

300617

9



UNIVERSIDAD LA SALLE

ESCUELA DE INGENIERIA
Incorporada a la U.N.A.M.

**“CAPACITORES DE POTENCIA.
SU SELECCION Y APLICACION INDUSTRIAL”**

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el título de:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
(AREA PRINCIPAL EN ELECTRONICA)

P r e s e n t a :

MARIA DE LOS ANGELES OÑATE ORDOÑEZ

México, D. F.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2002



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.

Al pasante Señorita MARIA DE LOS ANGELES OÑATE ORDOÑEZ.

En atención a su solicitud relativa, me es grato transcribir a Ud., a continuación, el Tema que aprobado por esta Dirección, propuso el Señor ING. JOSE LUIS CASTAÑEDA Z. para que lo desarrolle como Tesis en su Examen Profesional de Ingeniero MECANICO-ELECTRICISTA CON AREA PRINCIPAL EN ELECTRONICA.

" CAPACITORES DE POTENCIA. SU SELECCION Y APLICACION INDUSTRIAL"

Con el siguiente índice:

- CAP. I.- CONCEPTOS BASICOS SOBRE CAPACITORES.
- CAP. II.- POTENCIA ACTIVA Y POTENCIA REACTIVA.
- CAP. III.- EFECTOS DE LA POTENCIA REACTIVA SOBRE EL VOLTAJE DEL SISTEMA.
- CAP. IV.- FUENTES DE POTENCIA REACTIVA Y LAS VENTAJAS DE LOS CAPACITORES.
- CAP. V.- DETERMINACION DE LAS NECESIDADES DE POTENCIA REACTIVA EN UNA INSTALACION ELECTRICA.
- CAP. VI.- SELECCION E INSTALACION DE UN BANCO DE CAPACITORES.
- CAP. VII.- CASO PRACTICO.
- CAP. VIII.- OPERACION DE BANCOS DE CAPACITORES.
- CAP. IX.- PROTECCION Y CONTROL.

Ruego a Ud., tomar debida nota de que en cumplimiento de lo especificado en la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social como requisito indispensable para sustentar Examen Profesional, así como de la disposición de la Dirección General de Servicios Escolares, en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la Tesis, el título del trabajo realizado.

A T E N T A M E N T E

INDIVISA MANENT
México D.F., a 25 de Marzo de 1985.
ESCUELA DE INGENIERIA



INGENIERIA



ING. ARTURO ROJAS DE BENGARDI
D I R E C T O R

UNIVERSIDAD LA SALLE

BENJAMIN FRANKLIN 47, TEL. 516-98-80 MEXICO 05140 D. F.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

México, D. F., 3 de julio de 1985.

ING. ARTURO ROJAS DE BENGARDI
Director de la Escuela de Ingeniería
Universidad La Salle
P r e s e n t e .

Estimado Ingeniero:

Por medio de la presente me permito hacer de su conocimiento, que la Srta.
MA. DE LOS ANGELES ONATE ORDONEZ, ha completado a mi juicio el 50% de la te-
sis "CAPACITORES DE POTENCIA. