación reactiva con frecuencia forman circuitos resonantes con la impedancia de la red eléctrica. Así por ejemplo, si la impedancia de los bancos de compensación es mucho mayor a la impedancia del sistema se tiene que hacer el estudio para prever que no entren en resonancia con el sistema.

## ARMÓNICAS

$$n = \sqrt{\frac{MVA_{cc}}{Q_c}}$$

Donde;

MVA<sub>cc</sub> .- Potencia de cortocircuito

Q<sub>c</sub> .-Potencia reactiva del banco de compensación

n .-Número de armónica.

Existe resonancia si n coincide con armónicas características de la fuente generadora.

En general hay problemas si la impedancia del sistema resuena en armónicas menores de orden once:

$$Z_{sis} < n < 11$$

También debe tomarse en cuenta que la aplicación de capacitores para mejorar el factor de potencia puede aumentar las condiciones de resonancia, como por ejemplo el uso de bancos de capacitores de potencia en derivación, para mejorar el soporte de voltaje o para incrementar el nivel de transmisión a través de los enlaces, presenta una influencia significativa en las magnitudes de las corrientes armónicas. Los bancos de capacitores no generan armónicas, pero estos proporcionan circuitos de retorno para posibles condiciones de resonancias.

La impedancia del capacitor decrece con la frecuencia, por lo tanto, los capacitores actúan como sumidero de las armónicas. En un sistema con fuentes de armónicas distribuidas las armónicas convergerán al banco de capacitores resultando voladura de los fusibles de capacitores y equipo. De esta forma la presencia de armónicas en el banco de capacitores pueden causar:

- Incremento de las pérdidas dieléctricas y calentamiento
- Condiciones de resonancia que incrementan el tamaño de las armónicas
- Sobrevoltajes

La distribución de los bancos de capacitores pueden formar un circuito resonante con la inductancia de las líneas de distribución a una frecuencia cercana a la 1ª de las armónicas importantes. En este caso, puede ser que las armónicas se amplifiquen en el lugar del



## ARMÓNICAS

capacitor. Se ha encontrado que las armónicas que generalmente predominan, son la tercera y quinta, las armónicas de orden par han presentado magnitudes muy bajas. Las condiciones de resonancia se pueden predecir con programas de computadora.

La aplicación de bancos de capacitores pueden provocar elevaciones de voltaje o corriente en condiciones resonantes con la red. Los capacitores pueden estar en resonancia serie o paralelo, cada una de las cuales puede causar problemas para el sistema de potencia.

#### 4.9 RESONANCIA EN PARALELO

Como se muestra en la figura 4.9 la instalación de los capacitores se efectúa en la localización de la inductancia del sistema de potencia en una conexión tipo paralelo, por lo que, se presenta una condición de resonancia, la frecuencia dada por este tipo de arreglo esta dada por la expresión siguiente:

$$F_{reson} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

donde L representa la inductancia del sistema de potencia y C representa la capacitancia del banco de capacitores instalado.

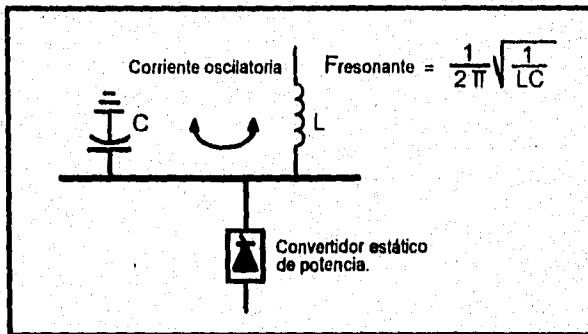


Figura. 4.9 Excitación de un circuito paralelo resonante.

La frecuencia resonante, puede ser calculada por la siguiente fórmula:

$$h = \frac{MVA_{sc}}{M_{var}}$$

donde:

- h = orden de la armónica a la frecuencia resonante
- $MVA_{sc}$  = capacidad de corto circuito
- $M_{varC}$  = potencia total de los capacitores conectados

Si esta frecuencia resonante se aproxima a la frecuencia de la armónica característica generada por el convertidor, puede aparecer un voltaje alto en el bus de la planta. Esto es posible aun con bajos niveles de corriente armónica, puesto que en condiciones de resonancia, la impedancia en paralelo del circuito tanque puede ser muy alta. Sin resistencia en la red, y con la impedancia en la localización de la carga teóricamente infinita, el problema no es solo de voltajes altos de armónicas; sino dentro del circuito tanque las corrientes oscilantes pueden llegar a ser varias veces las producidas por la fuente de armónicas. Esto es, que se presenten la fusión de los fusibles del capacitor o hasta que la unidad falle.

En el circuito mostrado en la figura 4.10 se observa una conexión tipo paralelo, en la cual se desea saber la frecuencia a la que el circuito entra en resonancia, mostrando para esto el cambio que sufre la impedancia al ir cambiando la frecuencia de la fuente a ciertos valores cualesquiera

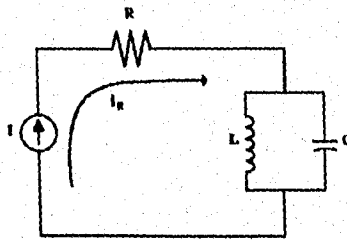


figura. 4.10 Conexión en paralelo

Dadas las impedancias de los elementos capacitivo e inductivo, se obtiene la impedancia equivalente para tener la salida respectiva del circuito.

$$Z_L = R + j2\pi fL$$

$$Z_C = R - \frac{j}{2\pi fC}$$

$$Z_{EQ} = \frac{Z_L \cdot Z_C}{(Z_L + Z_C)}$$

## ARMÓNICAS

Se muestra en la figura 4.11 la gráfica de la frecuencia de resonancia que es de 300 Hz por mencionar algún valor, debido que es donde se incrementa más la impedancia, observamos que al irse acercando a la frecuencia de resonancia la impedancia equivalente se va elevando, y pasando esta frecuencia, la impedancia equivalente va disminuyendo, con esto concluimos que si al circuito entra una armónica de quinto orden, es decir, de frecuencia de 300 Hz el circuito oscilara creando un aumento de impedancia.

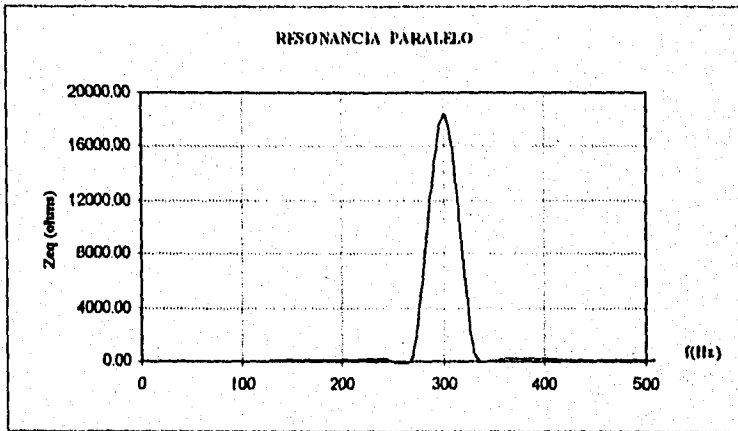


Figura. 4.11 Comportamiento de una conexión en paralelo, cuando se presenta una resonancia a los 300 Hz.

Cuando se presenta la resonancia en el circuito se pudiera tener:

$$I_{LC} = I_L - I_C$$

$$I_L = \frac{Z_c}{(Z_L + Z_c)} I_R$$

$$I_C = \frac{Z_L}{(Z_L + Z_c)} I_R$$

## ARMÓNICAS

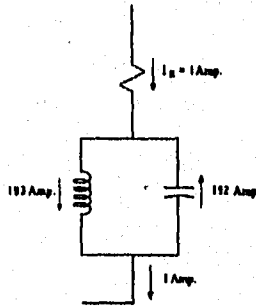


Figura. 4.12 Resonancia en paralelo.

En este caso en particular, apreciamos que la corriente aumenta en forma excesiva, esto es, fuera del circuito oscilante habrá un valor de corriente normal y dentro del circuito en paralelo un valor grande de corriente dado a los 300 Hz, a la cual entra en resonancia este circuito. Dado que ésta alta corriente circula en la conexión en paralelo, y que la inductancia esta compuesta de varios sistemas (ramas), la alta corriente se disgregará en estas ramas, por lo tanto, afectara directamente al banco de capacitores por estar integrada por solo una unidad, apareciendo entonces una voladura en los fusibles de este banco de capacitores.

Ahora observemos el cambio que sufre angularmente este tipo de arreglos comúnmente usados en líneas de transmisión, esto se muestra en la gráfica de la figura 4.13, en la cual en un rango de frecuencias de 0 a 600 Hz se comporta el circuito angularmente.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

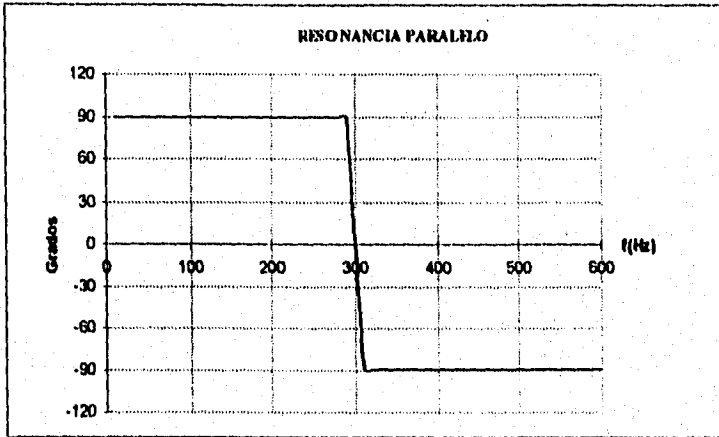
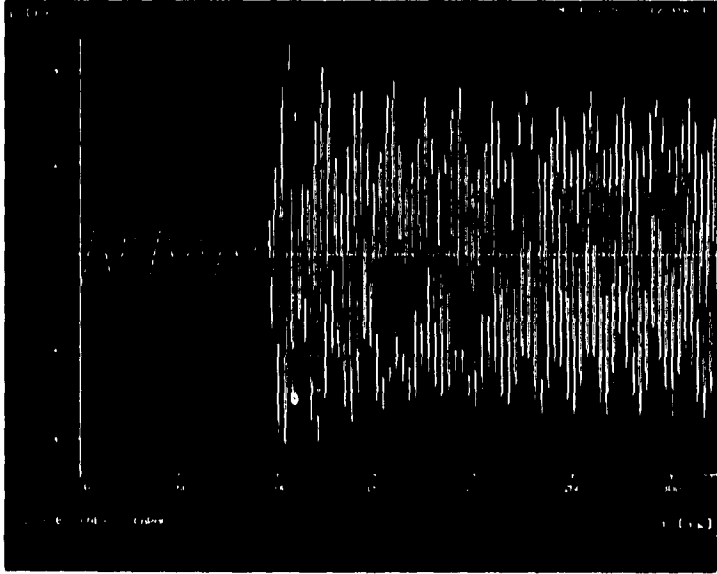


Figura. 4.13 Comportamiento angular de un circuito en conexión paralelo.

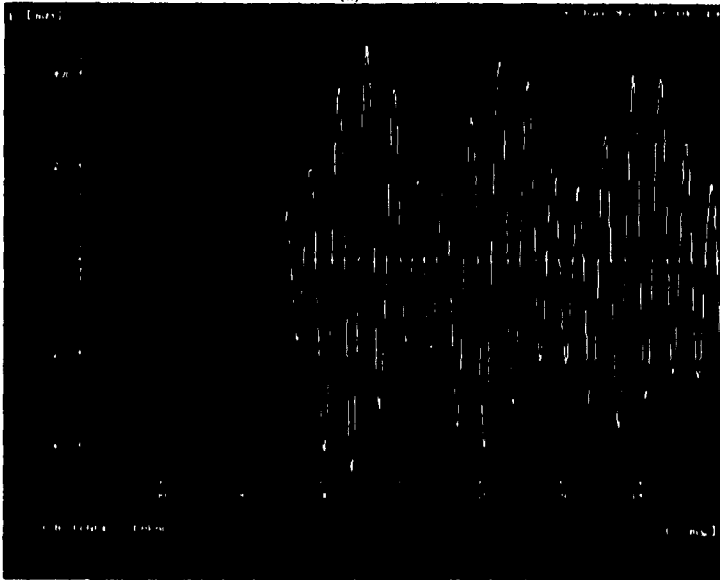
Así, también observamos que el ángulo predominante antes de que el circuito entre a la frecuencia de resonancia, es el de un circuito puramente capacitivo, después de que se da la resonancia, el ángulo que predomina es el de un circuito puramente inductivo, este ejemplo ilustrativo nos muestra como es el comportamiento de un arreglo en paralelo.

Ahora, con la aplicación del programa EMTP (Electromagnetic Transients Program), se hará una simulación mas real con una conexión en paralelo, esta conexión contiene: dos fuentes de corriente, una es de 1 Ampere que lo proporciona la fuente y otra con 0.1 Ampere de quinta armónica que es propiamente del sistema, que entra a los 95.6 milisegundos después de un tiempo cero, en base al circuito de la figura 4.10 asignándole a los elementos los valores:  $C = 5.6 \mu\text{f}$ ,  $L = 50 \text{ mH}$ ,  $R = 1 \Omega$  e  $I = 1 \text{ A}$

La simulación de este arreglo en paralelo, al inyectar una armónica de quinto orden esta mostrada en la figura 4.14



(a)



(b)

Figura. 4.14 Conexión en paralelo inyectando una fuente de 5ª armónica y los efectos en el capacitor, (a)gráfica con  $0 < t < 350$  milisegundos, (b) gráfica con  $70 < t < 150$  milisegundos

Se observa en la figura 4.14 las gráficas, que antes de los 95.6 milisegundos la señal se encuentra estable, al entrar en resonancia, es decir, que entra al circuito paralelo la armónica de quinto orden, se dispara abruptamente, con lo que observamos la distorsión de la señal en el capacitor, en este ejemplo se introdujo una armónica para hacer resonar el circuito, observando como se altera y provoca el aumento de la corriente en el capacitor.

Empleando el simulador EMTP para estudiar el sistema se introdujo una fuente de armónica a dicho sistema, disparando la corriente abruptamente en el circuito, en este ejemplo se inyectó al sistema una armónica de quinto orden (300 Hz de frecuencia), debido a las altas corrientes tendra a provocar la voladura de los fusibles del capacitor a ocasionar perdidas por calentamiento del mismo. Este ejemplo muestra gráficamente como se altera un circuito al entrar en resonancia el banco y el sistema dando una muestra practica de un caso real.

#### 4.10 RESONANCIA EN SERIE

El diagrama mostrado en la figura 4.9 es un claro ejemplo de la resonancia en paralelo, pero cambiando la localización del banco de capacitores se puede producir un circuito resonante en serie. La figura 4.15 muestra esta condición.

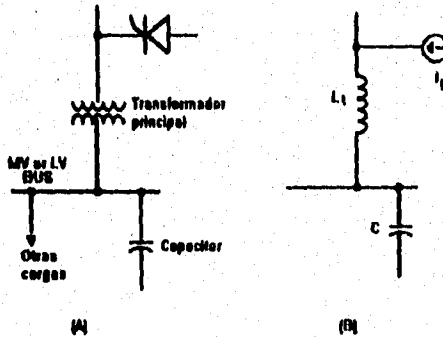


Figura 4.15 Sistema de potencia susceptible a resonancias en serie: A) diagrama unifilar; B) circuito equivalente.



## ARMÓNICAS

El sistema visto desde la fuente armónica tiene el transformador principal y el alimentador, ambos en serie con el capacitor. La impedancia de esa trayectoria puede ser relativamente baja. Las corrientes armónicas producidas por la fuente se distribuirán por todas partes de la red en una manera determinada por las impedancias de cada rama. Si el capacitor forma un circuito de baja impedancia serie para una armónica característica del convertidor, esa corriente armónica tenderá a fluir hacia el capacitor, lo que puede acarrear problemas tanto para el banco como para los circuitos telefónicos cercanos.

Las corrientes armónicas en circuitos de potencia pueden inducir voltajes armónicos y ruido dentro de circuitos telefónicos adyacentes, por lo que, una concentración de armónicas debidas a resonancias del sistema pueden crear problemas importantes. La norma 519-1992 de la IEEE fija guías para este tipo de interferencias

En el circuito mostrado en la figura 4.16 se observa una conexión tipo serie. Para determinar la frecuencia a la que entra en resonancia dicho circuito y observar gráficamente como al ir variando la frecuencia de la fuente varia la impedancia del circuito, a determinados valores de los elementos

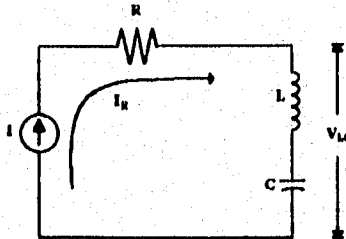


Figura. 4.16 Diagrama eléctrico de resonancia serie.

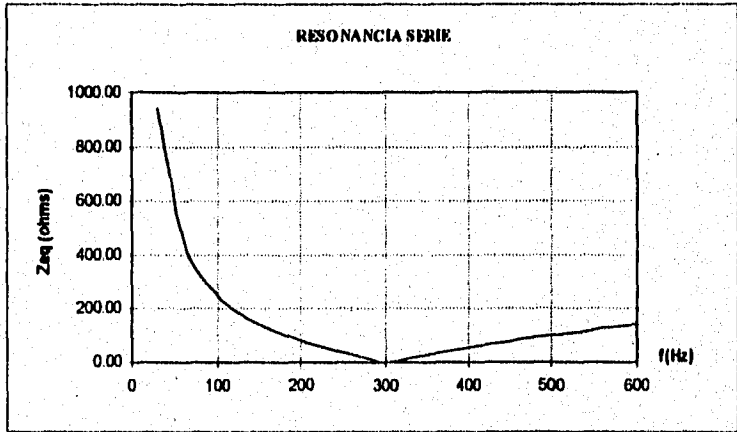
En este tipo de arreglo se suman las impedancias de cada elemento, debido a que se encuentran conectados sus elementos en serie obteniendo la impedancia equivalente del sistema, en el cual la impedancia cambia si la frecuencia cambia debido a las reactivancias de los elementos inductivo y capacitivo.

$$Z_t = R + j2\pi fL$$

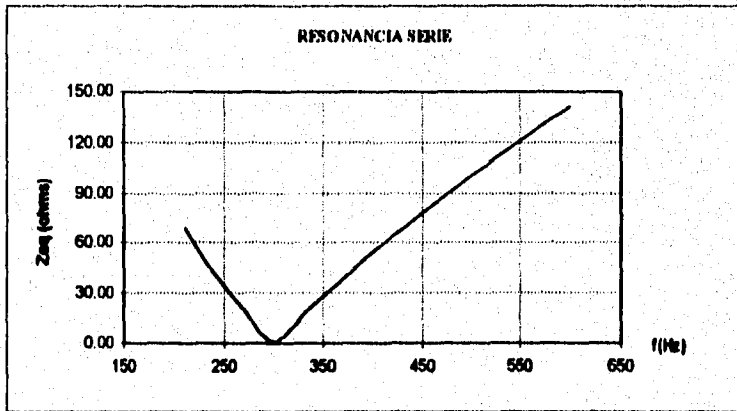
ARMÓNICAS

$$Z_C = R - \frac{j}{2\pi fC}$$

$$Z_{BQ} = R + j(X_L - X_C)$$



(a)



(b)

Figura. 4.17 Comportamiento de una conexión en serie, cuando se presenta una resonancia a los 300 Hz. (a) Tomando las altas impedancias, (b) Con una escala menor

## ARMÓNICAS

Cuando se presenta la resonancia en el circuito serie:

$$V_{LC} = V_L - V_C \cong 0$$

Observamos que el  $V_{LC}$  es muy próximo a cero, mientras que  $V_L$  y  $V_C$  pueden adquirir valores grandes, así que a medida que  $Z_C$  y  $Z_L$  sean más parecidas la corriente en el circuito podría incrementarse, presentando un problema en el banco de capacitores.

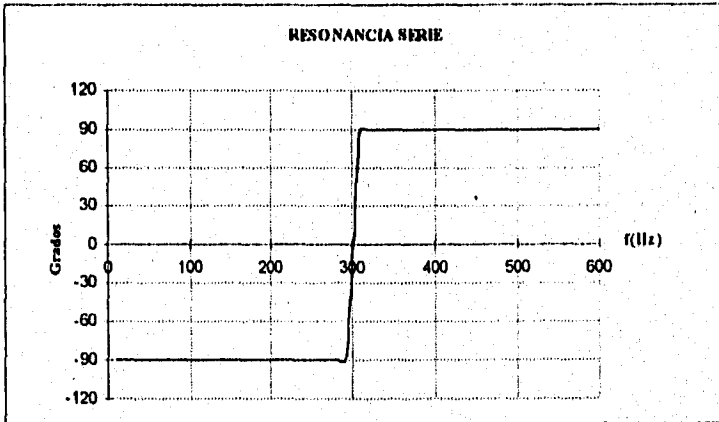


Figura. 4.18 Comportamiento angular de un circuito en conexión serie.

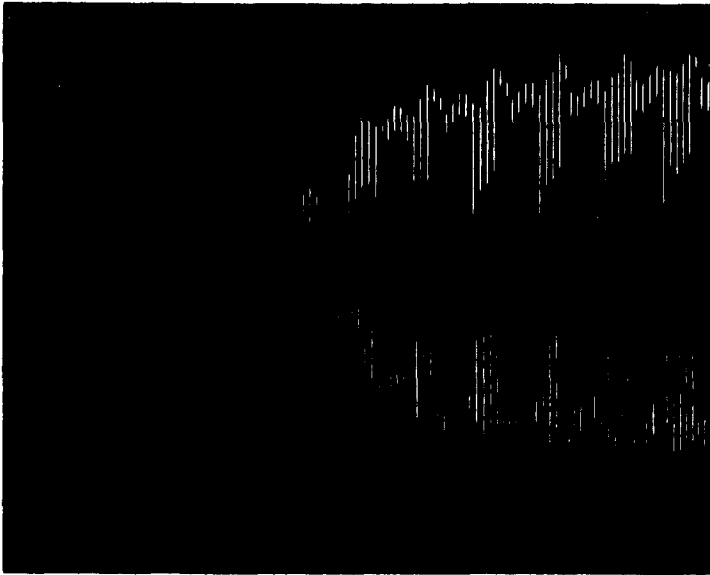
Observamos en la figura 4.18 la gráfica, que en este tipo de conexión serie, el ángulo antes de que el circuito entre a la frecuencia de resonancia se comporta como un circuito puramente inductivo, después de pasar por esta frecuencia de resonancia se comporta como un circuito puramente capacitivo, este tipo de arreglo no es usado frecuentemente debido al comportamiento inductivo que tiene este tipo de conexión.

En los ejemplos anteriores se mostraron los dos tipos de conexiones que se presentan, estos son el circuito en serie y el circuito en paralelo, el que mayormente se da en el campo es el tipo de conexión en paralelo o llamado conexión en derivación. De manera ilustrativa se hizo resonar al circuito a los 300 Hz, es decir, a quinta armónica, por lo tanto, si esta armónica nunca se presenta en el sistema, esta no creará problemas en dicho sistema puesto que no hará resonar al circuito.

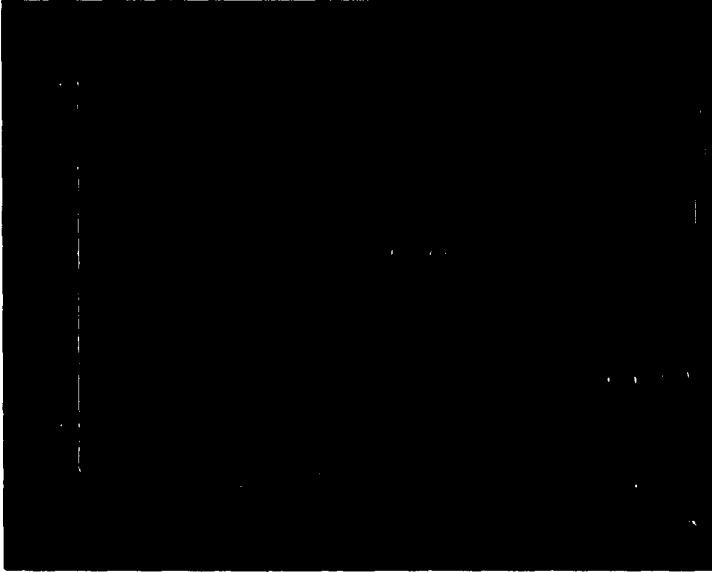
## ARMÓNICAS

Los armónicas que generalmente se presentan en la practica son la 3ª, y 5ª, las armónicas pares (2ª, 4ª, etc.) se presentan también pero de una magnitud menor, por lo que estas armónicas se desprecian, se trata de que el sistema no resuene a dichas frecuencias colocando reactores para desintonizar el sistema.

Nuevamente aplicando el programa EMTF, ahora para la conexión serie, se aplica una fuente de corriente de quinta armónica de 0.1 Ampere al circuito de la figura 4.19, se inyecta ahora a los 95 milisegundos al circuito serie, teniendo la distorsión de la onda fundamental.



(a)



(b)

Figura 4.19 Conexión en serie inyectando una fuente de 5ª armónica y los efectos sobre el capacitor; (a) gráfica con  $0 < t < 350$  milisegundos, (b) gráfica con  $70 < t < 150$  milisegundos

En los gráficos de la figura 4.19 mostrados que fueron obtenidos por el simulador EMTP, observamos que la onda fundamental se encuentra estable, pero cuando es inyectada en el circuito serie la quinta armónica ésta afecta al capacitor alterando drásticamente su corriente, por lo que se concluye que el sistema es afectado al inyectar una armónica de quinto orden.

Se puede observar que cuando una armónica entra a cierto circuito ya sea serie o paralelo, esta armónica afecta directamente al circuito resonante, que en el caso estudiado provocará a la voladura de los fusibles del banco de capacitores o dañará una ó más unidades capacitoras.

#### 4.11 REACTOR SERIE.

Una de las soluciones para eliminar las condiciones de la resonancia entre el banco de capacitores y el sistema es la inclusión de un reactor conectado en serie, entre el interruptor y el banco de capacitores, permitiendo modificar la frecuencia de resonancia entre el banco de capacitores y el sistema, además de disminuir y amortiguar las magnitudes de las corrientes producidas durante las maniobras de energización y desenergización. El reactor es de núcleo de aire y se le conoce también como reactor de amortiguamiento.

El reactor se selecciona en función de la armónica a la cuál se desea desintonizar el banco de capacitores o de acuerdo a la magnitud a la cuál se desea limitar la corriente de energización y desenergización. Con el reactor incluido, la frecuencia de resonancia disminuye.

Una condición que debe ser considerada al incluir dicho reactor, es que si se mantiene en las barras de la subestación un voltaje igual o mayor al nominal; el banco de capacitores estará sometido a un sobrevoltaje permanente el cuál dependerá de la reactancia del reactor serie.

La operación simultánea en el mismo nivel de voltaje de otros bancos de capacitores eléctricamente cercanos al banco que se esta energizando, da como resultado una gama múltiple de altas frecuencias que deben ser consideradas. Las frecuencias de resonancias dependen del número de bancos de capacitores que estén en operación simultánea, a mayor número de bancos de capacitores será menor la magnitud de la frecuencia de resonancia.

## 4.12 FILTROS

Son aquellos equipos cuyo propósito es reducir la corriente o el voltaje armónicos que circulan por partes específicas de un sistema de potencia eléctrico. Los procedimientos para el diseño de los filtros de armónicas son primeramente determinar el contenido de armónicas en la red, estudiar el sistema y el orden de la armónica presente en dicho sistema, esto es, para determinar la configuración del filtro, los voltajes armónicos y fundamental a través de las terminales del capacitor.

Para filtrar una armónica se requiere saber en el estudio del sistema la armónica que se presenta con mayor intensidad, para que la frecuencia de dicha armónica sea filtrada en ese ancho de banda, este tipo de filtro utilizado es denominado filtro pasabanda, debido a que las características del filtro permite pasar únicamente un ancho de banda especificado, que en este caso solo permitiría filtrar la armónica a la que fue diseñado. El filtro pasabanda se muestra en la figura 4.20, y su respectiva gráfica del filtro, nos permite observar el ancho de banda que atrapa el filtro de manera que se visualice.

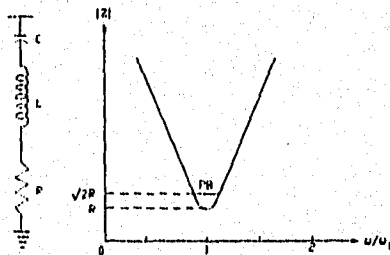


Figura. 4.20 Filtro pasabanda.

### **SOBRETENSIONES**

Los sistemas eléctricos de potencia, están constituidos en términos generales, por centrales eléctricas, subestaciones para transformar el voltaje, líneas de transmisión, líneas de subtransmisión, redes de distribución, motores eléctricos, bancos de capacitores, y otros elementos dependiendo de las características del sistema. Las estaciones generadoras de voltaje por lo general se encuentran alejadas de la carga, el voltaje disminuye debido a las pérdidas por las distancias recorridas, instalando un banco de capacitores para incrementar el voltaje y disminuir las pérdidas en la línea, la instalación de los bancos de capacitores en la actualidad es usada más comúnmente, aunque esto acarrea ciertos problemas como son resonancias y sobretensiones en el sistema.

En los sistemas eléctricos, las corrientes de corto circuito se presentan por distintas causas primarias, entre las que se encuentran desde luego, las fallas de aislamiento por sobretensiones de origen atmosférico (rayo), por fallas de aislamiento, debido al envejecimiento, por temperaturas excesivas, etc.

Estos elementos aparecen en el sistema ya sea en la parte de la red de potencia o en la parte de utilización, pero en cualquier caso, están expuestos a las sobretensiones que aparecen en los sistemas eléctricos, las cuales someten a los equipos y partes de la instalación a esfuerzos dieléctricos.

Los esfuerzos dieléctricos aplicados al sistema, se deben básicamente a los siguientes tipos de sobretensión:

**1. Tensiones a la operación del sistema**

**2. Sobretensiones**

- por rayo o por descarga
- temporales
- por maniobra



## SOBRETENSIONES

### 5.1 SOBRETENSIONES POR RAYO

Las sobretensiones por rayo o descarga atmosférica se dice que son de tipo natural, ya que su origen no tiene una relación con el sistema eléctrico, éstas se presentan en formas de ondas y son causadas por diferencias de potencial entre las nubes y tierra, que produce la ruptura dieléctrica cuando se rebasa la energía del campo electromagnético.

Estas descargas pueden producir valores de cresta que van de unos cientos hasta 200,000 amperes, con tiempos de frente de ondas que van desde unos fracciones de microsegundos hasta varios microsegundos.

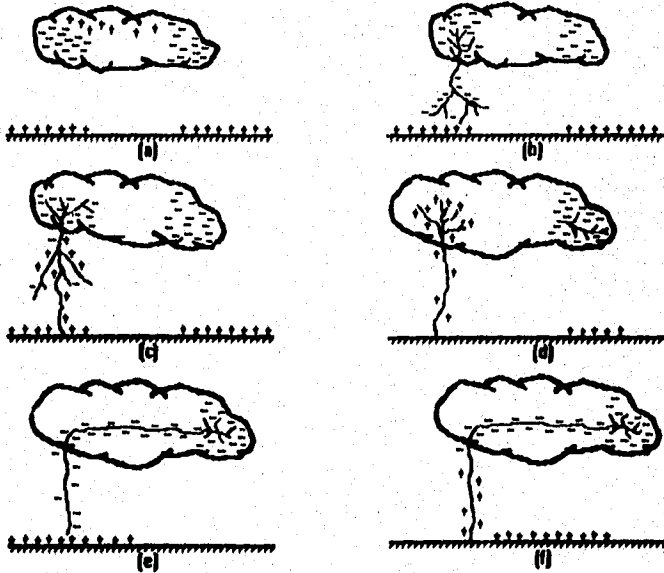


Figura. 5.1 Distribución de las cargas en varias etapas

- a).- La carga se concentra en el centro de la nube e induce cargas a tierra.
- b).- El canal líder descarga a tierra.
- c).- Se inicia el canal de descarga.
- d).- La carga en el centro se descarga completamente.

- e).- Canal concentrado.
- f).- Descarga de retorno.

Las descargas atmosféricas tiene una descarga promedio de 10 a 20 kiloamperes, cuando las descargas tienden a ser mayores tienden a una menor probabilidad de ocurrencia

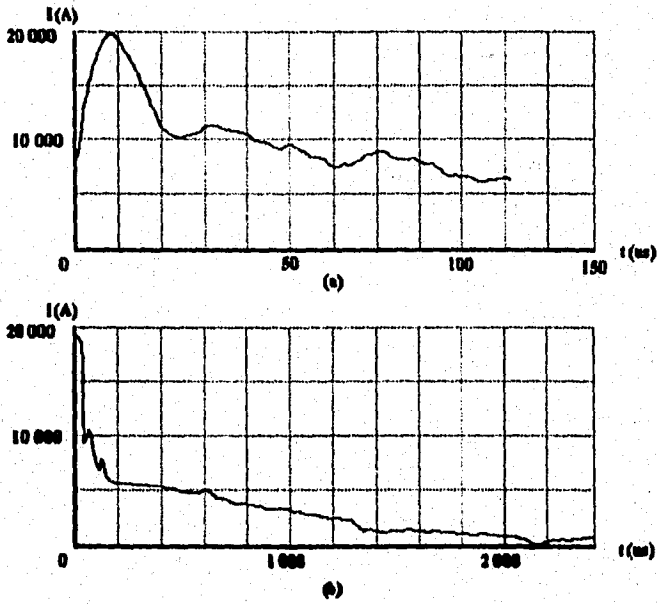


Figura. 5.2 Gráficas de descarga.

## 5.2 SOBRETENSIONES TEMPORALES

Las sobretensiones temporales son de particular importancia en la clasificación de los esfuerzos de voltaje, dado que su duración está sobre las posibilidades de limitación de apartarrayos por descargas repetidas. Las sobretensiones temporales resultan de las operaciones de los interruptores, o bien, de fallas en el sistema, y por lo general, no están amortiguadas, o bien, débilmente amortiguadas. Las fuentes típicas de este tipo de sobretensiones son:

- Voltajes en las fases no falladas durante una falla de línea a tierra.
- Respuesta del sistema y sobrevoltajes dinámicos que siguen a un rechazo de carga en el sistema.
- Sobrevoltajes resonantes o quasirresonantes resultantes de las corrientes de inserción (inrush).
- Sobrevoltaje resultantes por operaciones anormales o no planeadas de los interruptores del sistema.

Una ocurrencia de falla fase-tierra en un determinado punto acarrea una elevada tensión en las fases no falladas, cuyo valor depende principalmente del grado de aterrizamiento. Esta condición de aterrizamiento a través de fase-tierra, su valor es independiente del valor real de la tensión de operación local considerado, siendo calculado a partir de las impedancia de secuencia de fases. Un caso se sistema eficazmente aterrizado, es la relación de las reactancias en secuencia cero y la reactancia de secuencia positiva debe ser inferior a 3 ( $X_0/X_1 \leq 3$ ), en la relación entre la resistencia de secuencia cero y una reactancia de secuencia positiva e inferior a 1 ( $R_0/X_1 \leq 1$ ).

### 5.3 RECHAZO DE CARGA

Este fenómeno es referido como un sobrevoltaje inducido que se eleva debido a una súbita caída en la onda de la carga del sistema. El problema de rechazo de carga se representa, por lo general, en los sistemas en donde la generación alimenta cargas radiales a través de líneas de transmisión.

El rechazo de carga se inicia abriendo el último interruptor que conecta el generador con la carga, el voltaje interno del generador puede ser de alguna manera mayor que en sus terminales, por lo tanto, a la apertura del interruptor el voltaje terminal del generador y el transformador elevador asociado (en la conexión bloque o unidad) se elevarán inmediatamente al nivel del voltaje interno o mayor según sea determinado por la capacitancia de línea o cable. Debido a la sobretensión, los transformadores se pueden saturar inmediatamente, por la pérdida de carga, el generador opera a mayor velocidad. El gobernador del generador y el control de la excitación, intentan reducir sus valores controlados de voltaje y velocidad hasta llegar a sus ajustes normales.

El voltaje en el extremo receptor de la línea, puede ser significativamente mayor que el del generador, debido al efecto ferranti de la línea, y en adición, el aumento en la frecuencia nominal, aumenta la reactancia inductiva en serie y la corriente de carga en la línea. El efecto de generación de armónicas por el transformador es considerable y mantiene la sobretensión en forma sostenida.

Las sobretensiones por rechazo de carga, no son en general tan severas en magnitud como aquellas que resultan de la energización de bancos de capacitores.

#### 5.4 SOBRETENSIONES POR MANIOBRA DE INTERRUPTORES.

Las sobretensiones debidas a la liberación de las energías electromagnética y electrostática en los sistemas de alta tensión, pueden causar daños al aislamiento del equipo. Bajo ciertas circunstancias, estas sobretensiones pueden ser más severas aún que las debidas a descargas atmosféricas.

El interruptor es el dispositivo de conexión y desconexión del banco de capacitores, constituye un factor determinante en la realización adecuada de las maniobras. Debe estar bien aplicado y en óptimas condiciones de operación. Sus mantenimientos deben ser de acuerdo a lo indicado por el fabricante. Un factor importante, en la magnitud de los sobrevoltajes transitorios, se refiere a los tiempos de disparidad entre polos del interruptor. A mayor disparidad, mayores sobrevoltajes.

Las sobretensiones por maniobra ocurren con frecuencia durante la operación normal de un sistema, por ejemplo, durante la energización o desenergización de los interruptores. Las ondas de sobretensión más significativas, desde el punto de vista de severidad y de probabilidad de ocurrencia, son las debidas a la energización y el recierre a gran velocidad de líneas de transmisión, cables de potencia y bancos de capacitores. Adicionalmente se pueden esperar sobretensiones, debido al corte de las ondas de voltaje o corriente por cierto tipo de interruptores durante la desconexión de reactores, banco de capacitores o transformadores, de hecho, desde el punto de vista de coordinación de aislamiento en los sistemas de alta y extra alta tensión, la selección del apartarrayos se basa primero en las ondas de energización y recierre.

Las ondas de maniobra de interruptores en alta tensión son de característica transitoria rápidamente decreciente y de naturaleza altamente oscilatoria. Las ondas de energización y recierre son básicamente similares, aun cuando las ondas de recierre son más severas. Cuando se presenta un recierre de alta velocidad en una línea de transmisión, queda atrapada una cierta carga en la línea durante el periodo de desenergización, si se tiene conectada a la línea compensación reactiva en derivación, la carga atrapada oscilará a una frecuencia cuyo valor depende, del valor de la capacitancia del banco y de la inductancia del reactor en derivación.

## **SOBRETENSIONES**

La presencia de esta carga atrapada hace que los transitorios de recierre sean más severos que los resultantes de la energización de la línea muerta. Cuando están conectados a la línea transformadores de potencia, o aún transformadores de potencial, la saturación de los núcleos de los transformadores provocara que la carga atrapada sea drenada de la línea durante el periodo de desenergización.

Las ondas de sobretensión por maniobra por interruptores que se consideran en forma relevante para el estudio de las sobretensiones en los sistemas de alta tensión. Se pueden agrupar como:

- Energización de líneas, cables, transformadores, reactores, banco de capacitores y barras.
- Re-energización o recierre de líneas de alta velocidad o banco de capacitores.
- Tensiones de recuperación por reencendido en líneas de transmisión, banco de capacitores o cables.

### **5.5 ENERGIZACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES.**

La energización de un banco de capacitores y de un transformador juntos puede causar excesivos sobrevoltajes dinámicos que afectan al transformador, los capacitores, los fusibles y apartarrayos. La naturaleza del problema involucra la generación de altos voltajes debido a las corrientes de inrush del transformador que son ricas en armónicas, esto tiende a ocurrir cuando un banco de capacitores es aplicado causando resonancia en paralelo con el sistema.

### 5.6 CORRIENTES Y VOLTAJES AL ENERGIZAR UN CIRCUITO

En la figura 5.3 nos muestra el diagrama eléctrico de un circuito RLC, el cual vamos a energizar un banco de capacitores, analizaremos las corrientes y los voltajes que se presentan durante la energización de un banco.

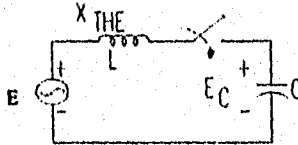


Figura 5.3 Conexión del banco de capacitores

$$V_c = \frac{1}{C} \int I dt$$

#### 5.6.1 Determinación de la corriente transitoria

$$L \frac{dI}{dt} + V_c = V \quad (1)$$

$$L \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} \int I dt = V \quad (2)$$

Diferenciando la ecuación (2)

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{I}{C} = 0$$

$$S^2 L I(s) - S L I(0) - L I'(0) + \frac{I(s)}{C} = 0$$

$$\text{De ec. (1)} \quad I'(t) = \frac{dI}{dt} = \frac{V - V_c}{L} \Rightarrow L I'(0) = V - V_c(0) \quad (0)$$

## SOBRETENSIONES

$$S^2 LI(s) - SII(0) + Vc(0) + \frac{i(s)}{C} = V$$

$$i(s) \left[ S^2 + \frac{1}{LC} \right] = \frac{V - Vc(0)}{L} + SII(0)$$

$$i(s) = \frac{V - Vc(0)}{L} \frac{1}{S^2 + (\sqrt{LC})} + I(0) \frac{S}{S^2 + (\sqrt{LC})}$$

Suponiendo que :

$$I(0) = 0$$

$c(0) = 0$  descargado inicialmente.

Considerando  $\sqrt{LC} = \omega_0^{-2}$ , entonces :

$$i(s) = V \left( \frac{C}{L} \right)^{1/2} \frac{\omega_0}{S^2 + \omega_0^2}$$

$$i(t) = V \left( \frac{C}{L} \right)^{1/2} \text{Sen } \omega_0 t$$

**Esto establece que la corriente transitoria oscila senoidalmente a la frecuencia natural del circuito  $\omega_0$ ,**

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} \text{ rad/seg} \Rightarrow \frac{1}{LC} = \omega_0^2$$

$$\text{Tambien } \left( \frac{C}{L} \right)^{1/2} = \frac{1}{Z_0} \Rightarrow Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$\sqrt{\frac{L}{C}}$  Tiene dimensiones de impedancia. Es llamada la "surge impedance" del circuito.



## SOBRE TENSIONES

Para un circuito de corriente alterna para el cual el voltaje de excitación es alterno, la corriente que se establece cuando se energiza el circuito es:

$$i(t) = \frac{V(o)}{Z_o} \text{Sen } \omega_o t$$

$V(o)$  = Voltaje instantáneo resultante de la suma algebraica entre la fuente de energización y la carga del capacitor. O bien voltaje a través del switch al instante del cierre.

Cuando el objetivo es el cálculo de corrientes de inrush (valor pico y frecuencia de oscilación) es práctica común tratar al voltaje resultante  $V(o)$  como una cantidad constante, debido a que la frecuencia de la corriente transitoria es usualmente mucho más grande que la frecuencia del sistema de potencia, y el voltaje cambia muy poco durante el periodo de interés.

$$i(t) = V(o) \sqrt{\frac{C}{L}} \text{Sen } \frac{t}{LC}$$

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

### 5.6.2 Determinación del voltaje en el capacitor

$$L \frac{di}{dt} + V_c = V \quad ; \quad I = C \frac{dV_c}{dt} \Rightarrow \frac{di}{dt} = C \frac{d^2 V_c}{dt^2}$$

$$LC \frac{d^2 V_c}{dt^2} + V_c = V$$

$$\frac{d^2 V_c}{dt^2} + \frac{V_c}{LC} = \frac{V}{LC}$$

$$\frac{d^2Vc}{dt^2} + \omega_o^2 Vc = \omega_o^2 V$$

$$S^2Vc(s) - SVc(0) - V'c(0) + \omega_o^2Vc(s) = \omega_o^2 \frac{V}{S}$$

$$(S^2 + \omega_o^2) Vc(s) = \omega_o^2 \frac{V}{S} + SVc(0) + V'c(0)$$

$$\text{Si } V'c(0) = 0$$

$$I(0) = 0$$

$$c(0) \neq 0$$

$$\frac{dVc(0)}{dt} = V'c(0) = \frac{I(0)c}{C}$$

$$c(s) = \frac{V \omega_o^2}{S(S^2 + \omega_o^2)} + \frac{Vc(0) S}{S^2 + \omega_o^2}$$

$$c(s) = \frac{V}{S} - \frac{V S}{S^2 + \omega_o^2} + \frac{Vc(0) S}{S^2 + \omega_o^2}$$

$$Vc(t) = V(1 - \text{Cos } \omega_o t) + Vc(0) \text{Cos } \omega_o t$$

$$Vc(t) = V - [V - Vc(0)] \text{Cos } \omega_o t$$

Al hacer la maniobra para la conexión de un banco de capacitores en lado de alta tensión el aumento de voltaje puede repercutir sobre una unión inductiva del sistema de baja tensión. La figura 5.4 muestra el circuito equivalente. Hay dos acoplamientos capacitivo-inductivo, si la frecuencia de resonancia de esos dos circuitos son aproximadamente iguales,  $L_1C_1=L_2C_2$ , el aumento de voltaje puede ocurrir, por que del lado de bajo voltaje esta siendo inyectado con un voltaje de la fuente del lado de alta tensión de la propia frecuencia de resonancia.

## SOBRETENSIONES

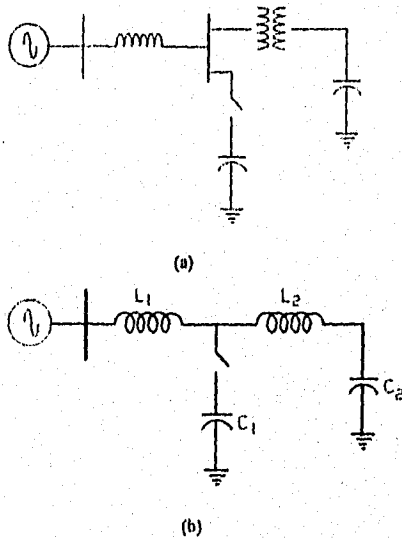


Figura. 5.4 Conexión de un banco remoto (a) diagrama unifilar de conexión del banco (b) diagrama eléctrico

Este aumento de voltaje puede ser evidenciado por la falla del equipo y apartarrayos en lugares remotos durante el switcheo de bancos de capacitores. El problema puede ser remediado por lo siguiente:

- 1) Desintonizando el circuito ya sea cambiando el tamaño del banco o moviendo el banco para su desintonización.
- 2) Usando resistencias de preinserción o interruptores para limitar las magnitudes de voltaje.
- 3) Desaterrizando el banco remoto.
- 4) Switcheando grandes bancos en más de una sección

## SOBRETENSIONES

La energización de un banco de capacitores, generalmente resulta en un sobrevoltaje transitorio del orden de dos veces el voltaje nominal del elemento al cual es conectado. En un sistema predominantemente inductivo, la frecuencia de este sobrevoltaje está dada por la siguiente expresión:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}; \text{ Hz}$$

donde:

**L** es la inductancia equivalente del sistema

**C** es la capacitancia del banco de capacitores

Cuando se energiza un banco de capacitores, con una corriente de 60 Hz, se crea una carga atrapada o voltaje que es aproximadamente igual al voltaje en la fuente para el banco. Esto resulta, debido a la carga que reside por la capacitancia. Por lo tanto, el recierre de la línea puede resultar un transitorio largo si la fuente de voltaje y el voltaje debido a la carga atrapada son iguales en polaridad y en magnitud. Los transitorios de maniobra de recierre en los sistemas de potencia, se encuentran entre 2.5 a 3.5 p.u. pudiendo llegar hasta 4.0 p.u. por medio del uso de las llamadas resistencias de preinserción en los interruptores de los sistemas en alta tensión, las ondas de recierre se pueden reducir a valores entre 1.2 a 2.5 p.u. si se usan reactores.

La capacitancia y la reactancia de magnetización no lineal del reactor, forman un circuito oscilatorio no lineal de altas pérdidas que disipa la energía rápidamente, normalmente en 15 ciclos, el transitorio de sobretensión por recierre es del mismo orden de magnitud que las sobretensiones por energización.

La determinación del sobrevoltaje transitorio es importante, dado que puede excitar sobrevoltajes resonantes en otros puntos del sistema. La magnitud de estos sobrevoltajes, depende de los factores que a continuación se indican.

### 5.6.3 Característica del sistema en el punto de conexión

La magnitud del sobrevoltaje transitorio producido durante la energización de bancos de capacitores, es mayor a medida que el sistema es menos robusto. Un indicador de la robustez de un sistema, es el nivel de corto circuito. A mayor nivel de corto circuito, el sistema es más robusto. De tal manera, que dependiendo de la relación entre el valor de corto circuito y la capacidad del banco de capacitores, será la magnitud del sobrevoltaje.

### 5.6.4 Presencia de otros bancos de capacitores

La operación simultánea, en el mismo nivel de voltaje, de otros bancos de capacitores, eléctricamente cercanos al banco de capacitores que se está energizando, da como resultado una gama múltiple de altas frecuencias que deben ser consideradas. Las frecuencias de resonancia dependen del número de bancos de capacitores que estén simultáneamente en operación. A mayor número de bancos de capacitores, menor será la magnitud de la frecuencia de resonancia.

## 5.7 CORRIENTE DE ENERGIZACIÓN (INRUSH)

Durante la energización de bancos de capacitores, se producen grandes magnitudes de corrientes a través del mismo. El circuito equivalente para el caso de banco de capacitores aislados, se muestra en la figura 5.5, la cual consiste de un simple circuito RLC. La fuente, o el equivalente del sistema consiste de una resistencia  $R$  y de una inductancia  $L$ , o una reactancia inductiva  $X_L$ , en donde el valor de la resistencia  $R$  es normalmente pequeña comparada con  $X_L$  y proporciona el amortiguamiento de las corrientes de energización cuando el interruptor se cierra. En este caso, los parámetros tales como las resistencia y la inductancia del bus, así como las resistencias de contactos y de interruptores generalmente se omiten debido a que son valores de magnitud muy baja en comparación con los parámetros del sistema.

La corriente de energización de bancos de capacitores aislados, despreciando la resistencia, está dada por la siguiente expresión:

## SOBRETENSIONES

$$I_p = (E_s - E_c) \sqrt{\frac{C}{L}}$$

donde:

**$E_s$**  es el voltaje del sistema en el instante en que cierra el interruptor.

**$E_c$**  es el voltaje en el banco de capacitores.

**$C$**  es la capacitancia del banco de capacitores

**$L$**  es la inductancia del sistema.

La corriente de energización puede ser significativamente mayor, en la condición de que el banco de capacitores se *reenergice* con carga atrapada de polaridad opuesta a la del voltaje del sistema. Por diseño se requiere del orden de *cinco minutos* para que las unidades capacitoras se descarguen (norma IEEE-518).

En el caso de la energización de bancos de capacitores "espalda con espalda", se producen grandes magnitudes de corriente; por lo que es imprescindible la presencia de un reactor serie entre los bancos de capacitores.

### 5.8 LOS APARTARRAYOS

Los apartarrayos proporcionan protección contra los sobrevoltajes transitorios que se producen durante la energización y desenergización de los bancos de capacitores. Los apartarrayos que actualmente se utilizan, son de óxido de zinc; los cuales presentan una capacidad de energía mucho mayor en comparación con los apartarrayos de carburo de silicio, los cuales prácticamente ya no se utilizan. Es importante determinar la energía que deberán disipar los apartarrayos, durante las maniobras de energización de los bancos de capacitores, con la finalidad de confirmar su adecuada protección. Su función principal es limitar las ondas de sobretensión de frente lento (ondas por maniobras) y de frente rápido (ondas atmosféricas) que entran en la instalación.

## SOBRETENSIONES

Los apartarrayos de óxido de zinc solo conducen durante el transitorio de tensión después de un tiempo en que se rebasa la tensión de conducción. En la selección del apartarrayos se debe determinar:

- Tensión nominal
- Corriente de descarga
- Tensión de restablecimiento
- Margen de protección

El apartarrayos debe estar lo más cerca del banco de capacitores para la protección de éste o del aparato eléctrico a proteger, así también un apartarrayos puede proteger una determinada zona.

### 5.9 DESENERGIZACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES.

Cuando un banco de capacitores es desconectado del sistema eléctrico de potencia, aparece un voltaje entre los contactos del interruptor. A esta diferencia de potencial, se le conoce como voltaje de recuperación. Si el voltaje de recuperación excede la rigidez dieléctrica existente entre los contactos del interruptor, ya separados físicamente; se producirá un reencendido (restrike) el cual equivale a una energización del banco de capacitores con carga atrapada de polaridad opuesta.

La condición más favorable para que se produzca un reencendido, ocurre medio ciclo después de que el interruptor ha abierto (instante en el que el voltaje del sistema está en su valor pico máximo y con polaridad opuesta al voltaje del banco de capacitores). El voltaje de reencendido puede alcanzar valores de hasta 3 p.u. y someter a grandes esfuerzos a los apartarrayos y en general al equipo eléctrico primario. La robustez del sistema, la capacidad del banco de capacitores y el nivel de protección del apartarrayos; son factores determinantes en la ocurrencia de reencendidos en el interruptor del banco de capacitores.

Las sobretensiones de restablecimiento, resultan de una ruptura en el voltaje que tiende a crecer a través de los contactos del interruptor durante la apertura subsecuente a la interrupción del circuito. Los interruptores de potencia se deben diseñar con un valor normalizado específico del índice de elevación de la tensión transitoria de restablecimiento, así como la magnitud de esta tensión.

Si el voltaje de recuperación o restablecimiento es mayor que la resistencia del medio de interrupción, el interruptor presentara problemas de reencendido del arco. Si esto ocurre en forma repetida, el voltaje transitorio del sistema puede ser excesivo y hacer fallar el aislamiento del propio interruptor o de otros equipos asociados a la instalación.

El reencendido del dispositivo de interrupción puede resultar en una alta onda de voltaje en el sistema puede provocar una severa energía en el apartarrayos o daño al equipo cercano si no se protege adecuadamente. Por eso es deseable un cambio en los interruptores que minimicen la posibilidad de un reencendido.

### **5.10 ENERGIZACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES ESPALDA CON ESPALDA**

Cuando un banco de capacitores es energizado como se muestra en la figura 5.5 se producen transitorios de alta magnitud, ahora conectando un banco en paralelo (energización espalda con espalda), se producen transitorios de alta corriente la cual circula entre los bancos. Sin embargo, la inductancia limitante es la inductancia entre la misma del banco y la inductancia del sistema, es por eso mucho más alta la magnitud y la frecuencia de esta corriente de inrush, que la corriente de inrush de un banco aislado. Aun cuando estas altas magnitudes y altas frecuencias de energización usualmente no contienen suficiente energía para causar daños al equipo de alta tensión, tales como transformadores y apartarrayos, estos pueden producir problemas tales como la operación de fusibles de capacitores individuales y la interferencia de señales, con ondas portadoras vecinas a los bancos de capacitores, así como las tensiones transitorias pueden inducirse en los cables de control y producir operaciones falsas de los relevadores e interruptores.



La alta frecuencia de inrush puede exceder la capacidad momentáneamente de frecuencia transitoria del dispositivo de switcheo dado por  $I^2t$  que resisten los fusibles de capacitores. Esto puede causar también una falsa operación de los relevadores de protección y excesivos voltajes para transformadores de corriente en el neutro, fase o banco de capacitores estrella aterrizado.

El switcheo de capacitores espalda con espalda es tipificado por el circuito de la figura 5.6. Cuando se energiza C2, la energía que ya estaba almacenada en C1 es transferida inicialmente hacia C2 resultando una alta corriente de energización en los bancos de capacitores. La magnitud de esta corriente es limitada solamente por la reactancia y la resistencia entre C1 y C2, las cuales son usualmente muy pequeñas. Como en el caso de la energización de un banco aislado, la resistencia R3 produce el amortiguamiento en el circuito. La figura 5.6 se puede reducir al circuito equivalente que se muestra en la figura 5.7.

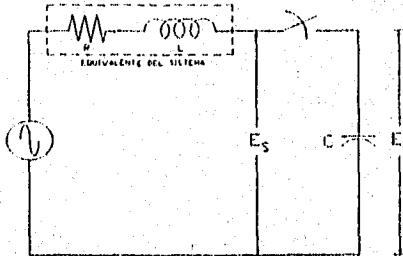


Figura. 5.5 Energización de un banco de capacitores.

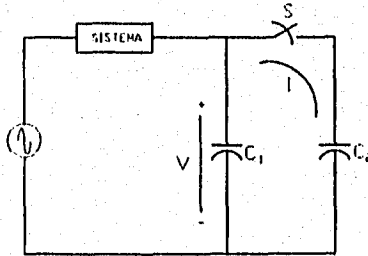


Figura. 5.6 Energización de banco de capacitores espalda con espalda.

## SOBRETENSIONES

$L_1$  y  $L_2$  son las inductancias propias de los dos capacitores,  $L_3$  es la inductancia de la barra de interconexión entre los dos bancos y  $R_3$  es la resistencia total de la barra que consiste en los conectores de la barra, los contactos del interruptor, los fusibles y los valores inherentes de resistencias de los propios capacitores (esta resistencia de los capacitores se incluye en el modelado si esta disponible). En este caso los parámetros del sistema no se incluyen en el circuito equivalente.

A diferencia del caso de energización de un banco de capacitores aislado, los parámetros de la impedancia de la barra son necesarios para simular más precisamente la energización espalda con espalda. De acuerdo al circuito de la figura 5.7, el valor de corriente de energización máximo ocurre cuando el interruptor cierra en el instante de voltaje pico del sistema, y esta dado por:

$$I_{pico} = (V_0) \sqrt{\frac{C_{eq}}{L_{eq}}}$$

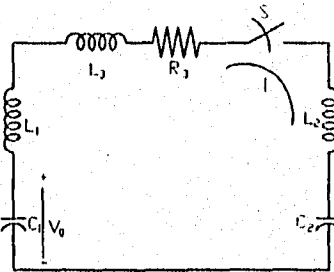


Figura. 5.7

donde:

$$L_{eq} = L_1 + L_2 + L_3$$

y

$$C_{eq} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

La resistencia se desprecia debido al estudio de un circuito oscilador. Es común encontrar en este caso magnitudes de 10 a 20 kA con frecuencias que varían desde 20 hasta 30 kHz. Estos valores de corriente son tan altos, que cuando se distribuyen entre los tanques de los capacitores individuales, son la causa de las molestas operaciones de los fusibles.

## SOBRETENSIONES

Cuando la corriente de inrush es excesiva, una o más combinaciones se siguen los siguientes pasos a tomar:

- Incluir reactores limitadores de corriente para disminuir el pico de corriente y frecuencia del transitorio de inrush oscilatorio.
- Incluir resistencias de preinserción. Estas resistencias son diseñadas para sobreamortiguar el alto voltaje producido al cierre de los interruptores.
- Los capacitores switchcados sean de pequeñas capacidades.
- El control del interruptor cierre sobre el voltaje de cero a través del switch.

### Ejemplo:

Teniendo el siguiente circuito se efectuara una simulación en el EMTP para una puesta en servicio de capacitores espalda con espalda. Uno de los capacitores se encuentra ya energizado (interruptor cerrado PB1LA-PB1CA) y el otro banco de capacitores se hace la puesta en servicio (conectando el interruptor PB2LA-PB2CA).

# SOBRETENSIONES

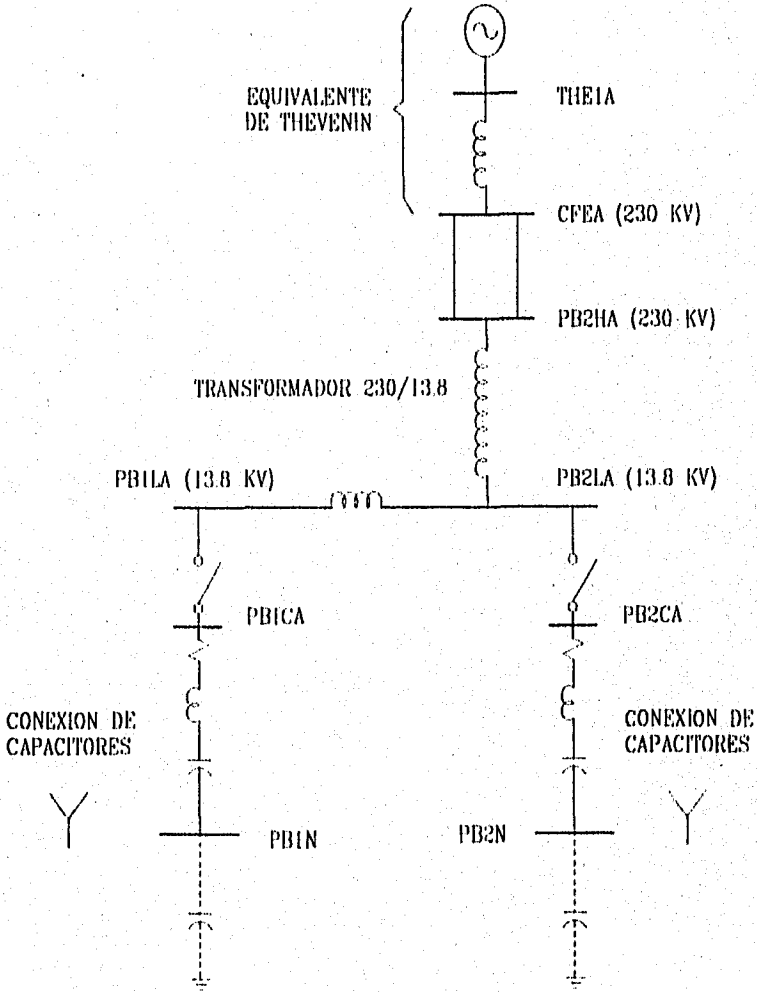


Figura 5.8 Capacitores conexión espalda con espalda.

## SOBRETENSIONES

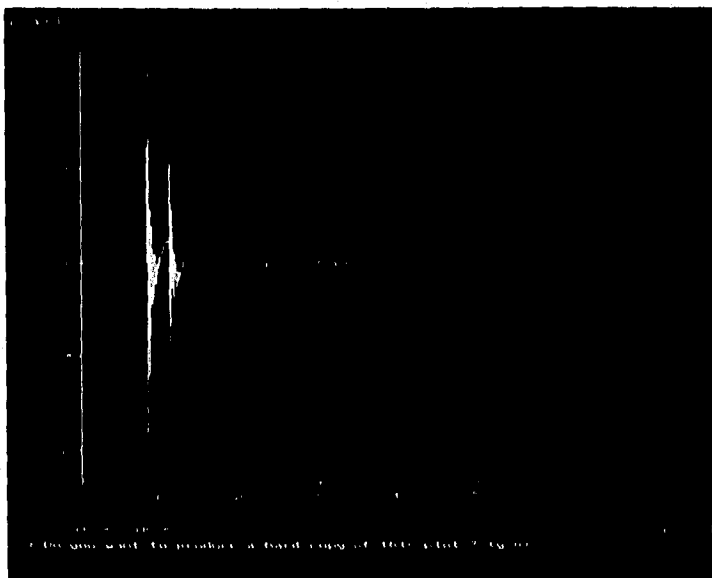
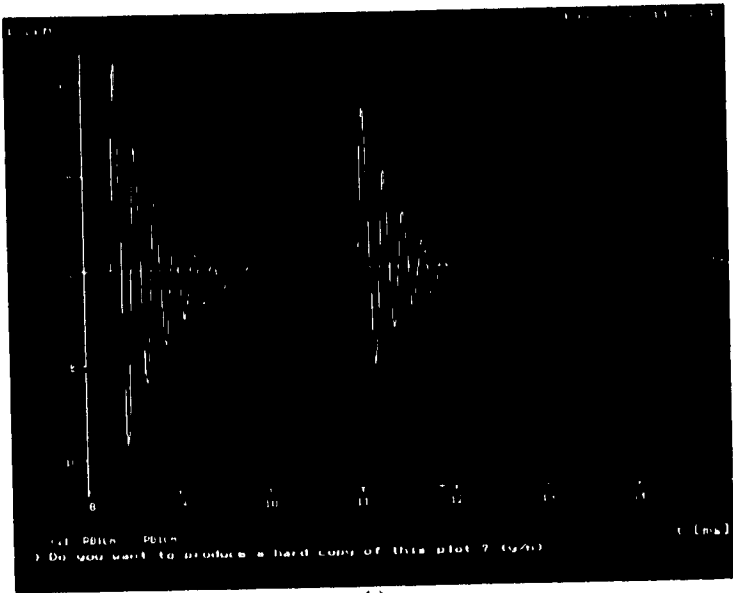


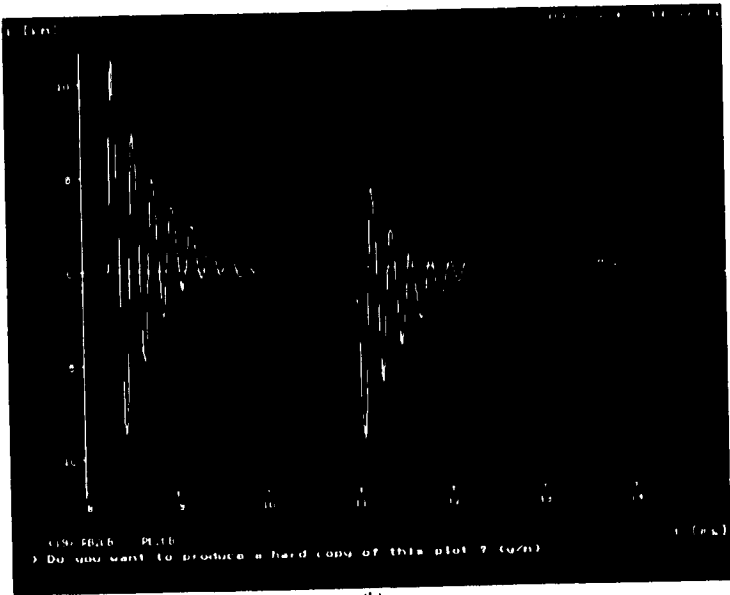
Figura 5.9 Simulación de energización de un banco espalda con espalda

En la figura 5.9, la simulación es obtenida de la conexión PB1LA-PB1CA al energizar un segundo banco de capacitores, el primer banco de capacitores se encuentra en servicio y al operar el segundo banco de capacitores en el tiempo 0.0083 segundos se observa como el primer banco de capacitores es afectado por el transitorio que circula en la malla provocando la elevación de la corriente.

SOBRETENSIONES

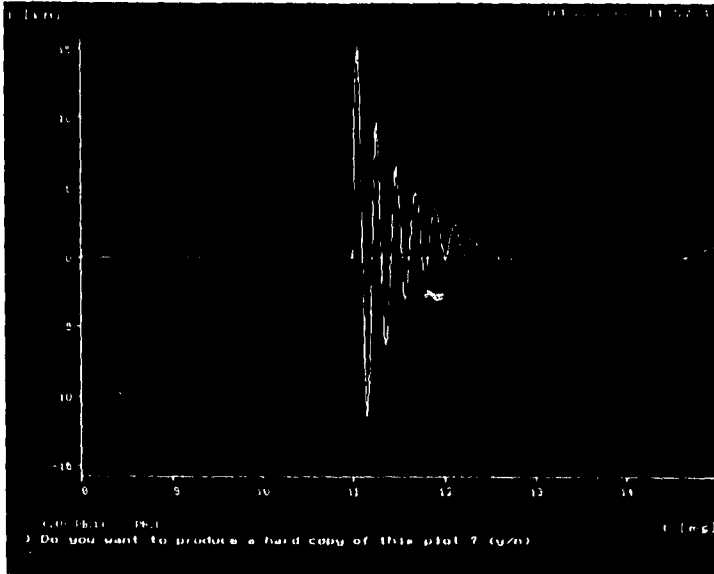


(a)



(b)

SOBRETENSIONES



(c)

Figura 5.10 Simulaciones por cada fase del primer banco de capacitores con una escala de menor de tiempo. (a) fase A el interruptor opero en 0.0083 segundos, (b) fase B el interruptor entro en operación en 0.0055 segundos, (c) fase C el interruptor opero en 0.0110 segundos

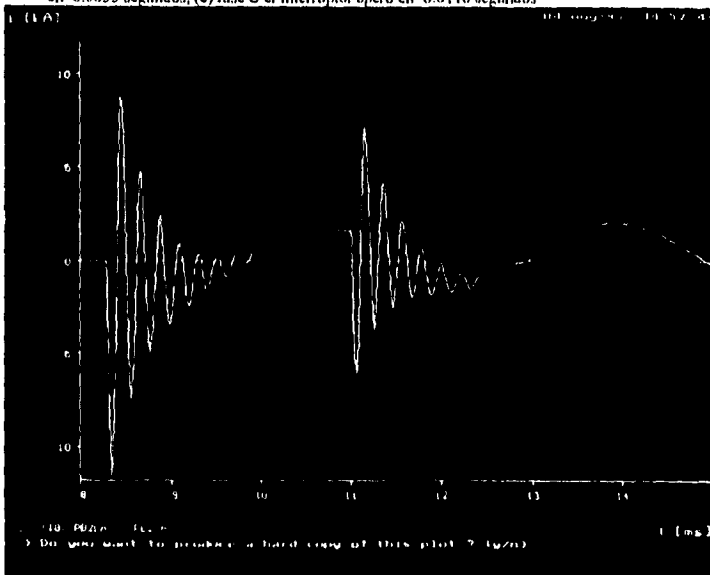


Figura 5.11 Simulación del banco energizado espalda con espalda.

## SOBRETENSIONES

En la figura 5.11 se muestra la misma energización en la fase A del segundo banco de capacitores, pero esta simulación es en la conexión PB2LA-PB2CA, en la cual no hay corriente al principio de la gráfica puesto que esta abierto el interruptor, al cerrar se energiza el banco de capacitores presentándose un transitorio de corriente muy alta en dicho banco de capacitores.

Como estos bancos de capacitores son estrella con neutro flotante se determino en las simulaciones que al energizar el segundo banco de capacitores conexión espalda con espalda, cada fase se energiza en diferentes tiempos debido a la disparidad del interruptor, cada fase es afectada al operar el interruptor debido al tipo de conexión del banco, puesto que no hay circulación a tierra, esta circulación solo se da entre las líneas de cada fase, esto se visualiza en la figura 5.11 en la conexión del banco de capacitores.

En los transitorios vistos anteriormente se clasifican en frentes de ondas rápidas y frentes de ondas lentas, los denominados ondas de frente lento son aquellos transitorios debido a maniobras y los de frente rápido son por descargas atmosféricas.

### 5.11 CORRIENTE DE OTRUSH

La corriente de outrush ocurre cuando a un banco de capacitores grande se realiza una maniobra de cierre de interruptores cercano a una falla. El resultado de esto es: una alta frecuencia, una alta magnitud de corriente que puede fluir al interruptor que no esta diseñado para estas consideraciones. Las limitaciones para las corrientes de inrush son considerados para limitar las corrientes de outrush.

La figura 5.12 ilustra el circuito correspondiente al calculo de la corriente de outrush para un banco aislado. El criterio de limitación es algunas veces el producto  $I_{pk} \cdot f$ . Es interesante notar que este producto es independiente del tamaño del capacitor, en otras palabras, únicamente depende del pico del voltaje cuando los interruptores cierran dentro de la falla.



## SOBRETENSIONES

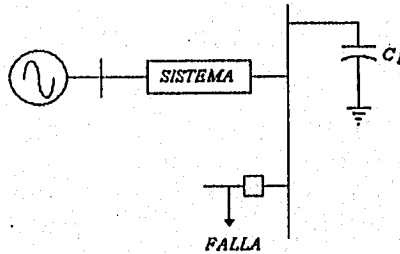


Fig. 4.12

DIAGRAMA PARA CONDICIONES DE CORRIENTE DE OUTRUSH

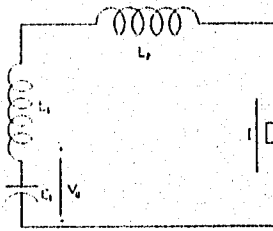


Figura. 5.13

$$I_{pico} * f = \frac{V_0}{2\pi L_{eq}}$$

Con un banco de capacitores en paralelo, hay un número diferente de caminos para configurar los capacitores y los reactores. Unas pocas opciones son indicadas en las figuras siguientes. Cada opción presenta una ventaja y desventaja.

**Opción I:** Separar los reactores para los requerimientos de inrush y outrush. Cuando un reactor es necesario para la corriente de outrush, en adición se coloca otro pequeño reactor para limitar la corriente de inrush, ésta puede ser una configuración óptima.

## SOBRETENSIONES

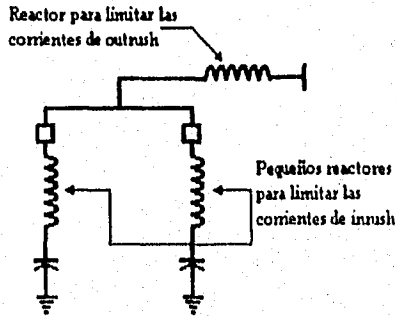


Figura. 5.14 Reactores limitadores de corrientes.

Opción 2: Reactor únicamente para las corrientes de outrush, e interruptores para las corrientes de inrush. Si la corriente de inrush para el switcheo de espalda con espalda puede ser limitada en niveles aceptables sin reactores limitadores de corriente, este es el más probable para una configuración económica. Resistencias de cierre o control de cierre para cerrar los contactos cerca del voltaje de cero son comúnmente métodos alternativos para limitar la corriente de inrush. El reactor es usado para limitar la corriente de outrush para niveles aceptables. Una desventaja de esta opción es la alta magnitud de corriente y de frecuencia que puede ocurrir en el reencendido.

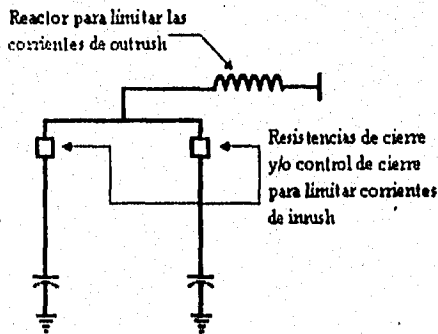


Figura. 5.15 Conexión con reactor e interruptor para las corrientes.

## SOBRETENSIONES

Opción 3: Reactores serie para cada banco de capacitores.

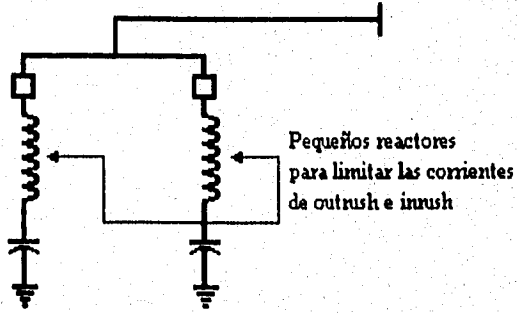


Figura. 5.16 Conexión con reactores limitadores de corriente .

## CAPITULO VI

### PROTECCIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

Los objetivos de una protección optimizada para un banco de capacitores es la de asegurar su disponibilidad máxima, proporcionar la protección convencional que se aplica en condiciones normales de 60 Hz. como son:

- Fallas entre fases (sobrecorriente instantánea).
- Fallas a tierra (corriente de secuencia cero).
- Fallas en un elemento capacitor con operación de fusible (desbalance).

Así también evitar los indeseables disparos asociados con cualquiera de las condiciones antes mencionadas, por ejemplo:

- Corriente transitoria de inrush que origina el disparo por sobrecorriente o aquellos disparos de la protección contra fallas a tierra que se atribuyen a la saturación de un transformador de corriente.
- Armónicas que originan el disparo de los relevadores.

Las protecciones para un banco de capacitores requieren de la aplicación de relevadores de tiempo inverso optimizada con respecto a una sobrecarga por armónicas en los capacitores, proporcionar una coordinación adecuada entre los capacitores adyacentes de tal forma que se minimice la cantidad de capacitancia desconectada del sistema en caso de un disparo de sobrecarga y de controlar la distorsión del voltaje por armónicas en el sistema de potencia asociado, así también de mantener un balanceo en el banco para que cada unidad capacitadora no sobrepase el 10% del voltaje nominal perjudicando al banco y dispararse la protección de desbalanceo cuando esto suceda.

## 6.1 CARGA Y PROTECCIÓN A FRECUENCIA FUNDAMENTAL

Los capacitores tienen impedancias fijas, a diferencia de los motores y transformadores que tienen impedancia de salida variables. Así, los capacitores no se pueden sobrecargar por componentes a frecuencia fundamental, excepto en el poco probable caso de tener un voltaje de suministro excesivamente alto (110% del nominal).

Entonces a diferencia de otros equipos eléctricos, un capacitor experimenta una sobrecorriente de frecuencia fundamental excesiva solo después de una falla, cuando se requiere que la protección libere la falla más que la prevenga. O en el caso de un fusible fundido, la impedancia de una pierna se incrementa y la corriente de desbalance que resulta indica la presencia de una falla parcial en el banco de capacitores.

Así se requiere que la función protección contra fallas a tierra y desbalance tenga una respuesta instantánea y de tiempo inverso, ya que ellas indican una falla existente.

## 6.2 SOBRECARGA POR FRECUENCIAS ARMÓNICAS Y SU PROTECCIÓN

Los capacitores se sobrecargan generalmente solo por componentes armónicos, lo que provoca, o un esfuerzo excesivo por voltaje (típico en el caso de capacitores de medio y alto voltaje) o un esfuerzo térmico por sobrecorriente (típico en el caso de capacitores de bajo voltaje, así como también en los reactores de los filtros).

La mayoría de las instalaciones de bancos de capacitores sufren de esfuerzos excesivos por voltajes en el caso de sobrecargas armónicas que causan descargas parciales dentro de los elementos del capacitor y que eventualmente conducen a la falla del elemento, es decir, cuando una armónica está presente en un banco de capacitores la propia magnitud de la armónica no afecta al banco de capacitores sino la duración de la armónica es la que va a afectar al banco a esfuerzos mayores y de ahí provocar una falla.

Debido a que la impedancia de un capacitor es inversamente proporcional a la frecuencia, las corrientes armónicas de bajo orden (3<sup>o</sup>, 5<sup>o</sup>, etc.) producen niveles más altos de esfuerzos

por voltaje, que las armónicas de orden más alto (11<sup>o</sup>, 23<sup>o</sup>, etc.). La protección optimizada contra una sobrecarga armónica debe considerar entonces, tanto la corriente como el voltaje.

### 6.3 PROTECCIÓN CON FUSIBLES

La protección por medio de fusibles es la más usada para bancos de capacitores y pueden aplicarse a fin de proteger unidades individuales o unidades en grupo. A pesar de que la protección individual de capacitores tiene la ventaja de ser más selectiva, de permitir usar fusibles más pequeños y de indicar directamente la unidad fallada, presenta inconvenientes. En el caso de un banco conectado en estrella con neutro flotante, la falla y desconexión de algunas unidades en alguna de las fases origina un desplazamiento eléctrico del neutro que a su vez, ocasiona una sobretensión en los capacitores de la fases. En casos de bancos conectados en estrella con neutro a tierra o en delta, cuyas fases estén formadas por varias filas de capacitores conectados en serie entre sí (conexión serie-paralelo), la falla y desconexión de algunas unidades de las filas puede originar una redistribución de la tensión en la filas de capacitores.

El mayor beneficio de aplicar fusibles para proteger unidades en grupo es que se presenta como la forma más económica de proteger bancos de capacitores, sin embargo, cuando las fases están compuestas de muchas unidades, los fusibles en grupo no pueden proporcionar la sensibilidad necesaria para la detectar las fallas. Además, los fusibles para unidades individuales proporcionan una mayor sensibilidad para detectar incrementos de corriente en una unidad fallada, pero cuando un fusible opera los otros capacitores se sobretensionan, hasta que la unidad es reparada o cambiada, éste tipo de protección de fusibles individuales es el mas usado en la práctica.

El capacitor es un elemento muy sensible a la tensión, un 10% de sobrevoltaje de la tensión nominal lo puede hacer fallar, por lo tanto, cuando un cierto número de unidades capacitoras sale fuera de servicio ponen en peligro las unidades restantes, esto es por el exceso de tensión al que son sometidas las unidades capacitoras cuando un elemento falla, a menos que el banco sea lo suficientemente robusto para que la salida de unos capacitores no resulte significativo para el banco de capacitores sin pasar el límite de tensión.

Las practicas de aplicación de fusibles que actualmente se usan consisten en el empleo de los dispositivos de expulsión; donde la corriente de corto circuito es alta, se utilizan con fusibles limitadores de corriente. Cuando se selecciona un fusible para proteger un banco de condensadores, hay que considerar: la corriente de carga, la corriente de puesta en servicio, la energía de ruptura del tanque, la corriente de corto circuito que se tiene en el lugar de sus instalación y el tipo de conexión del banco.

Independientemente de si se emplean fusibles para un solo capacitor o un grupo primero se debe determinar la capacidad de la unidad, es decir, la corriente por fase. Se debe tomar en cuenta el contenido de armónicas con un valor de 1.35 veces la corriente de carga, en el caso de los fusibles tipo K y T, estos fusibles normalmente pueden conducir 150% del valor de su corriente nominal. Esto permite que el banco sea protegido con los fusibles de una manera adecuada.

Los fusibles tipo K y T tienen un tiempo de fusión que depende de la corriente y el tiempo que dure la corriente que este circulando por el fusible, es decir, cuando una corriente no permanece el tiempo suficiente dependiendo del tipo de fusible y sus características de fusión del mismo, el fusible permanecerá sin fundirse, pero si la corriente y el tiempo son suficientes el fusible se fundirá. Un ejemplo fácil de observar es cuando un banco de capacitores es energizado, las corrientes de inrush son grandes y estas circulan por el fusible, si esta corriente no permanece el tiempo suficiente en el fusible, éste no sufrirá ningún daño continuando en operación. Las curvas de los fusibles tipo K y T se muestran en la figura 6.1.

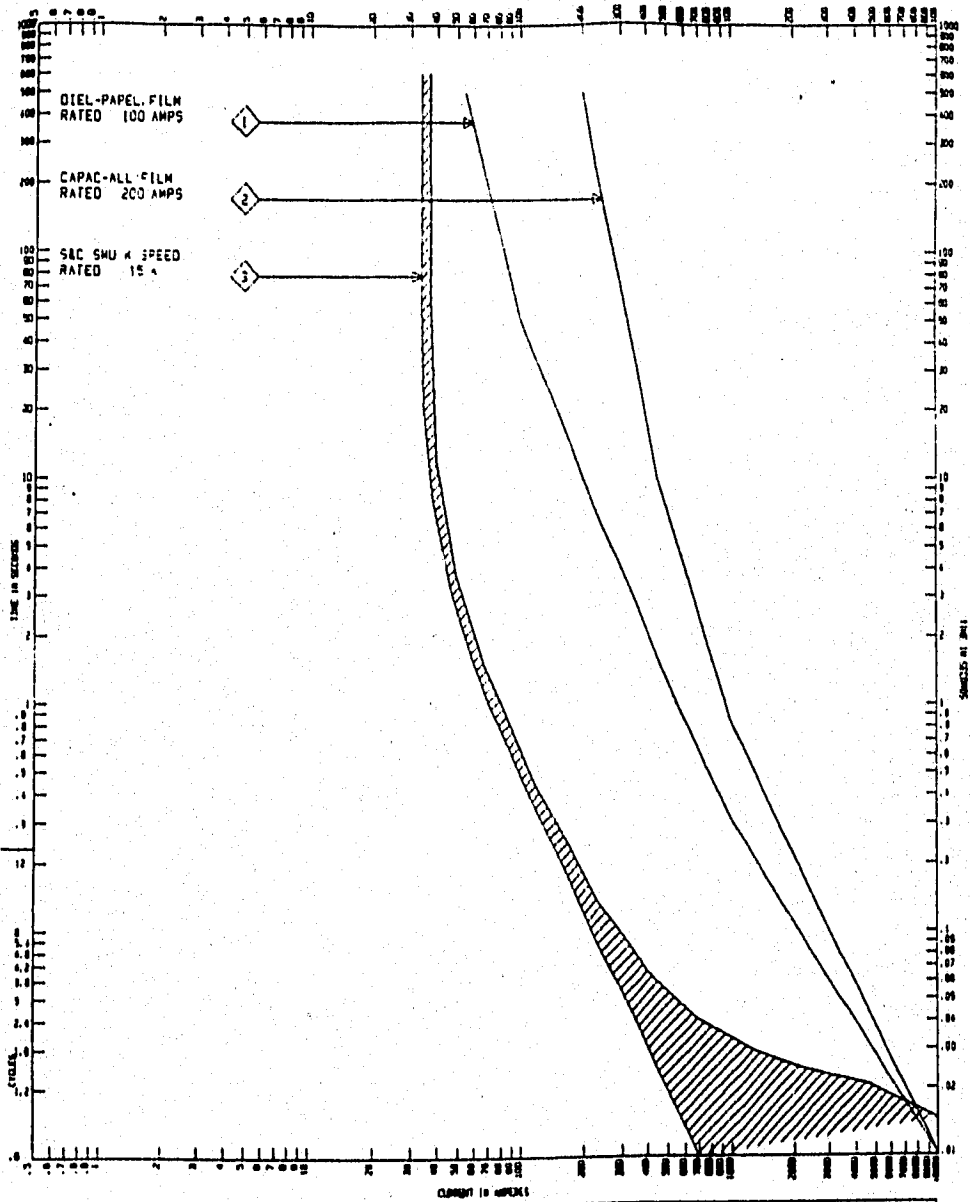
Otro factor que se debe tener en cuenta cuando se seleccionan los fusibles para la protección del banco, es la resistencia a la ruptura del tanque de los capacitores. El fusible, para prevenir su ruptura no debe permitir que la energía ( $i^2t$ ) que fluya dentro del tanque sobrepase cierto limite. Los limites varían en un rango de 80 000 amperes<sup>2</sup>-segundo hasta un millón de amperes<sup>2</sup>-segundo, a medida que aumenta la energía, mayor es la probabilidad de que el tanque se perfore. La probabilidad de ruptura del tanque puede definirse como la probabilidad de daño de éste como resultado de una falla, que puede ser desde una fractura o pérdida del sello de la barra, hasta una violenta explosión del mismo. Es posible que una ruptura de tanque ocurra como resultado de pequeñas corrientes de corto circuito que fluyan durante grandes periodos. Con objeto de evitar tales rupturas se compara la curva de ruptura del tanque con la curva del fusible, para determinar el tiempo que puede permanecer una falla de corto circuito en la unidad capacitiva sin que llegue a explotar dicha unidad. Para el

rango de corriente de corto circuito, por la falla de una unidad, el tiempo total de interrupción de cualquier fusible deberá ser coordinado con las curvas de ruptura del tanque, la curva de ruptura del tanque se muestra en la figura 6.1 En la cuál se compara con las curvas de los fisibles tipo K y T.

Otra condición interesante que puede existir en un sistema de distribución es la conexión y desconexión de un banco de capacitores cercano a otro, esto es, cuando se energiza un banco, el banco adyacente descarga su energía de descarga en el banco que se energiza. Esta energía está limitada únicamente por la impedancia del banco y la de el circuito entre los dos bancos. Usualmente al hacer un arreglo de dos bancos de capacitores que se encuentran cercanos debido al espacio en la subestación, para representar una impedancia mayor se coloca un reactor entre los bancos de capacitores para limitar la energía de descarga del banco, con esto los fusibles no operan dado a que la corriente a sido limitada por la impedancia del reactor.



PROTECCIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES



PROTECCION DE UNIDADES CAPACITORES. BCO. DE 15 MVAR

TIME-CURRENT CHARACTERISTIC CURVES  
S. E. TEPIC II. TEPIC. NAYARIT

CURVES ARE PLOTTED TO 13200 V

NO. \_\_\_\_\_  
DATE 04-04-93

FIG. G.1

## 6.4 PROTECCIÓN CON RELEVADORES

Los bancos de capacitores de potencia se protegen con fusibles individuales y con relevadores. Una forma de proteger a un banco de capacitores es colocando un fusible en cada unidad. En este caso, cuando un fusible aísla una unidad fallada, se presenta un incremento de tensión en las unidades restantes, por lo tanto, para evitar daños por sobretensiones, se protegen los bancos con relevadores, que deben proporcionar la señal de disparo al equipo de desconexión del banco, cuando el exceso de tensión se acerca a valores peligrosos como del 10% del voltaje arriba del nominal.

La selección de la configuración del banco y el diseño del mismo debe incluir un análisis del desbalance propio del banco, el cual se debe a las variaciones presentadas durante la fabricación de las unidades capacitoras que componen el banco y al desbalance de tensiones del sistema, por lo que se debe ajustar el relevador a dichas condiciones para que no opere innecesariamente y desconecten al banco de capacitores.

Los relevadores que protegen bancos de capacitores se conocen como relevadores de desbalance, debido a que detectan la falla del aislamiento de una unidad dado que la operación del fusible ha dejado un desbalance en el banco, por lo que aumentan aleatoriamente los voltajes en las unidades capacitoras. Un relevador de desbalance debe:

- Coordinarse adecuadamente con los fusibles, y además proporcionar un medio visual para localizar las unidades falladas.
- Tener la suficiente sensibilidad como para accionar una alarma cuando se produzca la pérdida de solo una unidad capacitadora, y ordenando el disparo del equipo de protección cuando quede fuera de servicio un número de unidades tal, que causen una condición de sobretensión en exceso de 10% de la tensión nominal de cada unidad capacitadora.
- Tener un tiempo de respuesta corto para que sea mínimo el daño debido a una falla de arco interno y evitar falsas operaciones debido a corrientes de puesta en servicio, corrientes por descarga atmosféricas, por apertura o cierre de equipo cercano o por que los contactos del equipo de seccionamiento no abran simultáneamente.
- Estar protegido contra tensiones transitorias que aparezcan en el alambrado de control.

## PROTECCIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

- Tener un dispositivo de apertura definitiva que impida la conexión automática del banco de capacitores después de que se detecta una falla en él.
- Proporcionar un medio de compensación que corrija el efecto del desbalance de las tensiones del sistema o el desbalance propio de las unidades por variaciones en la fabricación (rangos del relevador).

### 6.5 BALANCEO DE UN BANCO DE CAPACITORES.

El balanceo de un banco de capacitores se refiere a que el valor de la capacitancia de cada una de las fases del banco de capacitores, esté lo mejor equilibrado posible y que las tres fases conformen una misma capacitancia. Dado que el valor de capacitancia de una unidad capacitadora puede variar dentro de un margen comprendido entre 0 y el +15% de su valor nominal. El balanceo del banco de capacitores se lleva a cabo previo a la puesta en servicio del mismo o bien cuando se hayan sustituido varias unidades capacitoras. A continuación se enumeran en forma generalizada, los pasos del balanceo de un banco:

- Detección de desbalance
- Medición de capacitancias
- Cálculo de desbalance original
- Cálculo de desbalance con cambios
- Instalación o remplazo de unidades
- Verificación de la corriente de desbalance

## PROTECCIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

Las diversas causas que provocan desbalance en un banco de capacitores son:

- El originado por el reemplazo de unidades.
- El desbalance existente en el sistema.

### 6.6 OBTENCIÓN DEL VOLTAJE DE DESBALANCE EN EL NEUTRO DE UN BANCO DE CAPACITORES, CONECTADO EN ESTRELLA NO ATERRIZADO.

Ahora, observaremos un ejemplo en el cual se analizarán las condiciones del banco con una unidad fallada y se mantienen las condiciones de voltaje y corriente para seguir en operación dicho banco. Posteriormente se analizará con dos unidades falladas. En el ejemplo, se dan diferentes valores a las unidades capacitivas, teniendo con esto un acercamiento a la realidad de operación y del estudio de un banco de capacitores en operación.

#### I. Condiciones normales de operación.

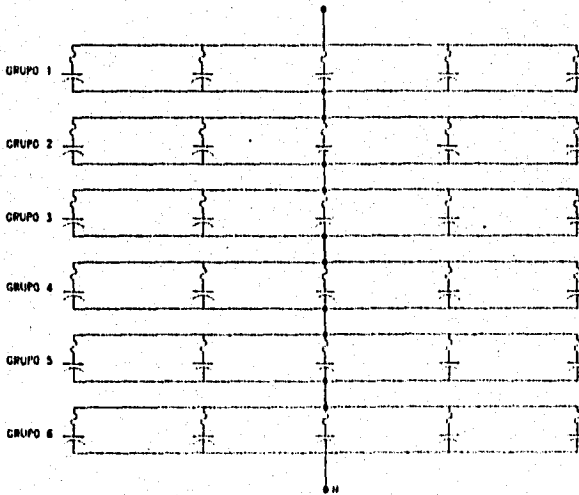


Figura. 6.2 Fase A del banco de capacitores.

## PROTECCIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

Los grupos 1 y 2 están formados por unidades capacitadoras de :

$$P_n = 300 \text{ KVAR's}$$

$$V_n = 13.28 \text{ KV.}$$

$$I_n = 22.59 \text{ Amps.}$$

$$X_C = 587.86 \Omega.$$

Los grupos 3, 4, 5 y 6 están formados por unidades capacitores de :

$$P_n = 300 \text{ KVAR's}$$

$$V_n = 13.8 \text{ KV.}$$

$$I_n = 21.7 \text{ Amps.}$$

$$X_C = 634.8 \Omega.$$

### *1.1 Reactancias de grupos :*

$$X_{\text{gpo1}} = 117.572267 \Omega$$

$$X_{\text{gpo2}} = 117.572267 \Omega$$

$$X_{\text{gpo3}} = 126.96 \Omega$$

$$X_{\text{gpo4}} = 126.96 \Omega$$

$$X_{\text{gpo5}} = 126.96 \Omega$$

$$X_{\text{gpo6}} = 126.96 \Omega$$

### *1.2 Reactancia de fases :*

$$X_{\text{fase}} = 742.9845333 \Omega$$

### *1.3 Parámetros para un voltaje en buses de 115 KV entre fases.*

Corriente de operación normal del banco de capacitores	=	89.36 A.
Potencia trifásica del banco de capacitores	=	17.8 MVAR's
Corriente de operación de cada unidad capacitadora	=	17.872 A.
Voltaje de operación de cada unidad capacitadora	=	11.06 KV.

PROTECCIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

**1.4 Parámetros para un voltaje en buses de 118.5 KV entre fases.**

Corriente de operación normal del banco de capacitores	= 92.08 A.
Potencia trifásica del banco de capacitores	= 18.90 MVAR's
Corriente de operación de cada unidad capacitadora	= 18.416 A.
Voltaje de operación de cada unidad capacitadora	= 11.4 KV.

**II Condiciones cuando sale de operación una unidad capacitadora.  
(Del grupo 1, fase "A")**

**II.1 Cálculo de reaktancias :**

Reaktancia del grupo fallado  $\Rightarrow X_{GPO1} = \frac{587.86}{4} = 146.965 \Omega$

Reaktancia de la fase "A"  $\Rightarrow X_{\phi A} = 772.377267 \Omega$

Reaktancia de la fase "B"  $\Rightarrow X_{\phi B} = 742.9845333 \Omega$

Reaktancia de la fase "C"  $\Rightarrow X_{\phi C} = 742.9845333 \Omega$

En la figura 6.3 se muestra el diagrama eléctrico del banco de capacitores cuando una de las unidades de la fase A falla, observando que las reaktancias de las fases B y C son iguales y la fase A es diferente provocando un desbalance en el banco .

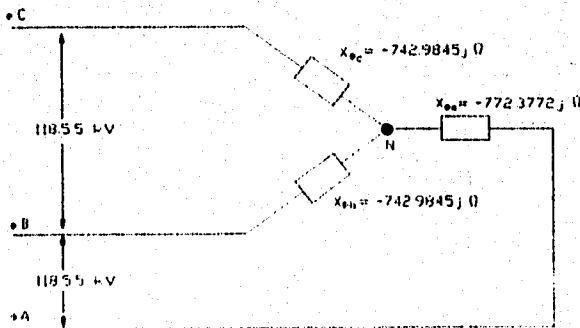


Figura. 6.1 Diagrama eléctrico, con una unidad fallada.

## PROTECCIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

### II.2 Cálculo de admitancias de fases y suma de las mismas.

$$A = \frac{I}{772.3772 \angle -90} = 1.2947E - 3j \text{ Mhos}$$

$$B = Y_C = \frac{I}{742.9845 \angle -90} = 1.3459E - 3j \text{ Mhos}$$

$$A + Y_B + Y_C = 3.98655E - 3j = 3.98655E - 3 \angle 90^\circ \text{ Mhos}$$

### II.3 Cálculo de corrientes

$$V_{AN} Y_A = 68416 \angle 0^\circ (1.2947E - 3 \angle 90^\circ) = 88.5785 \angle 90^\circ = 0 + j 88.5785 \text{ Amps.}$$

$$V_{BN} Y_B = 68416 \angle 240^\circ (1.3459E - 3 \angle 90^\circ) = 92.082 \angle 330^\circ = 79.74594 - j 46.04134 \text{ Amp}$$

$$V_{CN} Y_C = 68416 \angle 120^\circ (1.3459E - 3 \angle 90^\circ) = 92.082 \angle 210^\circ = -79.74594 - j 46.04134 \text{ An}$$

### II.4 Suma de corrientes

$$V_{AN} Y_A + V_{BN} Y_B + V_{CN} Y_C = 0 - j 3.504193 \text{ Amps.}$$

### II.5 Cálculo del voltaje de neutro a tierra

$$V_{GN} = \frac{V_{AN} Y_A + V_{BN} Y_B + V_{CN} Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}$$

$$V_{GN} = \frac{3.504193 \angle -90^\circ}{3.98655E - 3 \angle 90^\circ} = 879 \angle -180^\circ = -879 \text{ Volts.}$$

$$V_{NG} = +879 \text{ Volts.}$$

**11.6 Voltajes de fase al neutro corrido.**

$$\frac{118500}{\sqrt{3}} = 68416 \text{ Volts}$$

$$V_{AG} = V_{AN} + V_{NG} = 68416 \angle 0^\circ + 879 = 69295 \text{ Volts.}$$

$$V_{BG} = V_{BN} + V_{NG} = 68416 \angle 240^\circ + 879 = -34208 - 59250j + 879 = -33329 - j59250 \\ = 67980.77 \angle -119.358^\circ \text{ Volts.}$$

$$V_{CG} = V_{CN} + V_{NG} = 68416 \angle 120^\circ + 879 = -34208 + 59250j + 879 = -33329 + 59250 \\ = 67980.77 \angle 119.35^\circ \text{ Volts.}$$

**11.7 Corrientes de línea -  $I_A$ ,  $I_B$  e  $I_C$ .**

$$I_A = V_{AG} Y_A = 69295 \angle 0^\circ (1.2947E - 3 \angle 90^\circ) = 89.716 \angle 90^\circ \text{ Amps}$$

$$I_B = V_{BG} Y_B = 67980.77 \angle -119.358^\circ (1.3459E - 3 \angle 90^\circ) = 91.4968 \angle -29.358^\circ \text{ Amps.}$$

$$I_C = V_{CG} Y_C = 67980.77 \angle 119.35^\circ (1.3459E - 3 \angle 90^\circ) = 91.49688 \angle 209.35^\circ \text{ Amps}$$

**Voltaje del neutro a tierra ( $V_{NG}$ ) para bancos de capacitores en estrella flotante. [1]**

$$V_{NG} = \frac{V_{LG} (F_1)}{3S(P - F_1) + 2F_1}$$

$$V_{NG} = \frac{68416 (1)}{3(6)(5 - 1) + 2(1)} = 924.54 \text{ Volts.}$$

S = Grupos en serie

P = Unidades capacitores en paralelo por grupo

F<sub>1</sub> = Unidades falladas de un grupo.

Existe diferencia en el cálculo de  $V_{NG}$ , debido a que se tienen 2 grupos de unidades capacitores (13.28 KV, 300 KVAR's,  $I_n = 22.59$  Amps,  $X_C = 587.86 \Omega$ ) diferentes a



## PROTECCIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

los grupos restantes de cada fase (13.8 KV, 300 KVAR's,  $I_n = 21.7$  Amps,  $X_c = 634.8 \Omega$ ). En la figura 6.4 se muestra el comportamiento del banco de capacitores cuando falla la unidad observando un desplazamiento en el neutro con respecto a tierra.

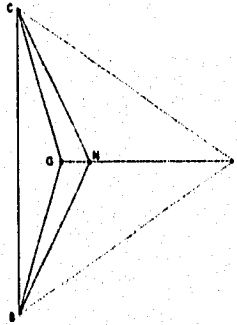


Figura 6.4 Diagrama vectorial de voltajes.

### II.9 Distribución de corrientes en la fase "A" del banco de capacitores, cuando falla una unidad capacitadora de un grupo.

Determinadas las corrientes por fase, la corriente en la fase A, se divide por las unidades capacitadoras que se encuentran operando, aumentando la corriente en las unidades capacitadoras debido a la distribución de la corriente.

$$I_{cap} = \frac{I_A}{cap} = \frac{89.716}{4} = 22.429 \text{ Amp}$$

$$V_c = I_c * Z_c = 22.429 * 587.86 = 13.182 \text{ kVolts}$$

$$\% \text{ Volts} = \frac{13.182}{13.280} * 100 = 99.26\%$$

Debido a la robustez del banco el voltaje nominal no sobrepasa el 110%, por lo que, no implicaría la desconexión del banco instantáneamente, la figura 6.5 ilustra el banco de

## PROTECCIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

capacitores en la fase A con la unidad fallada con sus respectivos voltajes y corrientes de cada grupo paralelo.

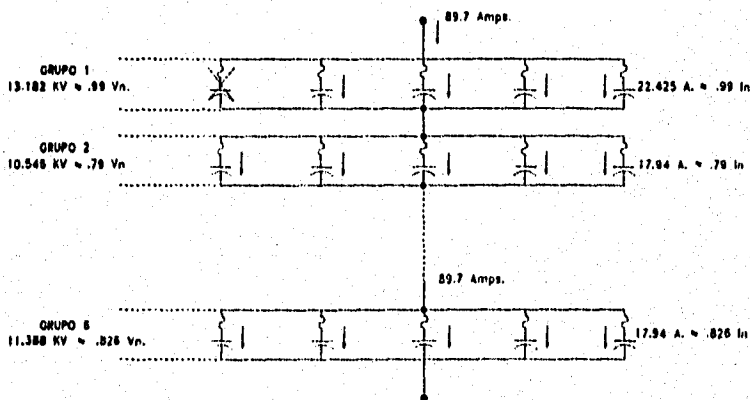


Figura. 6.5 Fase A del banco de capacitores con una unidad fallada.

donde:

Vn : Voltaje nominal de unidades capacitoras.

In : Corriente nominal de unidades capacitoras.

### III. Condiciones cuando salen de operación dos unidades capacitoras de un mismo grupo. (Unidades del grupo 1, fase "A")

Dado a la robustez del banco de capacitores, puesto que aun sufriendo de un desbalanceo por la pérdida de una unidad capacitadora el banco puede seguir en operación ya que no sobrepaso el 10% del voltaje nominal. Ahora fallando otra unidad capacitadora más, se hará el mismo análisis anterior para la salida de dos unidades capacitoras en la fase A.

#### III.1 Cálculo de reactancias :

$$\text{Reactancia del grupo fallado} \Rightarrow X_{(F)} = \frac{587.86}{3} = 195.953 \Omega$$

## PROTECCIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

$$\text{Reactancia de la fase "A"} \Rightarrow X_{\phi A} = 821.36 \Omega$$

$$\text{Reactancia de la fase "B"} \Rightarrow X_{\phi B} = 742.9845333 \Omega$$

$$\text{Reactancia de la fase "C"} \Rightarrow X_{\phi C} = 742.9845333 \Omega$$

### III.2 Cálculo de admitancias de fases y suma de las mismas.

$$Y_A = \frac{1}{821.36 \angle -90} = 1.217485E-3 \angle 90^\circ \text{ Mhos}$$

$$Y_B = Y_C = \frac{1}{742.9845 \angle -90} = 1.3459E-3 \angle 90^\circ \text{ Mhos}$$

$$Y_A + Y_B + Y_C = j 3.909285E-3 = 3.909285E-3 \angle 90^\circ \text{ Mhos}$$

### III.3 Cálculo de corrientes

$$V_{AN} Y_A = 68416 \angle 0^\circ (1.217485E-3 \angle 90^\circ) = 83.295 \angle 90^\circ = 0 + j 83.295 \text{ Amps}$$

$$V_{BN} Y_B = 68416 \angle 240^\circ (1.3459E-3 \angle 90^\circ) = 92.0811 \angle 330^\circ = 79.7445 - j 46.04 \text{ Amps}$$

$$V_{CN} Y_C = 68416 \angle 120^\circ (1.3459E-3 \angle 90^\circ) = 92.0811 \angle 210^\circ = -79.7445 - j 46.04 \text{ Amps}$$

### III.4 Suma de corrientes

$$V_{AN} Y_A + V_{BN} Y_B + V_{CN} Y_C = 0 - j 8.7856 \text{ Amps.}$$

### III.5 Cálculo del voltaje de neutro a tierra

$$V_{GN} = \frac{V_{AN} Y_A + V_{BN} Y_B + V_{CN} Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}$$

PROTECCIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

$$V_{GN} = \frac{-8.7856 \angle 90^\circ}{3.909285E - 3 \angle 90^\circ} = -2247.37 \text{ Volts.}$$

$$V_{NG} = 2247.37 \text{ Volts.}$$

III.6 Voltajes de fase al neutro corrido.

$$V_{AG} = V_{AN} + V_{NG} = 68416 \angle 0^\circ + 2247 = 70663 \text{ Volts.}$$

$$V_{BG} = V_{BN} + V_{NG} = 68416 \angle 240^\circ + 2247 = -34208 - 59250j + 2247 = -31961 - j59250 \\ = 67320.6 \angle -118.34^\circ \text{ Volts.}$$

$$V_{CG} = V_{CN} + V_{NG} = 68416 \angle 120^\circ + 2247 = -34208 + 59250j + 2247 = -31961 + j59250 \\ = 67320.6 \angle 118.34^\circ \text{ Volts.}$$

III.7 Corrientes de línea -  $I_A$ ,  $I_B$  e  $I_C$ .

$$I_A = V_{AG} Y_A = 70663 \angle 0^\circ (1.217485E - 3 \angle 90^\circ) = 86.031 \angle 90^\circ \text{ Amps.}$$

$$I_B = V_{BG} Y_B = 67320.6 \angle -118.34^\circ (1.3459E - 3 \angle 90^\circ) = 90.6 \angle -28.34^\circ \text{ Amps.}$$

$$I_C = V_{CG} Y_C = 67320.6 \angle 118.34^\circ (1.3459E - 3 \angle 90^\circ) = 90.6 \angle 208.34^\circ \text{ Amps}$$

III.8 Cálculo de voltaje del neutro a tierra, considerando 2 unidades capacitoras desconectadas de un mismo grupo.

$$V_{NG} = \frac{V_{LG} (F_1)}{3S(P - F_1) + 2F_1}$$

$$V_{NG} = \frac{68416(2)}{3(6)(5-2) + 2(2)} = 2359 \text{ Volts.}$$

## PROTECCIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

- S = Grupos en serie
- P = Unidades capacitores en paralelo por grupo
- F1 = Unidades falladas de un grupo.

### III.9 Distribución de corrientes en la fase "A" del banco de capacitores, cuando fallan dos unidades capacitores de un mismo grupo.

Al calcular las corrientes que pasan por las fases, tenemos la corriente que circula por la fase A, con esto obtenemos el valor que circula por cada unidad capacitadora de la fase A del banco y sus respectivos voltajes.

$$I_{cap} = \frac{I_A}{cap} = \frac{86,031}{3} = 28,677 \text{ Amp}$$

$$V_c = I_c * Z_c = 28,677 * 587,86 = 16858 \text{ kVolts}$$

$$\%Volts = \frac{16858}{13280} * 100 = 126,9\%$$

Ahora, al fallar dos unidades en el grupo paralelo, la corriente aumenta en el banco en cada un de las fases. En la fase A la corriente que pasa por el grupo donde se encuentran las unidades falladas ésta aumenta sometiendo a un mayor esfuerzo a las unidades capacitadoras, debido al voltaje que llega al 126.9 % del valor nominal, por lo tanto, al fallar dos unidades se debe de desconectar el banco, la distribución de las corrientes y voltajes de la fase se muestran en la figura 6.6.

PROTECCIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

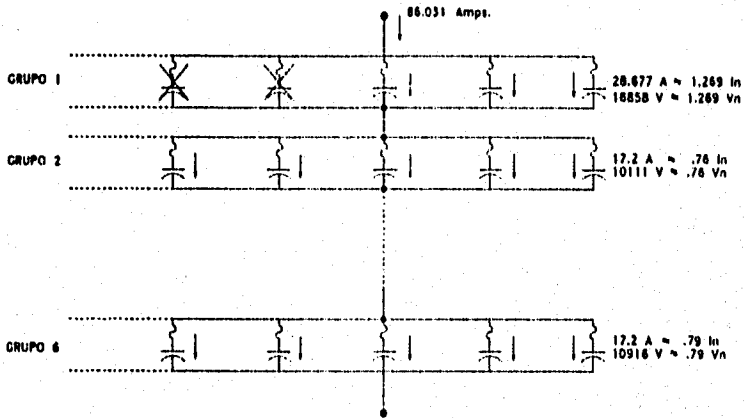


Figura. 6.6 Fase A, con dos unidades falladas

Al salir de operación una unidad capacitadora de un grupo, se tiene para todo fin práctico, la corriente y voltaje nominales en las unidades restantes del mismo grupo y dado que no se tienen altas magnitudes de corrientes armónicas, el banco de capacitores puede seguir operando continuamente en estas condiciones, esperando el momento favorable para la medición de capacitancia de la unidad fallada y la reposición de los fusibles de dicho grupo. También observamos un desplazamiento del neutro el cual nos dará el desbalance del banco colocando la protección adecuada en el neutro del banco de capacitores

Cuando salen de operación 2 unidades capacitoras de un grupo, se presentan en las unidades restantes del mismo grupo una sobrecorriente y sobrevoltaje del 26.9 %. Como el límite máximo de sobrevoltaje permitido en las unidades capacitoras es de un 10 %, se deberá desenergizar el banco de capacitores tan rápido como sea posible (0.3 a 0.5 Seg.), puesto que aparece en el neutro un voltaje a tierra de 2247 Volts, por lo tanto, se sugiere un ajuste para el 2° paso de 1500 Volts, esto es aproximadamente un voltaje intermedio con una unidad fallada y con dos unidades falladas con lo cual se debe ajustar la protección de desbalance.

### ESTÁNDARES INDUSTRIALES Y GUÍAS DE APLICACIÓN.

El continuo crecimiento de los sistemas eléctricos de potencia, los cuales son predominantemente inductivos en naturaleza, ha incrementado la necesidad para el uso de capacitores de potencia en los sistemas de transmisión y distribución. Los beneficios del implemento de los capacitores de potencia incluyendo el soporte en var, mejorar el voltaje y factor de potencia, incremento en la capacidad del sistema, y la reducción en las perdidas del sistema. En este capítulo se da una descripción de como se han desarrollado las normas y prácticas que el IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) ha dado para aplicar, proteger al equipo mediante el establecimiento de valores nominales para utilizarse en forma segura y confiable con los capacitores de potencia en derivación.

#### 7.1 NORMAS DEL IEEE.

Dos grupos del IEEE se han responsabilizado de producir guías: La sociedad de Ingenieros de Potencia (PES) y la Sociedad de Aplicaciones Industriales (IAS). La PES representa a los proveedores de energía eléctrica, mientras que IAS representa a los grandes consumidores de energía eléctrica.

Las guías o normas antes mencionadas están sujetas a revisión o reafirmación cada 5 años. Además, del punto de vista y comentarios recibidos de los usuarios de las normas podrían ser una propuesta para el cambio del texto con debido soporte técnico.

Con el incremento del uso de capacitores de potencia, se reconoce la necesidad de proveer una sola fuente de IEEE para una fácil referencia. Debe notarse que la norma esta limitada a ser una colección de prácticas recomendadas que sirvan como una guía tanto para suministradores, como para consumidores de energía eléctrica.

## 7.2 VALORES NOMINALES DE CAPACITORES Y CONDICIONES DE SERVICIO

Los valores nominales y condiciones de servicio están especificados en la norma IEEE Std. 18-1992. Para una referencia simplificada, a continuación se presentan algunos aspectos claves de los valores nominales y las condiciones de servicio. Los valores nominales normalizados son: voltaje (rms)(entre terminales), clase de aislamiento terminal-caja (o tierra), potencia reactiva, número de fases y frecuencia.

## 7.3 TOLERANCIAS EN LOS VALORES NOMINALES

Los capacitores deberán proporcionar una potencia reactiva no menor a su valor nominal, ni mayor al 115% de este valor, a tensión senoidal y frecuencia nominales, medida a una temperatura interna y uniforme en el gabinete de 25 °C. Los capacitores son capaces de operar continuamente, siempre que no se excedan ninguno de los siguientes límites:

- 135 % de los kVAr de placa
- 110 % de la tensión nominal rms y tensión cresta no mayor a  $1.2\sqrt{2}$  veces la tensión nominal rms, incluyendo armónicas pero excluyendo transitorios
- 135 % de la corriente nominal rms, incluyendo la fundamental y las armónicas.

Los capacitores serán adecuados para operación continua al 135% de su potencia reactiva nominal. Esta potencia reactiva máxima incluye los siguientes factores, cuyos efectos combinados no exceden 135%.

- Potencia reactiva debida a voltajes mayores al nominal de placa, a frecuencia nominal, pero dentro de las limitaciones permitidas descritas anteriormente.
- Potencia reactiva debida a armónicas de voltaje, sobrepuestas a la frecuencia nominal.
- Potencia reactiva en exceso a la nominal de placa, debida a tolerancias en fabricación, dentro de los límites.

Los capacitores deben ser capaces de soportar durante toda su vida útil esperada, transitorios de maniobra con voltajes pico de hasta  $2\sqrt{2}$  veces el voltaje nominal rms y



NORMAS Y ESTÁNDARES INDUSTRIALES

otros disturbios transitorios inherentes a la operación de los sistemas de potencia. Los valores nominales de voltaje y potencia reactiva se presentan en la tabla 7.1, así como los niveles básicos de aislamiento (BIL) de capacitores normalizados, los capacitores de potencia están diseñados para operar a una frecuencia nominal, ya sea a 50 ó 60 Hz, diseñándose para operación continua o desconectables en localizaciones intemperie con ventilación libre y luz solar directa, bajo temperaturas ambientes.

VOLTS, RMS (TERMINAL A TERMINAL)	KILOVAR	NÚMERO DE FASES	BIL (KILOVOLTS)
216	5, 7 1/2, 13 1/3, 20 y 25	1 y 3	30
240	2.5, 5, 7 1/2, 10, 15, 20, 25, y 50	1 y 3	30
480	5, 10, 15, 20, 25, 35, 50, 60 y 100	1 y 3	30
600	5, 10, 15, 20, 25, 35, 50, 60 y 100	1 y 3	30
2400	50, 100, 150 y 200	1	75
2770	50, 100, 150 y 200	1	75
4160	50, 100, 150 y 200	1	75
4800	50, 100, 150 y 200	1	75
6640	50, 100, 150, 200, 300 y 400	1	95
7200	50, 100, 150, 200, 300 y 400	1	95
7620	50, 100, 150, 200, 300 y 400	1	95
7960	50, 100, 150, 200, 300 y 400	1	95
9320	50, 100, 150, 200, 300 y 400	1	95
9540	50, 100, 150, 200, 300 y 400	1	95
9960	50, 100, 150, 200, 300 y 400	1	95
11400	50, 100, 150, 200, 300 y 400	1	95
12470	50, 100, 150, 200, 300 y 400	1	95
13280	50, 100, 150, 200, 300 y 400	1	95 y 125
13800	50, 100, 150, 200, 300 y 400	1	95 y 125
14400	50, 100, 150, 200, 300 y 400	1	95 y 125
15125	50, 100, 150, 200, 300 y 400	1	125
19920	100, 150, 200, 300 y 400	1	125
19920	100, 150, 200, 300 y 400	1	125 y 150
20800	100, 150, 200, 300 y 400	1	150 y 200
21600	100, 150, 200, 300 y 400	1	150 y 200
22800	100, 150, 200, 300 y 400	1	150 y 200
23800	100, 150, 200, 300 y 400	1	150 y 200
24940	100, 150, 200, 300 y 400	1	150 y 200
4160 CrdY/2400	300 y 400	3	75
4800 CrdY/2770	300 y 400	3	75
7200 CrdY/4160	300 y 400	3	75
6320 CrdY/4800	300 y 400	3	75
12470 CrdY/7200	300 y 400	3	95
13200 CrdY/7620	300 y 400	3	95
13800 CrdY/7960	300 y 400	3	95
14490 CrdY/9320	300 y 400	3	95

† Una hoja

‡ No aplicable para tipo interior

Tabla 7.1. Valores nominales de voltaje y kVAR para capacitores de 60 Hz.

## 7.4 CONDICIONES DE SERVICIO

Las condiciones de servicio normales, es para cuando los capacitores son adecuados para operar en un rango, cuando:

1. La temperatura ambiente está dentro de los límites especificados en la tabla (7.1), los capacitores pueden estar expuestos a los rayos directos del sol.
2. La altitud no debe exceder 6000 ft (1800m) sobre el nivel del mar.
3. El voltaje aplicado entre terminales no debe exceder el voltaje nominal en un valor mayor a la tolerancia, así como los niveles de armónicas especificados para la operación continua de los capacitores dada anteriormente.
4. El voltaje aplicado entre las terminales y la caja no debe exceder la clase de aislamiento especificada en la tabla (7.1).
5. La frecuencia nominal de operación debe ser igual a la frecuencia nominal del capacitor.

## 7.5 LÍMITES RECOMENDADOS

El propósito de la norma 519 del IEEE es recomendar límites sobre distorsión armónica, de acuerdo a dos distintos criterios a saber:

1. Existe una limitación en la cantidad de corriente armónica que un consumidor puede inyectar a la red de la compañía suministradora.
2. Existe una limitación en el nivel de voltaje armónico que una compañía puede suministrar a un consumidor.

## 7.6 LÍMITES DE CORRIENTE.

Los límites de corriente se basan en el tamaño de la planta del consumidor en relación al tamaño de la red de suministro.

Este tamaño relativo se define como la relación de cortocircuito (SCR), en el punto de acoplamiento común (PCC), el cual es donde la carga del consumidor se conecta con otras cargas en el sistema de potencia. El tamaño de la planta del consumidor se define como la corriente a frecuencia fundamental en la carga  $I_L$ , que incluye todas las cargas ya sean lineales o no. El tamaño del sistema de suministro se define por el nivel de la corriente de cortocircuito,  $I_{SC}$ , en el PCC. Estas dos corrientes definen la SCR:

$$SCR = \frac{I_{SC}}{I_L} \quad (1)$$

Una relación SCR alta significa que la carga es relativamente pequeña respecto al sistema y los límites de corriente armónica no serán tan estrictos como los correspondientes a una relación baja. Esto se demuestra en la tabla 7.2, la cual enlista los niveles de distorsión de corriente máximos recomendados como una función de la SCR y el orden de la armónica. La tabla también identifica los niveles de distorsión armónica total (THD).

NORMAS Y ESTÁNDARES INDUSTRIALES

<i>Orden de las armónicas (Armónicas impares) (120 V - 69 kV)</i>						
$I_{sc}/I_L$	< 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	THD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
<i>Orden de las armónicas (Armónicas impares) (69 kV - 161 kV)</i>						
$I_{sc}/I_L$	< 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	THD
< 20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20 < 50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50 < 100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100 < 1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
> 1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	20.
<i>Orden de las armónicas (Armónicas impares) (&gt;161 kV)</i>						
$I_{sc}/I_L$	< 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	THD
< 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Tabla 7.2. Límites de corrientes armónicas para cargas no lineales en el punto de acoplamiento común

### 7.7 OTROS LÍMITES DE CORRIENTE.

La norma, mostrada en la tabla 7.2 fija los límites de corriente tanto para las componentes armónicas individuales como para la distorsión armónica total. Por ejemplo un consumidor con una SCR entre 50 y 100 tiene un límite recomendado de 12 % para el THD, mientras que para componentes armónicas impares individuales con ordenes menores a 11, el límite sobre cada una es de 10 %. Es importante notar que las componentes de corriente armónica individual no se suman aritméticamente. Esto significa que todas las armónicas características no pueden alcanzar su límite máximo individual excediendo el THD. El siguiente ejemplo demuestra esto:

Suponga que una fuente con una SCR de 55 tiene solo dos componentes de corriente armónica, de 5° y 7° orden. Ambas están dentro de sus límites individuales de 10 %.

$$I_5 \cdot \frac{100}{I_L} = 10\% \quad e \quad I_7 \cdot \frac{100}{I_L} = 10\%$$

Por lo tanto conocemos las dos corrientes armónicas individuales:

$$I_5 = 0.1I_L \quad e \quad I_7 = 0.1I_L$$

La THD se puede calcular de la fórmula:

$$THD = \frac{(I_5^2 + I_7^2)^{1/2}}{I_L} \cdot 100 = 14.1 \quad (6.3)$$

Así que la THD es igual al 14 % en este caso, el cual excede el nivel recomendado de 12 %. Es claro que si cualquier otra armónica característica de orden bajo esta en su límite, las otras corrientes armónicas tendrán que ser contenidas también dentro de los suyos.

Es importante observar que la tabla 7.2. muestra los límites solamente para armónicas impares, el estándar se refiere a las armónicas pares limitándolas al 25 % del límite de las armónicas impares dentro del mismo rango, por ejemplo, una fuente con un PCC entre 2.4 y 69 kV y una SCR de 30 podría tener un límite de 3.5 % para la 13ª. armónica. Esto significa que la 12ª. armónica estaría limitada a 0.875 %.

Las armónicas pares dan como resultado una onda de corriente asimétrica (formas de onda positiva y negativa distintas) la cual puede contener una componente de CD que saturará los núcleos magnéticos.

Para equipo de generación de potencia eléctrica, la norma no reconoce tamaño relativo, los límites son más estrictos y se limitan a los niveles más bajos mostrados en la tabla. Esto es que toda la generación de potencia tiene una SCR de 20 o menos. La tabla 7.2. indica límites recomendados para voltajes clase 69 kV y menores. De 69 kV hasta 138 kV los límites son 50 % de los mostrados en la tabla. Esto significa que un PCC en 138 kV tiene un límite de 10 % en THD, independientemente de la potencia de la fuente de 138 kV. Arriba de 138 kV se requiere una evaluación caso por caso.

**7.8 LÍMITES DE VOLTAJE.**

El segundo conjunto de criterios establecidos por la norma, es para límites de distorsión de voltaje. Estos gobiernan el monto de distorsión de voltaje que es aceptable en el voltaje de suministro de servicio en el PCC con un consumidor. Los límites de voltaje armónico recomendados se basan en los niveles que son suficientemente bajos para asegurar que los equipos de los consumidores operen satisfactoriamente. La tabla 7.3 enlista los límites de distorsión de voltaje de la norma.

<i>Voltaje de distorsión armónica en % en el PCC.</i>			
	<i>23 &lt; 69 kV</i>	<i>69 &lt; 138 kV</i>	<i>≥138 kV</i>
<i>Máximo para armónicas individuales.</i>	3.0	1.5	1.0
<i>Distorsión armónica total</i>	5.0	2.5	1.5

Tabla 7.3 Límites de voltaje armónico para equipo de potencia.

Así como, para la corriente, los límites se imponen para componentes individuales y sobre distorsión total de todos los voltajes armónicos combinados (THD). Lo que es diferente en esa tabla ; sin embargo, es que se muestran tres diferentes límites. Representan tres clases de voltajes, hasta 69, de 69 kV a 138 kV e igual o mayor a 13.8 kV. Nótese que los límites disminuyen conforme los voltajes aumentan, como de manera análoga se estableció para los límites de corriente.

De nuevo, en la tabla solo se muestran los límites para armónicas impares. La generación de armónicas pares se restringe más, ya que el offset de CD resultante puede causar saturación en motores y transformadores. La corriente de secuencia negativa puede causar calentamiento en generadores. El voltaje armónico par individual se limita a 25 % de los límites de las armónicas impares, como similarmente quedo definido en los límites de corriente.

Frecuentemente los alimentadores dan servicio a más de un consumidor. Los límites de distorsión de voltaje mostrados en la tabla no deben excederse mientras todos los

consumidores estén dentro de los límites de inyección de corriente. Cualquier consumidor que degrade el voltaje en el PCC deberá tomar medidas pertinentes para corregir el problema. Sin embargo, el problema de distorsión de voltaje es el mismo para la comunidad entera de consumidores y el proveedor, es decir, que impacta de igual forma. Los consumidores muy grandes pueden llegar a un acuerdo con el proveedor, sobre la resolución de un problema específico y ambos contribuir con su propia solución.

### 7.9 APLICACIÓN DE NORMAS.

Considere una planta industrial grande alimentada de un sistema de servicio de 115 kV como se muestra en la figura 7.2. La planta tiene un bus principal de 13.8 kV y suministra energía a dos convertidores de 12.5 MVA conectados en operación de 12 pulsos. Otras cargas lineales totalizan 25 MVA y se alimentan del mismo bus.

Las corrientes de cortocircuito y de carga se calculan como sigue:

$$I_L = \frac{50 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 115 \text{ KV}} = 250 \text{ A.} \quad (6.4)$$

$$I_{SC} = \frac{2000 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 115 \text{ KV}} = 10,000 \text{ A} \quad (6.5)$$

En seguida se calcula la SCR como:

$$SCR = \frac{I_{SC}}{I_L} = \frac{10,000 \text{ A.}}{250 \text{ A.}} = 40 \quad (6.6)$$

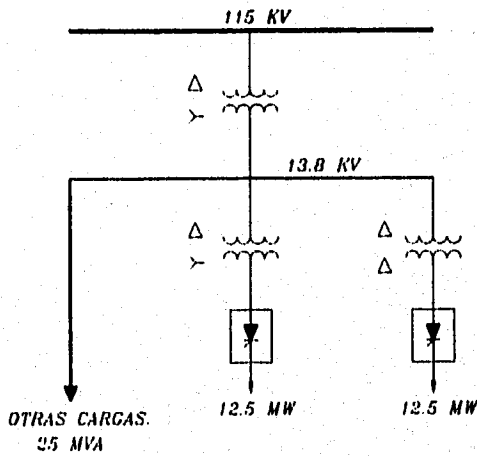


Figura 7.1 Diagrama de línea de una planta industrial con significativa carga de convertidores.

Para definir completamente el problema, es necesario medir o conocer la corriente armónica generado por los convertidores. Para los propósitos de este ejemplo, las corrientes armónicas en la tabla 7.4. se muestran en por unidad de la corriente del convertidor a frecuencia fundamental.

La tabla se basa en la operación de 12 pulsos, una reactancia de conmutación de 12 % y un ángulo de encendido de 30 %.

Armónica	Valor en P.U.	Armónica	Valor en P.U.
1	1.0	29	0.014
5	0.192	31	0.012
7	0.132	35	0.011
11	0.073	36	0.010
13	0.057	41	0.009
17	0.035	43	0.008
19	0.027	47	0.008
23	0.020	49	0.007
25	0.016		

Tabla 7.4



La figura 7.2 muestra los niveles de distorsión de corriente armónica en el bus de 115 kV comparados con los recomendados para una SCR de 40, el cual es el caso que estamos tratando. Note que los límites son sólo 50 % de los mostrados en la tabla 7.2, debido a que la distorsión es en un PCC de alto voltaje. se puede ver que todas las armónicas de 12 pulsos exceden los límites recomendados. Teóricamente no hay corrientes armónicas de seis pulsos de este orden ya que existe multifase. Sin embargo, asumiendo desbalanceo de impedancias y controles de encendido, habrá cantidades pequeñas de armónicas de 6 pulsos. Es claro en este ejemplo que la distorsión en estos órdenes está dentro de las especificadas por las guías.

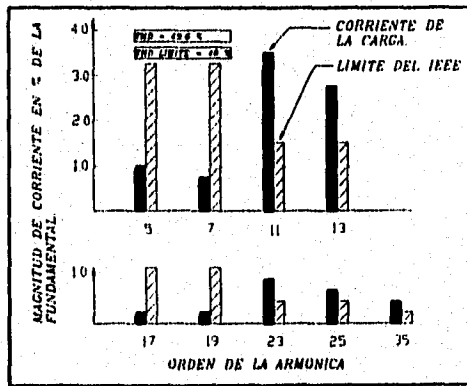


Figura 7.2 Niveles de distorsión de corriente armónica en el punto de acoplamiento común comparados con los niveles recomendados para una SCR = 40.

Si los MVA's de cortocircuito del sistema fuesen más grandes, con una SCR de 100, sería necesario aplicar nuevos límites. La figura 7.3, muestra la nueva comparación de distorsión calculada con los límites de la norma. Se puede observar que las componentes 11<sup>ava</sup> y 13<sup>ava</sup> permanecen arriba de las especificaciones, sin embargo la THD esta correctamente dentro de las normas.

## NORMAS Y ESTÁNDARES INDUSTRIALES

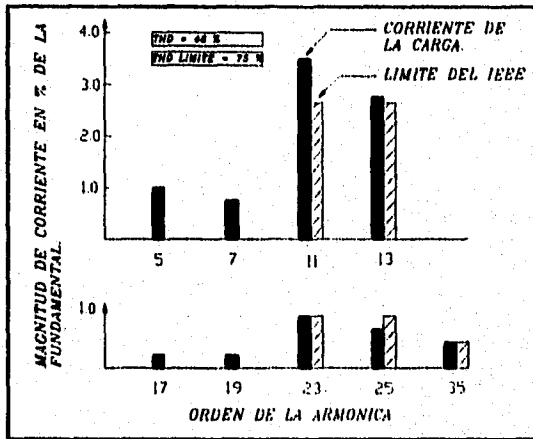


Figura 7.3 Niveles de distorsión de corriente en el punto de acoplamiento común comparados con los niveles recomendados, tomando una SCR = 100.

Con una SCR de 100, este caso es marginal, la totalidad de THD cumple con las especificaciones recomendadas, mientras que dos niveles de distorsión de componentes individuales son excesiva. Para obtener un panorama más amplio de la situación, es útil examinar los niveles de distorsión de voltaje.

### 7.10 ESPECIFICACIONES INTERNACIONALES.

Se han definido muchos factores que se utilizan para medir los efectos de las armónicas sobre el sistema de potencia. Dentro de los cuales se incluyen:

- Dh Factor de distorsión de voltaje para la armónica individual  $h$
- THD Factor de distorsión armónica total debida a todas las armónicas.
- Dmax. Desviación máxima de voltaje; suma de Dh.
- TIF Factor de influencia telefónica.

IT Corriente de influencia telefónica (producto I T)

La tabla 7.5. muestra los limites típicos adoptados para el factor de influencia telefónica. En este caso es menos caro y más efectivo modificar el circuito telefónico moviéndolo físicamente, fuera de la influencia de la línea de potencia o también utilizando cables blindados, que añadir filtros. Esto es real, especialmente donde la interferencia es debida a un circuito de potencia HVDC que lleva miles de megawatts.

<i>País</i>	<i>Dk</i>	<i>TID</i>	<i>Dmax</i>	<i>TIF</i>	<i>I T</i>
<i>Australia</i>	1.0 %	--	3.0 %	20	--
<i>Finlandia</i>	1.0 %	1.5 %	--	--	--
<i>URSS</i>	--	5.0 %	--	--	--
<i>Francia</i>	1.0 (nones)	--	--	--	--
	0.7 (todas)	1.5 %	--	25	10 000
<i>Canadá</i>					
<i>Brunswick</i>	1.0 %	--	4.0 %	20	25 000
<i>Quebec</i>	1.0 %	--	4.0 %	20	25 000
<i>Manitoba</i>	--	--	2.0 %	25	50 000
<i>Alberta</i>	--	--	--	--	--
<i>USA</i>					
<i>EAP</i>	1.0 %	--	4.0 %	--	--
<i>BPA</i>	--	--	2.0 %	15 a 20	25 000

Tabla 7.5

**7.11 CORRIENTE DE ENERGIZACIÓN**

Durante la energización de bancos de capacitores, se hacen circular grandes magnitudes de corrientes a través del mismo denominadas corrientes de inrush. La magnitud y frecuencia de esta corriente de inrush están en función de lo siguiente: voltaje aplicado (punto sobre la onda de voltaje al momento del cierre), la capacitancia del circuito, la inductancia del circuito, alguna carga atrapada en el banco de capacitores en el instante del cierre, y el amortiguamiento del circuito debido a las resistencias de cierre u otras resistencia en el circuito.

La corriente de inrush en un banco aislado es menor que la corriente de corto circuito disponible en las terminales del banco de capacitores. Cuando son switcheados capacitores espalda con espalda, es decir, cuando un banco es switchead mientras otro banco esta conectado al mismo bus, se producen grandes magnitudes de corriente con alta frecuencia, esto fluye entre los bancos; por lo que es imprescindible la presencia de un reactor en serie entre los bancos de capacitores.

CONDICIÓN	CANTIDAD	USANDO CORRIENTES
Energizando un banco aislado	$i_{max\ pk}$ (amperes) $f$ (hertz)	$1.41\sqrt{I_{sc} \cdot I_1}$ $f_s\sqrt{\frac{I_1}{f_1}}$
Energizando un banco con otro sobre el mismo bus	$i_{max\ pk}$ (amperes) $f$ (kilohertz)	$1747\sqrt{\frac{(V_{L1} \times I_1^2 + I_2^2)}{(L_{eq} \times (f_1 + f_2))}}$ $9.5\sqrt{\frac{(I_1 \times V_{L1} \times I_1 + I_2^2)}{(L_{eq} \times (f_1 + f_2))}}$
Energizando un banco con un banco igual energizado sobre el mismo bus	$i_{max\ pk}$ (amperes) $f$ (kilohertz)	$1235\sqrt{\frac{(V_{L1} \times I_1)}{L_{eq}}}$ $13.5\sqrt{\frac{(f_1 \times V_{L1})}{(L_{eq} \times I_1)}}$

Tabla 7.6 Frecuencia y corriente de inrush para bancos de capacitores switcheados

- $f_1$  = frecuencia del sistema
- $L_{eq}$  = inductancia total equivalente por fase entre el banco de capacitores, en microhenrys
- $I_1, V_{L1}$  = corriente del banco siendo switchead y del banco ya energizado, respectivamente. El banco de capacitores switchead toma descarga, con el cierre de un voltaje de cresta dado por el voltaje de la fuente. La corriente incluirá el efecto de la operación del banco de capacitores a un voltaje arriba del nominal de la norma de capacitores y el efecto de una tolerancia positiva de la capacitancia. En la falta de la información especifica, multiplique 1.15 veces la corriente nominal del capacitor dará resultados conservativos.
- $i_{max\ pk}$  = un valor de pico calculado dentro del amortiguamiento. En circuitos prácticos será cerca del 90% de este valor.
- $I_{sc}$  = corriente simétrica de corto circuito, en amperes.

NORMAS Y ESTÁNDARES INDUSTRIALES

La tabla 7.6 da las fórmulas para calcular la corriente de inrush y la frecuencia para ambos casos del switcheo de capacitores, ya sea aislado o espalda con espalda. esas fórmulas están basadas en las siguientes relaciones:

$$i = \frac{E}{\sqrt{L/C}} \operatorname{sen}\left(\frac{t}{\sqrt{LC}}\right)$$

$$i_{\max pt} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} E_{LL} \sqrt{\frac{C_{eq}}{L_{eq}}}$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eq}C_{eq}}}$$

Las corrientes de inrush pueden ser reducidas significativamente por el incremento del largo de la línea (inductancia) en los circuitos entre las secciones de cada unidad capacitiva o aumentar la inductancia en el circuito entre los bancos de capacitores.

Voltaje máximo (kV)	Inductancia por fase o bus (μH/ft)	Típicas inductancias entre bancos* (μH)
15.5 y menores	0.214	10-20
38	0.238	15-30
48.3	0.256	20-40
72.5	0.256	25-50
121	0.261	35-70
145	0.261	40-80
169	0.268	60-120
242	0.285	85-170

Tabla 7.7 Valores típicos de inductancia entre bancos de capacitores

\*Valores típicos de inductancia por fase entre bancos de capacitores. Esto no incluye la inductancia del capacitor mismo.

## 7.12 CAPACIDAD DE FUSIBLES.

La corriente nominal de los fusibles debe exceder la corriente nominal del capacitor por un factor, que dependerá de: tipo de banco, conexiones, tolerancias de los capacitores, sobrevoltajes de operación y armónicas. La selección del factor es muy importante.

- ◆ El fusible debe ser capaz de conducir continuamente la corriente a frecuencia fundamental y armónicas.
- ◆ 1.25 Inom. del capacitor para conexiones Y y  $\Delta$
- ◆ 1.35 Inom. del capacitor para conexiones Y
- ◆ Debe resistir las corrientes transitorias asociadas con switcheo de los capacitores, fallas en el sistema y sobrevoltajes atmosféricos, sin excesiva probabilidad de operación.
- ◆ Un fusible sobredimensionado puede ser causa de daño al banco.
- ◆ Un fusible bajodimensionado puede causar operaciones indeseadas.

En general la mejor solución será, el fusible más pequeño que tenga la capacidad adecuada para resistir las corrientes transitorias que puedan presentarse y la máxima corriente de carga esperada que pueda conducir continuamente el banco de capacitores.

Para aplicaciones individuales, el voltaje nominal de los fusibles debe ser igual o mayor al voltaje nominal de los capacitores. Para aplicaciones de grupo, el voltaje debe ser igual o mayor al del sistema.

**Capacidad interruptiva.** Es la capacidad del fusible de dejar pasar la corriente de falla probable a que pueda estar sujeto sin fundirse.

### 7.13 FUSIBLES LIMITADORES DE CORRIENTE.

◆ En bancos de distribución donde la corriente de falla puede exceder 5000 Amp. rms, para capacitores  $\geq 200$  KVAR, y 4000 Amp. o menores corrientes de falla para capacitores entre 25 a 200 KVAR

◆ En subestaciones con varios bancos en paralelo.

### 7.14 TÓPICOS DE PROTECCIÓN DE CAPACITORES

◆ La protección seleccionada dependerá del nivel de aterrizamiento del sistema.

◆ **FUSIBLES INDIVIDUALES POR CAPACITOR.**

- Aislar capacitores fallados.

◆ **RELEVADORES CONTRA DESBALANCES.**

- Protege contra arqueo de grupos
- Protege contra fallas no liberadas por los fusibles individuales.
- Protege contra excesivo voltaje en los capacitores restantes.

◆ **PROTECCIÓN CONTRA FALLAS DE FASES.**

- Protege contra fallas entre fases y a tierra.
- Respaldo de los relevadores de desbalance.

**INTERRUPTORES, CONTACTORES Y DISPOSITIVO DESCONECTADORES EN APLICACIONES CON CAPACITORES. OPERACIÓN CONTINUA.**

- ◆ 135% de la corriente nominal de los capacitores.
- ◆ 165% de la corriente nominal de los capacitores, para el switch/fusible de seguridad.
- ◆ El dispositivo de switcheo debe tener una capacidad momentánea suficiente para soportar:
  - Corrientes de descarga del capacitor ante fallas externas en derivación.
  - Corrientes de inrush al energizar el o los bancos.
  - Magnitud de las frecuencias de oscilación de las corrientes de inrush.

**CAPACIDAD PARA SOPORTAR SOBREVOLTAJES TRANSITORIOS (ANSI/IEEE)**

Transitorios/año	Veces el voltaje nominal rms
40	4.0
400	3.4
4000	2.9

Tabla 7.8

- ◆ Capacitores conectados a líneas expuestas pueden requerir protección contra sobrevoltajes por medio de apartarrayos.
- ◆ Sobrecargas anormales: por sobrevoltajes a frecuencia fundamental y armónicas, la corriente debe ser limitada a un máximo de 1.8 veces la nominal para capacitores



nominados  $\geq 2.4$  kV. El daño de fusibles o excesiva elevación de la temperatura pueden ser los primeros indicadores de sobrecargas anormales.

• CONEXIÓN ESTRELLA

VARIABLES ELÉCTRICAS	CONEXIÓN ESTRELLA	
	ATERRIZADA	NO ATERRIZADA
Sobrevoltajes Transitorios	Menores	Mayores
Corrientes Armónicas 3 <sup>a</sup> , 9 <sup>a</sup> , 15 <sup>a</sup>	Con Trayectoria	Sin Trayectoria
Corrientes de Fallas	Mayores	Menores

Tabla 7.9

**LIMITES DE SOBREVOLTAJES MOMENTÁNEOS MÁXIMOS  
(ANSI/IEEE)**

Duración	Veces el voltaje nominal rms
1 ciclo	2.7
6 ciclos	2.2
15 ciclos	2.0
1 segundo	1.7
15 segundos	1.4
1 minuto	1.3
30 minutos	1.25

Tabla 7.10

## **CAPITULO VIII**

### **OPERACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES EN DERIVACIÓN EN EL NIVEL DE 115 KV, EN LA SUBÁREA DE CD. JUÁREZ, CHIH.**

Se analiza la interacción entre el sistema eléctrico de potencia y cinco bancos de capacitores en derivación instalados en el nivel de 115 kV, en la Subárea de Ciudad Juárez, Chih.. La red de transmisión asociada a estos bancos de capacitores, está aislada de la red de C.F.E. (Comisión Federal de Electricidad) y conectada a la red de EPECO (El Paso Electric Company) a través de dos líneas de transmisión de 115 kV. El estudio realizado, contempla la evaluación de corrientes y voltajes armónicos de mediciones efectuadas; el análisis de sobrevoltajes transitorios; así como el cálculo de las magnitudes de sobrecarga ante fallas de unidades capacitoras, para su utilización en los ajustes de los esquemas de protección.

#### **8.1 ANTECEDENTES**

Actualmente el 22% (120 MW) de la carga de la Subárea de Ciudad Juárez, es alimentada a través de dos líneas de transmisión de 115 kV provenientes de dos subestaciones (Azcarate y Diablo) pertenecientes a la compañía eléctrica estadounidense EPECO. Estas líneas de transmisión se interconectan con las subestaciones de C.F.E. Ríverena e Insurgentes. La red de transmisión asociada a estas dos últimas subestaciones, dispone, a esta fecha de tres bancos de capacitores en derivación configurados en estrella con neutro flotante, los cuales están conectados en el nivel de 115 kV. Las capacidades de estos bancos son: dos de 21 MVAR y uno de 18 MVAR.

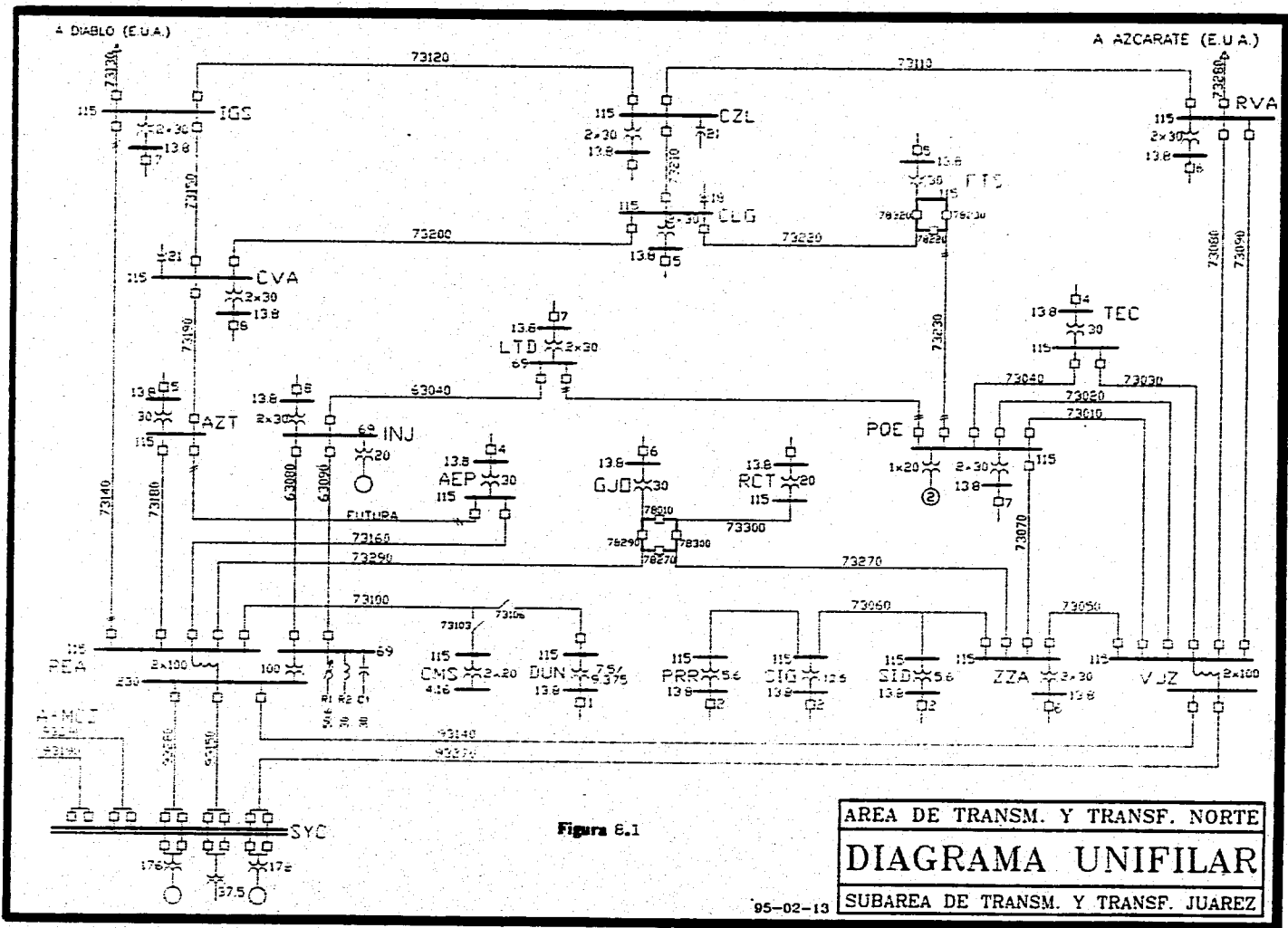
La carga por alimentar de la Subárea de Cd. Juárez, desde las subestaciones Azcarate y Diablo, para el próximo Verano, será del orden de 180 MW; por lo que se tiene contemplado la instalación de dos bancos de capacitores adicionales de 15 MVAR cada uno

en el nivel de 115 kV. Las instalaciones donde se ubicarán estos dos últimos bancos de capacitores, son Riveraña e Insurgentes, y su conexión será en estrella con neutro flotante.

En el diagrama unifilar de la figura 8.1, se muestra de manera simplificada, la topología de la Subárea de interés. Las líneas de transmisión (LT's) que conectan a las subestaciones Riveraña con Azcarate, e Insurgentes con Diablo; son de calibre 900 MCM y con longitudes de 3 y 15 kilómetros, respectivamente.

Las subestaciones de la Subárea Juárez, donde se ubican los tres bancos de capacitores actualmente en operación, son: Colegio (21 MVAR), Chaveña (18 MVAR) y Chamizal (21 MVAR).

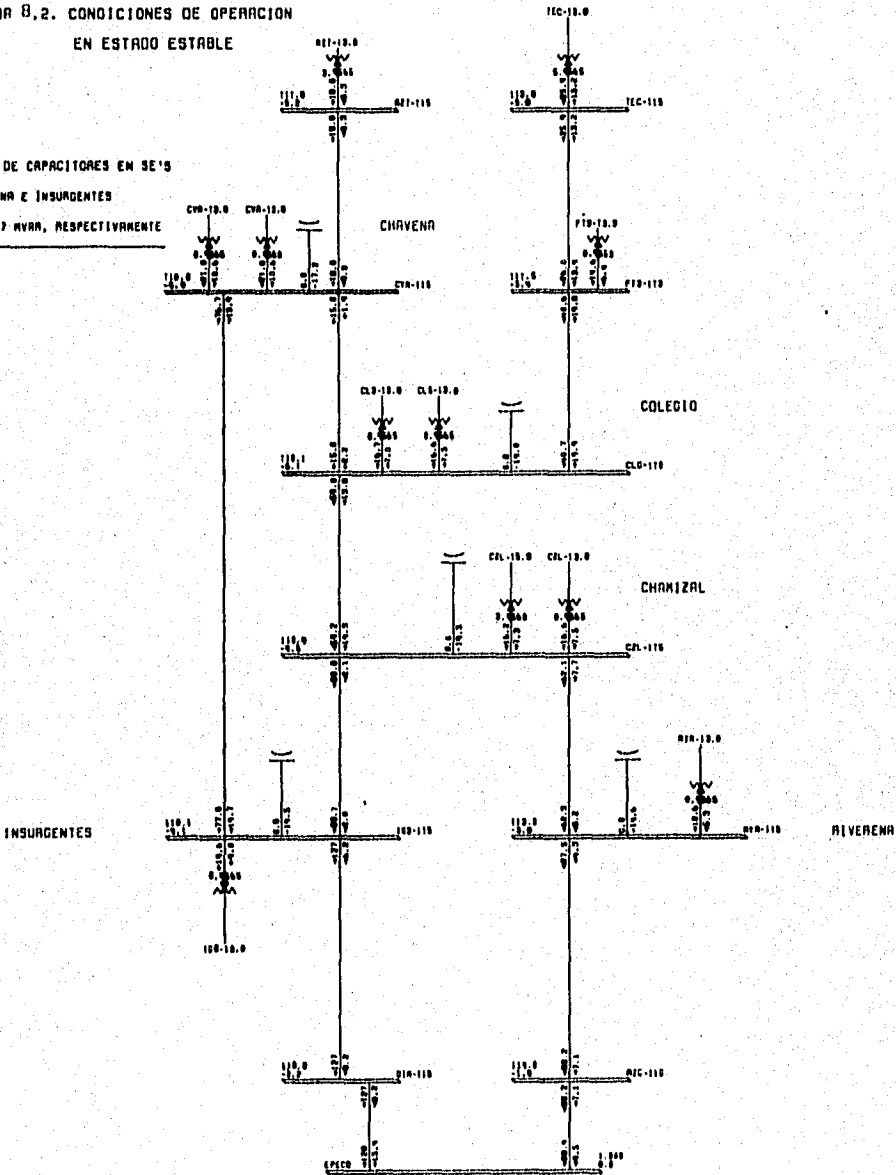
En el diagrama de la figura 8.2, se indican las condiciones de operación en estado estable, de la Subárea de interés, considerando una carga de 180 MW, y los cinco bancos de capacitores.



# AREA JUAREZ - EPECO

FIGURA B.2. CONDICIONES DE OPERACION  
EN ESTADO ESTABLE

BANCO DE CAPACITORES EN SE'S  
RIVERENA E INSURGENTES  
15 Y 17 MVAR, RESPECTIVAMENTE



DEMANDA MAXIMA ESPERADA EN 1996 -- 591 MW  
215 MW HACIA EPECO, SIN TURBOGAS EN JUAREZ  
C A S O B A S E M O N, J A N O R 1996 16:09

## 8.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Los objetivos del estudio, consisten en la determinación de las frecuencias de resonancias armónicas que se generan considerando en operación simultánea diferente número de bancos de capacitores; la determinación de corrientes y voltajes durante la energización y desenergización de los dos bancos de capacitores adicionales; y finalmente, el cálculo de las magnitudes de sobrecarga ante fallas de unidades capacitoras, para ser utilizadas en los ajustes de los esquemas de protección de los dos bancos de capacitores adicionales.

Se expondrán algunos aspectos que se considera que deben ser tomados en cuenta en la aplicación de bancos de capacitores.

## 8.3 CORRIENTES ARMÓNICAS

### 8.3.1 Límites de distorsión de las ondas de corriente y de voltaje.

La norma que se consideró como referencia para establecer los límites permisibles de distorsión, fue la IEEE Std. 519-1992. En general, la distorsión en la forma de onda, normalmente se describe por su distorsión armónica total.

**Distorsión Armónica Total (THD).** Es la relación de la raíz media cuadrática del contenido total de armónicas de una señal de voltaje o de corriente, respecto a la fundamental, expresado en por ciento de ésta.

Matemáticamente se define como:

$$THD_{(VOLTAGE)} = \frac{\sqrt{E_2^2 + E_3^2 + E_4^2 \dots}}{E_1} * 100\%$$

$$THD_{(CORRIENTE)} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 \dots}}{I_1} * 100\%$$

## OPERACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

donde:

- $E_H$  es la magnitud del voltaje a la armónica H  
 $E_1$  es la magnitud del voltaje a la frecuencia fundamental.
- $I_H$  es la magnitud del voltaje a la armónica H  
 $I_1$  es la magnitud del voltaje a la frecuencia fundamental.

### *8.3.2 Límites de distorsión armónica en la corriente*

En el caso particular que nos ocupa, el voltaje de suministro es 115 kV, quedando incluido en el rango de 69 a 161 KV, definido por la norma IEEE Std. 519-1992 aquí considerada. Esta norma establece, que los límites máximos permisibles para las componentes armónicas individuales, menores de 11 veces la fundamental, es 5.0%; y que para las componentes armónicas individuales entre 11 y 17 veces la fundamental, es 2.25%. También, indica que la distorsión armónica total, no debe ser mayor a 6.0%. Lo anterior considerando, que la relación de corto circuito, en el punto de acoplamiento común, y la capacidad del banco de capacitores está comprendida entre 50 y 100. Los valores de corto circuito trifásico en las subestaciones Insurgentes y Riverña, son 2140 y 2604 MVA simétricos, respectivamente.

### *8.3.3 Límites de distorsión armónica en el voltaje.*

Estando el contenido de armónicas en la corriente de carga de cada consumidor, por abajo de los límites establecidos por la norma IEEE Std. 519-1992, generalmente se logra que en el punto de acoplamiento común, los índices de distorsión armónica en el voltaje de suministro sean inferiores a los límites establecidos. La norma de referencia, indica que el límite máximo permisible, para la distorsión armónica individual, es 1.5%. Para la distorsión armónica total, es 2.5 %.

#### **8.3.4 Limitación de los bancos de capacitores**

El efecto producido por las componentes armónicas en los bancos de capacitores, es un calentamiento adicional y un esfuerzo dieléctico mayor al normal, con esto decimos que la presencia de una armónica no se visualiza a corto plazo en el banco de capacitores, solo hasta que éste sufre algún daño ya mencionado anteriormente. La norma indica que el banco de capacitores, incluyendo las componentes armónicas, puede operar continuamente dentro de las siguientes limitaciones:

- 110% del voltaje nominal
- 135% de la potencia reactiva nominal
- 120% de la corriente nominal

#### **8.3.5 Condiciones operativas**

Existen condiciones de operación que deben ser consideradas en la aplicación de bancos de capacitores:

- El voltaje de operación del sistema en la subestación donde se localiza el banco de capacitores, en ocasiones puede llegar a ser el 105% del voltaje nominal. Condición que debe ser considerada en la aplicación del banco de capacitores.
- Los desbalances del banco de capacitores, especialmente debido a la falla de capacitores internos, en las unidades capacitoras.
- La reenergización inmediata de un banco de capacitores, pudiera efectuarse en condiciones desfavorables para el interruptor (cerrar con carga atrapada y de polaridad opuesta al voltaje del bus). Esta situación debe ser considerada.



## 8.4 REACTOR SERIE

La inclusión de un reactor conectado en serie permite modificar la frecuencia de resonancia entre éste y el sistema. Adicionalmente, disminuye y amortigua las magnitudes de las corrientes producidas durante las maniobras de energización y desenergización. En la figura 8.3, se observa la ubicación del reactor serie.

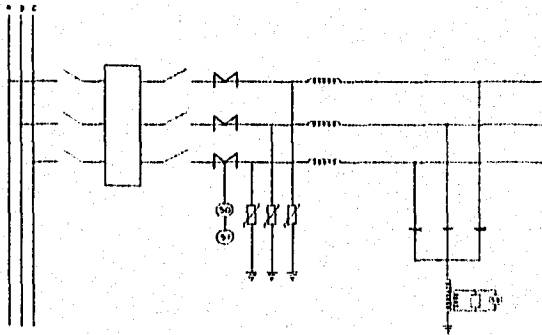


Figura 8.3.- Ubicación del reactor serie (entre los apartarrayos y el banco de capacitores)

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 8.5.1 Contenido de armónicas

Debido a que la carga en la Subárea de Cd. Juárez, está integrada por una gran variedad de fábricas maquiladoras, éstas constituyen una fuente generadora de armónicas. Por tal motivo, se consideró necesario identificar y cuantificar la presencia de las mismas en las ondas de corriente y de voltaje. Las mediciones de armónicas se efectuaron en las subestaciones Rivereña (RVA) e Insurgentes (IGS) durante los días 13 y 14 del mes de marzo del año en curso. Durante estos dos días se registraron corrientes y voltajes de manera continua. Los voltajes corresponden a voltajes de buses de 115 kV; las corrientes fueron tomadas de líneas de 115 kV. En el caso de la subestación RVA, corresponden a la línea de transmisión RVA-AZC (Azcarate); en el caso de la subestación IGS, corresponden a la LT IGS-DIA (Diablo).

Dada la cantidad de registros y gráficas obtenidas durante las mediciones realizadas; por separado se presenta dicha información, así como su análisis. En este reporte, se indican exclusivamente las conclusiones obtenidas.

En la tabla 8.1 se presenta un resumen de los resultados de las simulaciones efectuadas, en base a las mediciones realizadas. La tabla 8.1, consiste de dos columnas en la cuales se indican las corrientes armónicas, los factores de distorsión armónicos totales de voltaje y de corriente. Se consideran siete condiciones de operación, las cuales están en función del número de bancos de capacitores en derivación que operan de manera simultánea. La información contenida en cada una de las dos columnas de la tabla 8.1, es la siguiente:

- L3 identifica la distorsión total de corriente en LT IGS- DIA
- L9 identifica la distorsión total de corriente en LT RVA-AZC
- C1 identifica la distorsión en la corriente en el banco de capacitores de la subestación RVA
- C2 identifica la distorsión en la corriente en el banco de capacitores de la subestación IGS
- C3 identifica la distorsión en la corriente en el banco de capacitores de la subestación CZL (Chamizal).
- C4 identifica la distorsión en la corriente en el banco de capacitores de la subestación CLG (Colegio).
- C5 identifica la distorsión de la corriente en el banco de capacitores de la subestación CVA (Chaveña).

Las armónicas que se indican, son las que presentaron mayor magnitud.

**Tabla 8.1, columna 1.-** Se considera que los bancos de capacitores no disponen de reactores serie y que la carga de la Subárea corresponde a la que se tendrá en el próximo Verano. Comparando cada uno de los casos mostrados en esta columna 1, se tiene lo siguiente:

## OPERACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

- La componente de quinta armónica en la señal de corriente, es la de mayor magnitud.
- El incremento en la magnitud de las cargas permite disponer de mayor amortiguamiento en las componentes armónicas.
- En el caso de que estén en operación simultánea los cinco bancos de capacitores, condición identificada como (CDJ31), la frecuencia de resonancia es 4.67 pu (280 Hz) y los factores de distorsión total en la onda de corriente son, 6.5 y 6.7% en las LT's IGS-DIA y RVA-AZC, respectivamente.
- **Tabla 8.1, columna 2.- Influencia del reactor serie.** Se considera que los bancos de capacitores de las SE's Riverña e Insurgentes disponen de reactores serie, y que la carga de la Subárea corresponde a la que se tendrá en el próximo Verano.

Es oportuno mencionar, que existen dos reactores serie en la Subárea de Cd. Juárez, los cuales acaban de ser adquiridos recientemente y cuyas características técnicas son las siguientes:

Marca:	Trench Electric
Inominal	= 90.4 Amperes.
Voltaje	= 115 kV
Corriente de pico	= 4.85 kAmperes
Impedancia	= 36.68 Ohms
Frecuencia	= 60 Hz.
BIL	= 550 kV

Adicionalmente, uno de los propósitos del presente análisis, es evaluar la operación de los bancos de capacitores considerando los reactores serie, en consecuencia, determinar las subestaciones en las cuales es más conveniente su instalación.

De los análisis efectuados, se determinó que la instalación de los reactores de amortiguamiento, resulta más conveniente en las SE's Riverña e Insurgentes. En la columna 2, tabla 8.1, se muestra el efecto de los reactores serie. Así por ejemplo, en la condición

## OPERACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

identificada como (CDJ36), la cual considera en operación un banco de capacitores en la SE. RVA; la frecuencia de resonancia bajo esta condición es 4.0 pu. (240 Hz). Los factores de distorsión total han disminuido significativamente: 1.75% el de voltaje, y 1.17 y 2.3% los de corriente en las LT's IGS-DIA y RVA-AZC, respectivamente. Obsérvese que las componentes de quinta armónica aún cuando son superiores, al resto de las componentes armónicas; son significativamente menores a los valores indicados en la columna 1, tabla 8.1.

La condición identificada como (CDJ41) la cual considera en operación simultánea los cinco bancos de capacitores, y con reactores serie, en los correspondientes a las SE's RVA e IGS; presenta factores totales de distorsión armónicos en el voltaje de 1.12%, y en la corriente de 1.26 y 2.5% en las LT's IGS-DIA y RVA-AZC, respectivamente. Las frecuencias de resonancia son 3.58, 4.58 y 7.17 pu. Resumiendo, en base a lo reportado en la tabla 8.1, se tiene lo siguiente

- La inclusión de los reactores serie, disminuye significativamente las componentes armónicas a valores que están dentro de lo establecido en las normas de referencia.
- El reactor serie permite desintonizar la frecuencia de resonancia a quinta armónica, entre los bancos de capacitores y el sistema eléctrico.

**TABLA 8.1 RESUMEN GENERAL DE CORRIENTES ARMONICAS, FACTORES DE DISTORSION ARMONICOS TOTALES DE VOLTAJE Y CORRIENTE PARA LAS DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACION DEL SISTEMA, SUBAREA JUAREZ**

SISTEMAS CDN BANCOS DE CAPACITORES SIN REACTORES DE AMORTIGUAMIENTO.							SISTEMA CDN BANCOS DE CAPACITORES CDN REACTORES DE AMORTIGUAMIENTO						
SIST. C/BCO C1 EN RVA. (CDJ26) CORRIENTES ARMONICAS (AMPS)							SIST. C/BCD C1 EN RVA. (CDJ36) CORRIENTES ARMONICAS (AMPS)						
	1ª	3ª	5ª	7ª	11ª	13ª		1ª	3ª	5ª	7ª	11ª	13ª
L3	590	2.4	14.7	2.9	6.7	3.6	L3	590	2.6	5.8	1.3	1.4	1.4
L9	398	3.1	20.2	4.2	11	7.4	L9	398	3.4	8.1	1.9	0.74	0.75
C1	84.7	0.63	11.2	4.7	28.3	20.3	C1	89.2	1.2	17.2	1.4	1.5	1.5
THDV = 4.52 % ; THDI = 2.8 % y 6.2 % * FR = 10.0							THDV = 1.75 % ; THDI = 1.17 % y 2.3 % * FR = 4.0						
SIST. C/BCOS. EN IGS Y RVA. (CDJ27) CORRIENTES ARMONICAS (AMPS)							SIST. C/BCOS. EN IGS Y RVA. (CDJ37) CORRIENTES ARMONICAS (AMPS)						
	1ª	3ª	5ª	7ª	11ª	13ª		1ª	3ª	5ª	7ª	11ª	13ª
L3	575	2.6	19.1	4.8	5.5	4	L3	574	3.1	0.14	0.94	1	1
L9	391	3.3	22.5	5.1	5.3	3.6	L9	390	3.7	6.8	1.8	0.6	0.61
C1	85.3	0.66	12.8	5.9	10.3	7.2	C1	89.9	1.3	12.2	1.2	1.4	1.4
C2	70.7	0.42	8.3	4.1	9.4	8.6	C2	73.9	0.78	14.4	0.9	1.02	0.98
THDV = 3.42 % ; THDI = 3.66 % y 6.2 % * FR = 8.25							THDV = 1.56 % ; THDI = .62 % y 2.08 % * FR = 3.9 y 4.5						
SIST. C/BCOS. EN IGS, RVA, CLG Y CZL. (CDJ30) CORRIENTES ARMONICAS (AMPS)							SIST. C/BCOS. EN IGS Y RVA CON REACT. Y EN CLG, CZL SIN ELLOS CORRIENTES ARMONICAS (AMPS) (CDJ40)						
	1ª	3ª	5ª	7ª	11ª	13ª		1ª	3ª	5ª	7ª	11ª	13ª
L3	553	3.4	35.4	3.5	2.9	2.9	L3	553	4.1	0.25	2.76	3.2	2.2
L9	379	3.8	30.7	1.8	1.9	1.2	L9	378	4.4	7.2	2.8	2.6	1.9
C1	87.1	0.78	18.5	2.5	0.94	3.4	C1	91.7	1.6	13	2.1	0.45	0.18
C2	72.2	0.53	14.3	2.5	3.2	3.7	C2	75.4	0.99	17	2	0.97	0.44
C3	92.8	0.76	20	3.4	3.6	3.5	C3	92.9	0.89	2.2	3.5	6.3	4.2
C4	91	0.73	20	3.6	5.3	7	C4	91.1	0.85	1.9	3.6	8.4	7.2
THDV = 4.5 % ; THDI = 6.5 % y 8.2 % * FR = 5.25							THDV = 1.29 % ; THDI = 1.14 % y 2.51 % * FR = 3.75, 4.58 y 8.25						

FR = Frecuencia de resonancia (Hz / 60)

C1 EN RVA, C2 EN IGS, C3 EN CZL, C4 EN CLG Y C5 EN CVA.

\* THDI EN L3 Y L9 RESPECTIVAMENTE.

TABLA 8.1 RESUMEN GENERAL DE CORRIENTES ARMONICAS, FACTORES DE DISTORSION ARMONICOS TOTALES DE VOLTAJE Y CORRIENTE PARA LAS DIFERENTES CONDICIONES DE OPRACION DEL SISTEMA, SUBAREA JUAREZ

SISTEMA CON BANCOS DE CAPACITORES SIN REACTORES DE AMORTIGUAMIENTO.							SISTEMA CON BANCOS DE CAPACITORES CON REACTORES DE AMORTIGUAMIENTO.						
SIST. C/BCOS. EN IGS, RVA, CLG, CZL Y CVA. (CDJ31) CORRIENTES ARMONICAS (AMPS)							SIST. C/BCOS EN C1 Y C2 CON REACT Y EN C4, C3 Y C5 SIN ELLOS. (CDJ41) CORRIENTES ARMONICAS (AMPS)						
	1ª	3ª	5ª	7ª	11ª	13ª		1ª	3ª	5ª	7ª	11ª	13ª
L3	550	3.9	35.6	2.6	2.8	3.1	L3	550	4.7	0.38	3.9	2.4	1.9
L9	378	4.1	25.2	0.8	1.1	0.53	L9	372	4.7	7.3	2.7	1.7	1.4
C1	87.8	0.85	15.9	1.2	2.3	7.3	C1	92.5	1.8	13.2	2.3	0.23	0.29
C2	73	0.59	13.7	1.7	2.5	3.2	C2	76.2	1.1	18	2.8	0.52	0.25
C3	93.7	0.84	18.5	2.1	2	1.1	C3	93.8	0.99	2.3	4.4	2.6	1.3
C4	92.1	0.81	19.3	2.5	4.3	6.3	C4	92.1	0.96	2	4.9	4.7	4.4
C5	83.07	0.7	17	2.3	4.1	6.5	C5	83.1	0.84	1.4	4.1	4.1	4
THDV = 4.2 % ; THDI = 6.5 % y 6.7 % * FR = 4.67							THDV = 1.12 % ; THDI = 1.26 % y 2.50 % * FR = 3.58, 4.58 y 7.17						
SIST. C/BCOS. EN IGS, RVA Y CVA. (CDJ29A) CORRIENTES ARMONICAS (AMPS)							SIST. C/BCOS EN IGS Y RVA CON REACT Y EN CVA SIN ELLOS. (CD39A) CORRIENTES ARMONICAS (AMPS)						
	1ª	3ª	5ª	7ª	11ª	13ª		1ª	3ª	5ª	7ª	11ª	13ª
L3	563	2.9	25.8	5.54	4	3.8	L3	562	3.5	0.14	1.4	5.6	4.6
L9	384	3.4	25.6	3.95	2.3	1.1	L9	384	3.9	6.9	2	2.8	2.3
C1	86	0.7	15	4.9	2.2	3.2	C1	90.6	1.4	12.4	1.4	2.1	0.71
C2	71.4	0.46	10.7	4.2	5.1	5.7	C2	74.6	0.86	15.2	1.2	2.5	1.4
C5	81.1	0.55	12.9	5.2	7.2	8.9	C5	81.2	0.63	1.15	1.7	16.5	16.4
THDV = 3.62 % ; THDI = 4.82 % y 6.83 % * FR = 6.5							THDV = 2.47 % ; THDI = 1.46 % y 2.36 % * FR = 3.83 y 4.58						
SIST. C/BCOS. EN IGS, RVA, CLG Y CVA. (CDJ30A) CORRIENTES ARMONICAS (AMPS)							SIST. C/BCOS EN IGS Y RVA CON REACT Y EN CLG, CVA SIN ELLOS. (CD40A) CORRIENTES ARMONICAS (AMPS)						
	1ª	3ª	5ª	7ª	11ª	13ª		1ª	3ª	5ª	7ª	11ª	13ª
L3	554	3.4	33.9	3.5	3.1	3.2	L3	554	4	0.24	2.5	3	2
L9	380	3.7	28	1.6	1.2	0.55	L9	379	4.2	7.07	2.4	1.8	1.4
C1	86.9	0.76	17	2.2	2.1	7.3	C1	91.5	1.6	12.7	1.9	0.27	0.39
C2	72.2	0.52	13.5	2.5	3	3.4	C2	75.9	0.97	16.4	1.9	0.77	0.31
C4	91	0.71	18.9	3.6	5.1	6.7	C4	91.1	0.83	1.8	3.3	6.7	5.2
C5	82.1	0.62	16.7	3.3	4.9	6.9	C5	82.2	0.72	1.2	2.8	6	4.8
THDV = 4.28 % ; THDI = 6.23 % y 7.46 % * FR = 5.32							THDV = 1.09 % ; THDI = 1.09 % y 2.35 % * FR = 3.75, 4.58 y 8.33						

FR = Frecuencia de resonancia (Hz / 60)

C1 EN RVA, C2 EN IGS, C3 EN CZL, C4 EN CLG Y C5 EN CVA.

\* THDI EN L3 Y L9 RESPECTIVAMENTE

## OPERACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

En la tabla 8.1 se tiene un breve estudio de algunos casos en el área de Cd. Juárez, que se hicieron a través de simulaciones, posteriormente se hicieron mediciones prácticas conectando un solo banco de capacitores, en la figura 8.4 se muestran las gráficas con dichas mediciones de corrientes armónicas en la línea de transmisión Azcarate-Riveraña, observándose que las armónicas que presentan mayor magnitud son las armónicas de tercero, quinto, séptimo y noveno orden. Se conectó aproximadamente a las 10:41 hrs, el banco localizado en Riveraña para soporte de voltaje como se indica en la figura 8.4a. Se observa que la armónica de mayor magnitud es la de quinto orden. Al entrar en operación el banco de capacitores la magnitud de esta armónica disminuye, esta situación de las corrientes armónicas se puede comparar con los resultados obtenidos en la tabla 8.1 en la columna 2, en el apartado CDJ36. Esta disminución de la corriente de quinta armónica es debido a que al conectarse el banco de capacitores, éste actuó como un filtro para esta armónica, puesto que se observó que en las armónicas de tercero, séptimo y noveno orden permanecieron en el mismo nivel de corriente que prevalecía antes de la conexión del banco de capacitores.

La corriente de quinta armónica fue absorbida por el banco al presentarse entre la carga y éste un circuito tanque, por lo que se sugirió, dado que aumenta la corriente en el banco al presentarse la armónica; se colocaran mas unidades capacitoras adicionales, un modulo capacitivo por cada grupo en paralelo, esto para aumentar la vida del banco, con este aumento se divide la corriente en más unidades capacitivas y decrementa la posibilidad de falla, además de desintonizar el circuito a la frecuencia de resonancia para una armónica de quinto orden. Posteriormente se desconectó el banco aproximadamente a las 12:48 hrs elevándose nuevamente la magnitud de corriente de quinta armónica, en la línea Azcarate-Riveraña, esta corriente no se elevó a la corriente inicial de la gráfica debido a la disminución de la carga que ocurre en ese periodo del día. Como se observa en la figura 8.4b, donde se muestra la continuación del horario para la realización de medición de armónicas de la figura 8.4a.

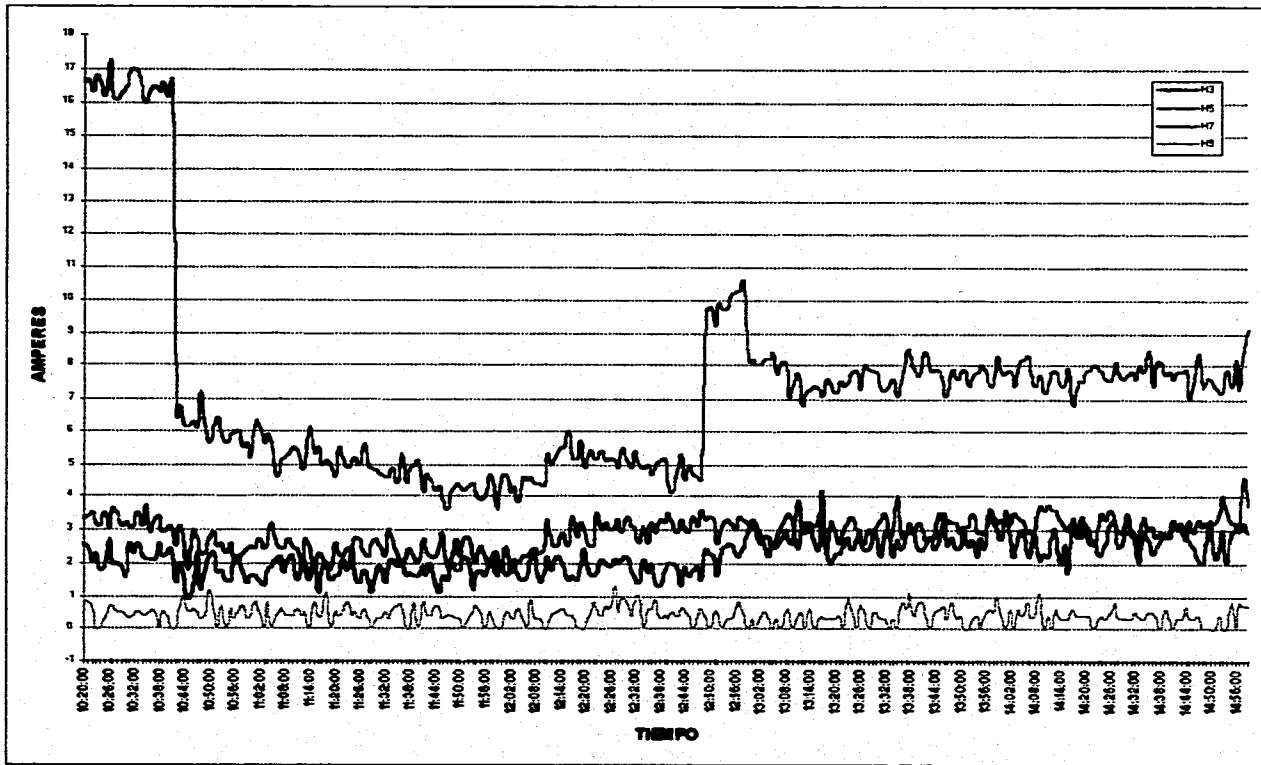
Estas gráficas de la figura 8.4 nos muestran el valor real de corrientes armónicas que se presentan en el sistema, en este caso en la línea Acarate-Riveraña, esto es, para comprender que pasa cuando un banco de capacitores entra en interacción con el sistema. Debido a que se encuentran en esa zona de Cd. Juárez cinco bancos de capacitores, como se observó en la tabla 8.1 al conectar y desconectar los bancos de capacitores, así como usar o no usar reactores de amortiguamiento en los bancos; se tienen diferentes frecuencias de resonancia, debido al cambio de reactancias capacitivas y reactancias inductivas que ocurren al conectar

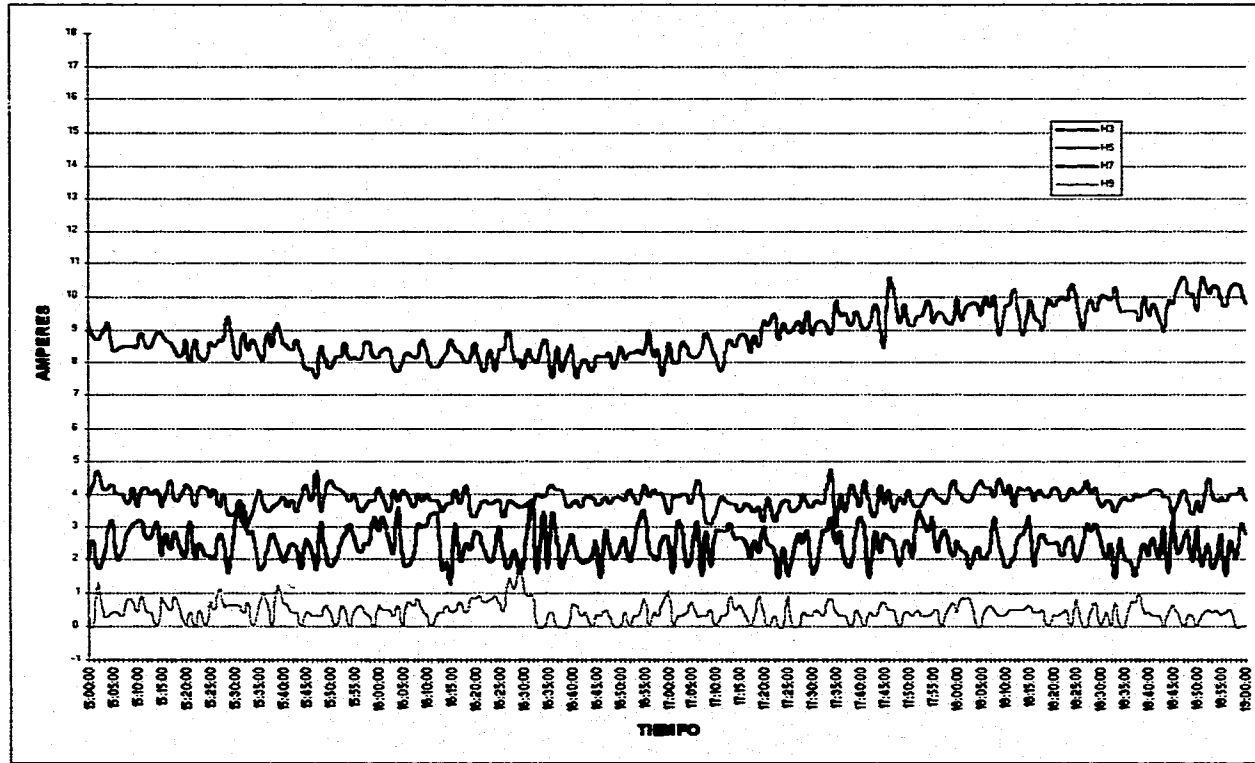
#### OPERACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

o desconectar, tanto los bancos de capacitores como los reactores de amortiguamiento, en diferentes puntos de la red. Por lo que pueden haber casos en que se acerquen las frecuencias de resonancias a frecuencias de armónicas ya previstas, que en el caso de Cd. Juárez, la armónica predominante es la quinta, dado que es la que presenta mayor magnitud con respecto a las otras armónicas.

Comparando los valores de la tabla 8.1 y las gráficas de la figura 8.4, observamos que son parecidos los resultados, por lo tanto, este tipo de simulaciones nos acerca a la realidad del problema que se origine, debido a esto, se puede estudiar cualquier problema que se tenga dentro de las líneas de transmisión.







(b)  
 Fig. 7.4 Mediciones de armónicas en Riveraña-Azcarate, durante la puesta en servicio del banco en RVA

## 8.6 SOBREVOLTAJES TRANSITORIOS

### 8.6.1 Configuración de los bancos de capacitores que se instalarán en las subestaciones *Insurgentes* y *Rivera*.

#### a) Subestación *Insurgentes*

El banco de capacitores proviene de la subestación San Luis de La Paz, Gto., el cual estuvo en operación durante aproximadamente cuatro años. El banco de capacitores está conformado por 135 unidades capacitoras cuyos valores nominales son: 200 KVAR's, 13280 volts y 3.0  $\mu\text{F}$ . Cada unidad capacitadora a su vez, está integrada por cuarenta capacitores individuales de 5 kVAR's, 1660 volts y 4.8  $\mu\text{F}$ . (8 grupos en serie, y cada grupo integrado por 5 capacitores en paralelo). Como las unidades capacitoras no disponen de fusibles internos, cuando falla un capacitor individual; queda en corto circuito todo un grupo. Por lo que el voltaje que puede soportar una unidad capacitadora queda reducido en relación a su voltaje nominal. La capacidad original del banco de capacitores era 30 MVAR. Después de algunas fallas en unidades capacitoras, se redujo la capacidad de éste a 27 MVAR (45 unidades capacitoras por fase).

Durante el mes de febrero del año en curso, después de haber experimentado el banco de capacitores, quince disparos en un breve periodo, se optó por evaluar el estado actual de cada una de las 135 unidades capacitoras que lo conformaban; para lo cual se procedió a efectuar mediciones de sus capacitancias. Los valores medidos quedaron comprendidos en el rango de 3.3 a 3.6  $\mu\text{F}$ . Si cada unidad capacitadora dispusiera de siete series en buen estado, el valor de capacitancia de cada una, sería:

$$C_7 = \frac{5 \cdot 4.8}{7} = 3.43 \mu\text{F}$$

En base a lo anterior, se asumió que cada una de las unidades capacitoras tiene una serie dañada. Esto es, que su capacitancia es 3.43  $\mu\text{F}$  en lugar de 3.0  $\mu\text{F}$ , que es su valor nominal. De tal manera, que cada una unidad capacitadora soporta un voltaje igual a  $7/8 \cdot 13280$  volts. Esto es, 11620 volts (87.5% de su voltaje nominal).

## OPERACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

Por tanto; se propone que el banco de capacitores a instalarse en la subestación Insurgentes quede configurado como se indica en la figura 8.5 Esto es, 6 grupos en serie y cada grupo con 6 unidades capacitivas en paralelo.

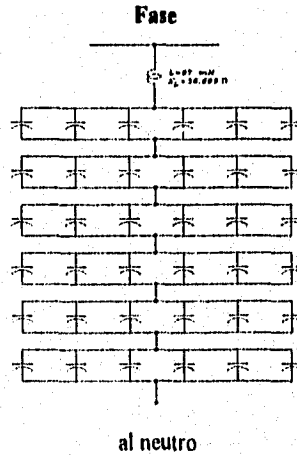


Figura 8.5- Configuración propuesta para el banco de capacitores de la subestación Insurgentes.

Las características del banco de capacitores bajo estas consideraciones, serían:

*Cada unidad capacitadora.- (conformada por siete grupos en serie, y cada grupo integrado por cinco capacitores en paralelo)*

<i>Reactancia</i>	<i>= 773.3 Ohms.</i>
<i>Voltaje nominal</i>	<i>= 11620 Volts</i>
<i>Voltaje de operación</i>	<i>= 11066 Volts</i>
<i>Potencia nominal</i>	<i>= 200 KVAR's</i>
<i>Potencia de operación</i>	<i>= 181.38 KVAR's</i>
<i>Corriente nominal</i>	<i>= 15.0 Amperes</i>
<i>Corriente de operación</i>	<i>= 14.3 Amperes</i>

## OPERACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

### **El banco de capacitores.-**

<i>Voltaje de operación</i>	= 66395 Volts
<i>Corriente de operación</i>	= 85.9 Amperes
<i>Potencia</i>	= 17101 KVAR's trifásicos

### **b) Subestación Riverena**

El banco de capacitores proviene de la subestación Tepic Dos, Nay, y está conformado por 75 unidades capacitoras cuyos valores nominales son, 200 KVAR's, 13280 volts y 3.0  $\mu$  F. En base a los resultados del análisis de resonancias armónicas, y con el propósito de disminuir las posibilidades de que en ciertas condiciones, el banco de capacitores opere como un filtro de quinta armónica; se propone que el banco de capacitores esté conformado por 5 grupos en serie y cada grupo con 6 unidades capacitoras en paralelo. Las características del banco de capacitores, serían:

#### **Cada unidad capacitiva.-**

<i>Voltaje nominal</i>	= 13280 Volts
<i>Potencia nominal</i>	= 200 KVAR's
<i>Corriente nominal</i>	= 15.0 Amperes
<i>Reactancia</i>	= 884.2 Ohms

#### **El banco de capacitores.-**

<i>Voltaje de operación</i>	= 66395 Volts
<i>Corriente de operación</i>	= 90.0 Amperes
<i>Potencia</i>	= 18000 KVAR's trifásicos

### **8.6.2 Energización de los bancos de capacitores que se instalarán en las subestaciones Insurgentes y Riverena.**

- La energización de los bancos de capacitores comprendió el cierre del interruptor en condiciones normales y en condiciones de disparidad de polos. En ambos casos, con y sin la presencia del reactor de amortiguamiento.

## OPERACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

- El análisis consideró apartarrayos de óxido de zinc clase 96 kV, su ubicación se muestra en la figura 8.3.
- Se consideró que el voltaje previo a la energización del banco de capacitores, es 105% del voltaje nominal.
- Los resultados reportados corresponden a la condición que considera el cierre del interruptor, en ángulos de la señal de voltaje, tales que provocaran las mayores magnitudes de los sobrevoltajes. Esto con la finalidad de analizar la energización de cada banco de capacitores en condiciones no favorables.
- Se reportan magnitudes de sobrevoltajes, de corrientes y de energía que deben disipar los apartarrayos.

### **a) Subestación Insurgentes**

#### *- Sin considerar la presencia del reactor serie*

En las gráficas de la figura 8.6 se muestra el comportamiento de los sobrevoltajes que se producen durante la energización del banco de capacitores en la subestación Insurgentes, considerando ausencia del reactor serie. Se observa en esta figura, que el mayor sobrevoltaje se presenta en la fase 3, y que su magnitud es 175 kVpico (1.86 pu); valor que no representa riesgo alguno para el equipo eléctrico. La frecuencia de oscilación de este sobrevoltaje es 690 Hz.

#### *- Considerando la presencia del reactor serie*

En las gráficas de la figura 8.7 se muestra el comportamiento de los sobrevoltajes que se producen durante la energización del banco de capacitores en la subestación Insurgentes, considerando la presencia del reactor de amortiguamiento. Se observa en esta figura, que el mayor sobrevoltaje se presenta en la fase 3, y su magnitud es 170 kVpico (1.81 pu); valor que no representa riesgo alguno para el equipo eléctrico. La frecuencia de oscilación del sobrevoltaje es 270 Hz.

Resumiendo, los valores de sobrevoltaje que se producen durante la energización del banco de capacitores en la subestación Insurgentes, son soportados por éste y por el sistema.

#### **b) Subestación Riveña**

Los resultados de sobrevoltajes y de corrientes, así como de energía a través de los apartarrayos obtenidos durante la energización del banco de capacitores, en la subestación Riveña; son similares a los valores correspondientes que se determinaron para la subestación Insurgentes. En las gráficas de las figuras 8.8 y 8.9, se muestra el comportamiento del sobrevoltaje y de la corriente a través del banco de capacitores durante su energización.

Los valores de sobrevoltaje y de sobrecorriente que se producen durante la energización del banco de capacitores en la subestación Riveña, son soportados por éste y por el sistema.

#### **8.6.3 Desenergización de los bancos de capacitores que se instalarán en las subestaciones Insurgentes y Riveña.**

Como ya se mencionó, un aspecto de suma importancia que debe ser considerado durante la desenergización de bancos de capacitores, es la determinación del voltaje de recuperación a través del interruptor. Por lo anterior, se procedió a simular la ocurrencia de una falla de fase a tierra en el nivel de 115 kV próxima al banco de capacitores. La liberación de la misma se efectuó a través de la desconexión del elemento fallado, e inmediatamente, por alguna razón, se presenta la apertura del interruptor del banco de capacitores. Bajo estas condiciones se determinaron las magnitudes del voltaje de recuperación y de la corriente de descarga, con y sin reactor serie. La falla de fase a tierra se inicia a los 12 milisegundos, es liberada a los 40 milisegundos y el interruptor del banco de capacitores abre a los 80 milisegundos.

### **a) Subestación Insurgentes**

En las gráficas de las figuras 8.10 y 8.11 se muestra el voltaje a través del interruptor y la corriente de descarga del banco de capacitores. En la figura 8.10, se considera que no existe reactor de amortiguamiento. De lo mostrado en ambas figuras, se observa que la magnitud del voltaje de recuperación es prácticamente el mismo en los dos casos, 225 kVpico (2.4 pu). La corriente de descarga del banco de capacitores es 590 y 350 Amperes pico, sin y con reactor, respectivamente. En relación a la energía de disipación a través de los apartarrayos, se determinaron los valores de 2000 y 3800 Joules, sin y con reactor serie, respectivamente.

### **b) Subestación Riveña**

En las gráficas de las figuras 8.12 y 8.13 se muestra el voltaje a través del interruptor y la corriente de descarga del banco de capacitores. En la figura 8.12, se considera que no existe reactor de amortiguamiento. El voltaje de recuperación es de 225 kVpico (2.4 pu.) en ambos casos. La corriente de descarga es 740 Amperes pico (6.4 pu) sin reactor y 360 Amperes pico (3.1 pu) con reactor. En relación a la energía que deben ser capaces de disipar los apartarrayos, se determinó un valor de 2300 Joules, sin reactor, y un valor de 4200 Joules considerando reactor serie.

## **8.7 CONDICIONES DE DESBALANCE**

Dado que en ambos bancos de capacitores, cada grupo dispondrá de solo 6 unidades capacitoras en paralelo, la falla de una de éstas, somete a un sobrevoltaje del 117% al resto de las unidades capacitoras del mismo grupo. Valor superior al que pueden soportar dichas unidades (110% del voltaje nominal); por tal razón, los bancos de capacitores deberán ser desconectados para la condición que considere una o más unidades capacitoras falladas en un mismo grupo.

La condición de desbalance, se manifiesta por la presencia de un voltaje en el neutro de la estrella, determinado por la siguiente expresión.



#### OPERACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

$$V_{NG} = \frac{V_{LG}(F_i)}{3S(P - F_i) + 2F_i}$$

donde;

- $V_{LG}$  = Voltaje de fase a tierra del banco de capacitores
- $S$  = Número de grupos en serie
- $P$  = Unidades capacitores en paralelo en cada grupo
- $F_i$  = Número de unidades falladas en el grupo

Para el caso particular de las subestaciones Insurgentes y Riveraña, el voltaje en el neutro de la estrella, para la condición que considera una unidad capacitadora fallada y la presencia del reactor serie; es de 758 y de 890 volts, respectivamente.

En la información, que se anexa al presente, se indican los valores de corrientes y de voltajes que deben ser considerados para los ajuste de los esquemas de protección de los bancos de capacitores que se instalarán en las subestaciones Insurgentes y Riveraña. Así como las características de operación de ambos bancos de capacitores, considerando la presencia de los reactores serie.

OPERACION DE BANCOS DE CAPACITORES

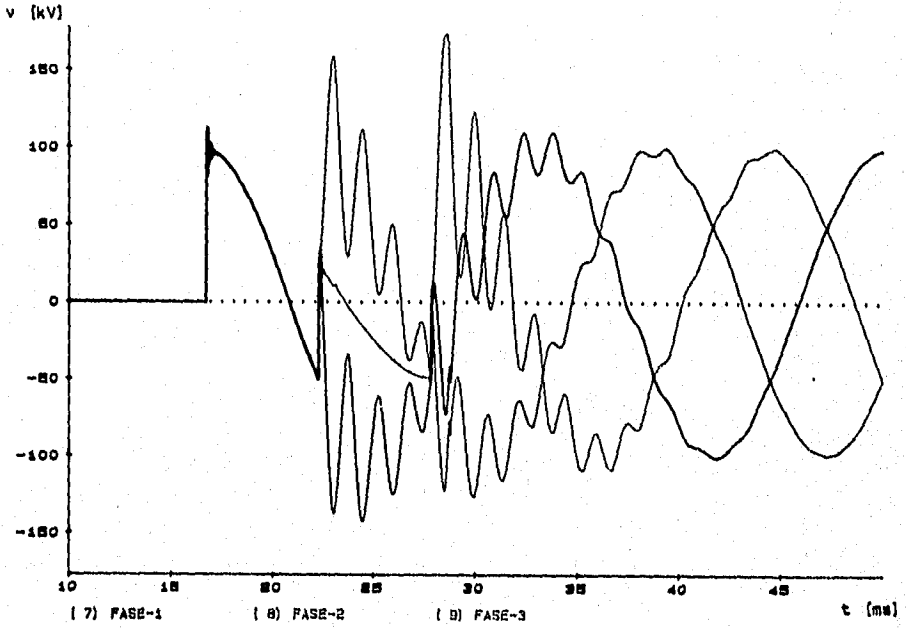


Figura. 8.6 Sobrevoltajes en terminales del banco de capacitores, durante su energización

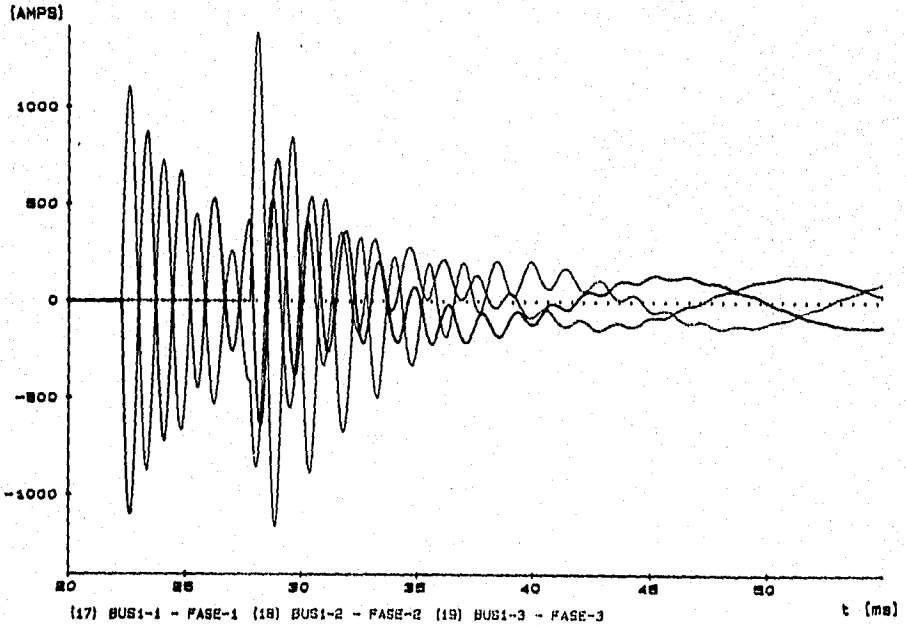


Figura. 8.7 Corriente a través del banco de capacitores, durante su energización.

OPERACION DE BANCOS DE CAPACITORES

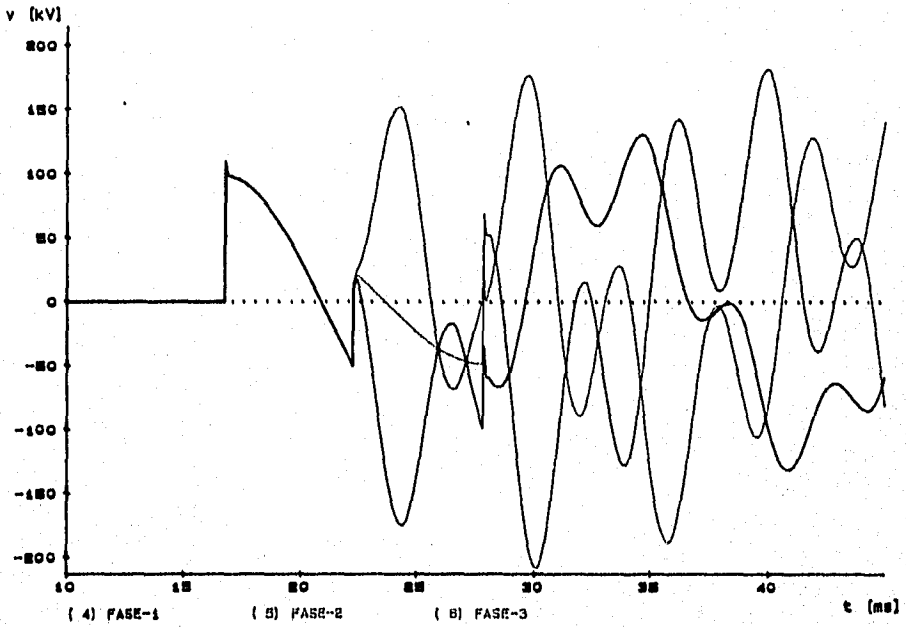


Figura. 8.8 Sobrevoltajes en terminales del banco de capacitores, durante su energización.

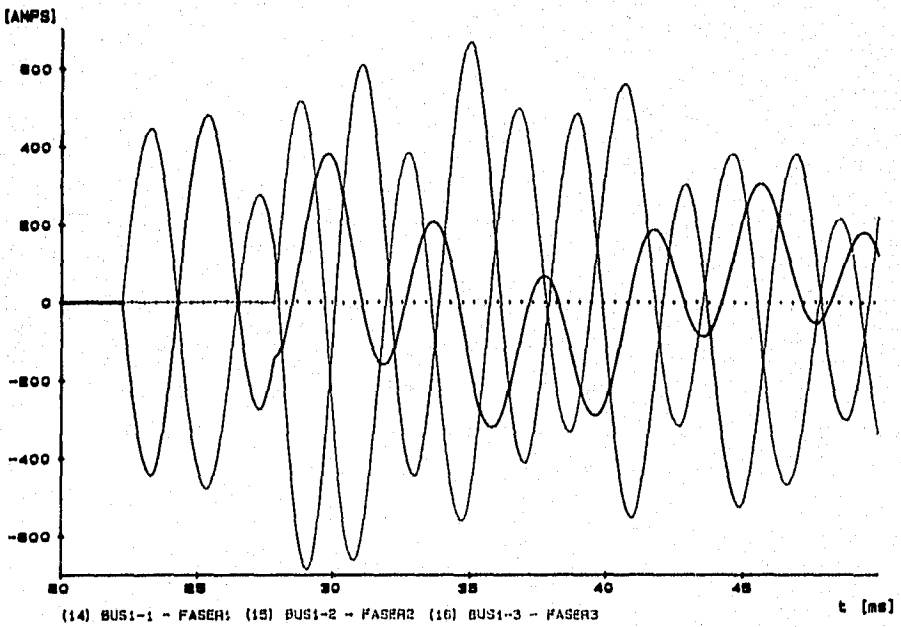


Figura. 8.9 Corriente a través del banco de capacitores, durante su energización.

OPERACION DE BANCOS DE CAPACITORES

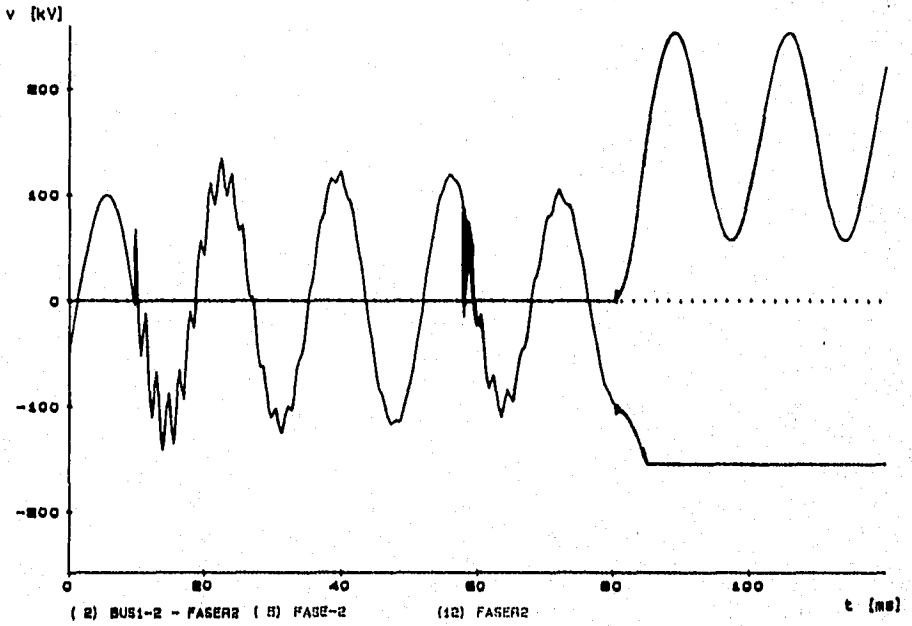


Figura. 8.10 Voltajes correspondientes a la fase 2 durante la desconexión del banco.

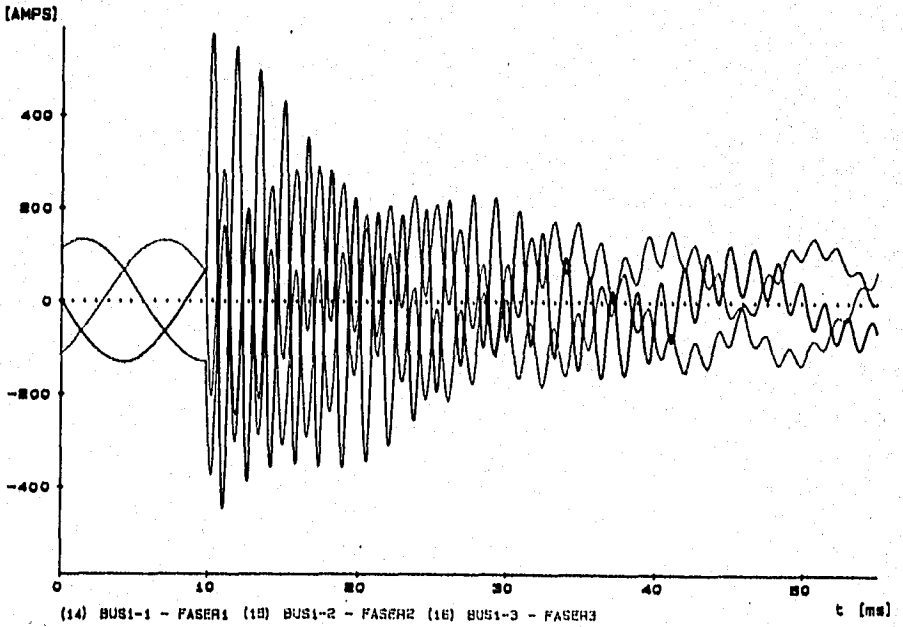


Figura. 8.11 Corriente de descarga del banco de capacitores, ante una falla externa.

OPERACION DE BANCOS DE CAPACITORES

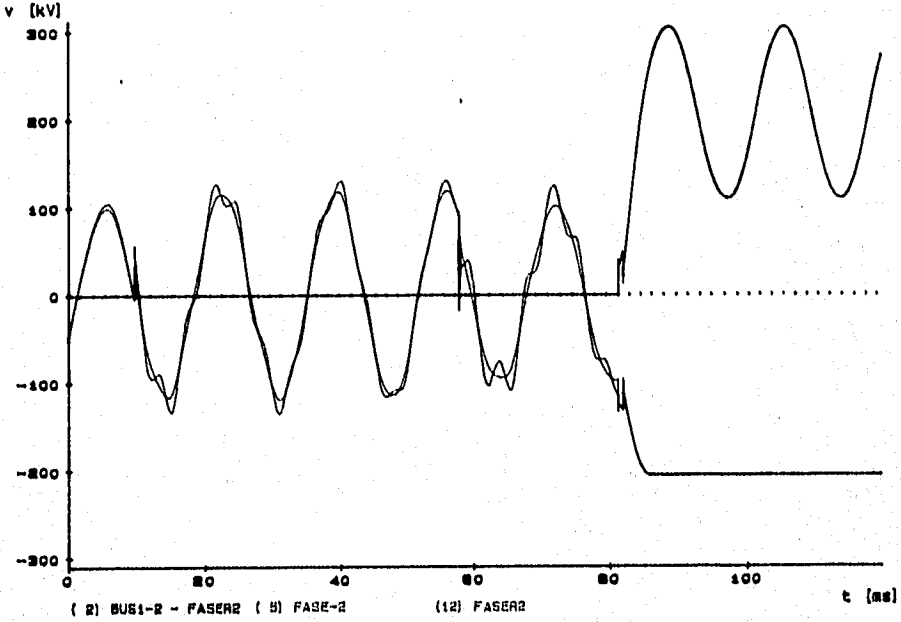


Figura. 8.12 Voltajes durante la desconexión del banco correspondientes a la fase 2

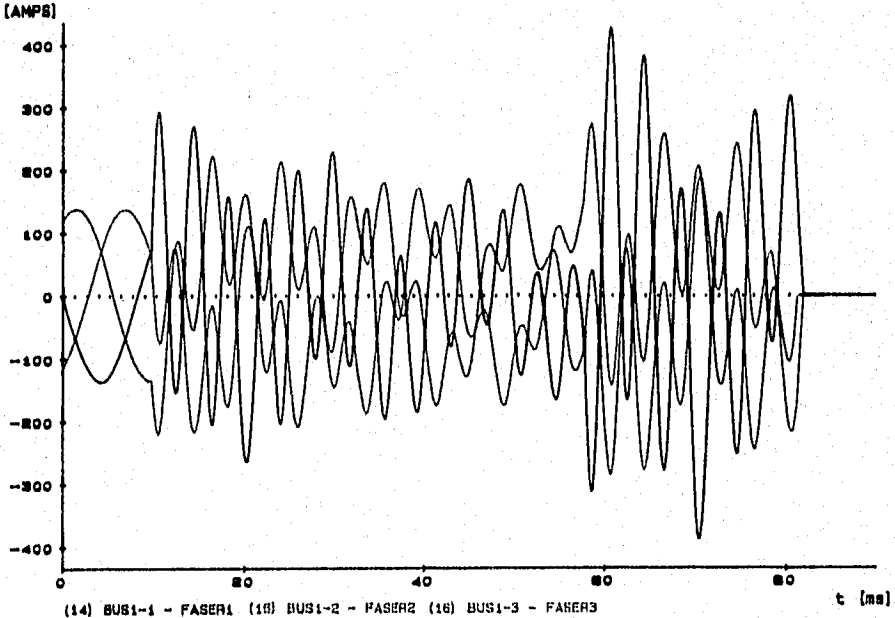


Figura. 8.13 Corriente de descarga del banco de capacitores, ante una falla externa.

### 8.8 COMENTARIOS DE LA PUESTA EN SERVICIO.

- De acuerdo a las mediciones efectuadas en las subestaciones Riveroña e Insurgentes, existe la presencia de la componente de quinta armónica. Su magnitud es mayor que la del resto de las componentes armónicas. Se determinó que prácticamente no existen componentes armónicas de orden par en la Subárea de Cd. Juárez.

- Con la operación simultánea de los bancos de capacitores, las frecuencias de resonancia entre éstos y el sistema, se aproximan a la quinta armónica.

- Con la instalación de los reactores serie, se desintoniza la frecuencia de resonancia a la quinta armónica, entre los bancos de capacitores y el sistema eléctrico.

- Se recomienda que los reactores de amortiguamiento, sean instalados en los bancos de capacitores de las subestaciones Riveroña e Insurgentes.

- Durante los análisis de resonancia armónica, se detectó que para la condición de que estén en operación simultánea más de tres bancos de capacitores, existe la posibilidad de que pudiera comportarse el banco de capacitores de la subestación Riveroña como un filtro a la quinta armónica. Esto, considerando una capacidad de 15 MVAR. Por tal motivo, se considera conveniente incrementar su capacidad a 18 MVAR.

- Por lo anterior, se recomienda que cada uno de los bancos adicionales que se instalarán en la Subárea de Cd. Juárez, posean la siguiente configuración: 6 grupos en serie y cada grupo conformado por seis unidades capacitores en paralelo, para la subestación Insurgentes; y 5 grupos en serie y cada grupo conformado por 6 unidades capacitores en paralelo, para la subestación Riveroña. Para estas configuraciones la capacidad trifásica de cada banco sería 17.1 MVAR en la subestación Insurgentes y 18.0 MVAR en la subestación Riveroña.

- Se recomienda que como parte de la puesta en servicio de los bancos de capacitores, se incluya el balanceo de éstos y se realicen mediciones de componentes armónicas durante las pruebas de energización.

- Con la falla de una de las unidades capacitores, se deberá mandar disparo del banco de capacitores. Esto, en ambas subestaciones.

## OPERACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES

- Es indispensable que los apartarrayos utilizados en la protección de los bancos de capacitores instalados en el nivel de 115 kV, sean de óxido de zinc y de clase 96 kV.
- Previo a la reenergización de los bancos de capacitores, se deberá considerar un tiempo muerto de 5 minutos con el propósito de evitar energizarlos con carga atrapada.
- Desde el punto de vista de sobrevoltajes transitorios, se considera que no debe existir problema alguno, con la energización y desenergización de los bancos de capacitores instalados en la Subárea de Cd. Juárez.
- Es conveniente ir tomando las providencias necesarias para la adquisición de nuevas unidades capacitadoras, con el fin de disponer de unidades de reserva. Se recomienda que éstas, sean ALLFILM, similares a las unidades del banco de la subestación Riverena.
- En el caso de que se decidiera, no se considera necesario, sustituir las unidades capacitadoras del banco de la subestación Insurgentes; se recomienda que las especificaciones de las mismas consideren la presencia del reactor serie.
- Es conveniente de que en las próximas adquisiciones de bancos de capacitores, que dispongan de reactor serie, se analice la conveniencia de que éste, se ubique entre el banco de capacitores y el neutro de la estrella. Esto, permitiría que el aislamiento y capacidad del reactor para soportar corrientes de falla; estén muy por abajo de los niveles con los cuales se especifican actualmente. El ahorro en el costo de los reactores se reduciría en un 30%, aproximadamente.

Finalmente, se agradece al personal de la Subárea de Transmisión y Transformación Juárez y al personal de la Subárea de Control Juárez; las facilidades otorgadas para la realización del presente trabajo.

## **CONCLUSIONES.**

Observamos que para la puesta en servicio de un banco de capacitores es requerido todo un estudio tanto para su selección como para su instalación. Entre los factores que deben ser considerados están los siguientes: posibles resonancias armónicas y los sobrevoltajes transitorios. Un aspecto importante que también debe ser considerado se refiere a los costos, puesto que en muchas ocasiones debido a esto no se puede tener un banco de capacitores con las características adecuadas para soportar la falla de una o de dos unidades capacitivas sin que se tenga la necesidad de sacarlo de servicio debido al desbalance que se presenta operando en esas condiciones.

Como se puede apreciar, esta tesis no profundiza, como hubiéramos deseado, en algunos de los temas relacionados con el estudio de los bancos de capacitores de potencia, debido a la gran extensión que abarca cada tema. Se generalizó en algunos aspectos con el propósito de poder comprender de una manera más sencilla la interacción de los bancos con el sistema eléctrico.

Un buen estudio previo a la selección, instalación y puesta en servicio de un banco de capacitores, redundará en una operación adecuada y en un mantenimiento casi nulo del banco de capacitores, reduciendo los costos. Otros beneficios son la reducción en pérdidas, mejora notable en el rendimiento económico de la transmisión y consumo de la energía y, mejorar la regulación del nivel de voltaje.

Esperamos que esta tesis no sea solo un trabajo para presentar un examen profesional, sino que constituya una guía de estudio tanto para el estudiante como para el ingeniero relacionado con estos aspectos.



## **BIBLIOGRAFÍA**

**POWER CAPACITOR  
R.E. MARBURY  
MC. GRAW HILL**

**POWER CAPACITOR CONSTRUCTION, CAPABILITY AND PROTECTION  
JOHN E. HARDER,  
ASEA KABEL AB SWEDEN.**

**FIELD EXPERIENCE WITH ARMONIC INJECTING EQUIPMENT IN DISTRIBUTION  
NETWORKS  
D.J. PILEGGI AND A.E. EMANUEL  
IEEE PES WINTER MEETING.**

**POWER SYSTEM HARMONICS  
J. ARRIAGA, BRADLEY, AND P.S. BODGER  
JOHN WILEY AND SONS**

**HARMONIC POLLUTION ON POWER SYSTEM  
R.P. STRATFORD  
IBID.**

**IEEE STANSDARD COLLECTION  
POWER CAPACITORS  
1994 EDITION**

**IEEE RECOMMENDED PRACTICES AND REQUERIMENTS FOR HARMONICS  
CONTROL IN ELECTRICAL POWER SYSTEM  
1993 EDITION**

**ANALISYS OF CAPACITOR APPLICATION AS AFFECTED BY LOAD CYCLE  
R.F. COOK  
AIEE TRANSACTIONS**

**TRANSMISSION AND DISTRIBUTION REFERENCE BOOK  
WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION  
EAST PITTSBURGH.**

**NATURAL FREQUENCY OF PARALLEL CAPACITOR BANKS**  
**W.H. CUTTINO AND MILES MAXWELL**  
**AIEE TRANSACTIONS**

**POWER CAPACITOR ECONOMICS**  
**W.H. FERGUSON.**  
**ELECTRIC LIGHT**  
**AND POWER, 1995.**

**OPTIMUM SHUNT CAPACITOR GROUP FUSING**  
**JOHN E. HARDER**  
**IEE POWER APPARATUS AND SYSTEM.**

**PREDICTION OF HARMONICS VOLTAGE IN DISTRIBUTION SYSTEMS**  
**D.J. PILEGGI, N.H. CHANDRA, AND EMANUEL**  
**IEEE TRANSACTIONS.**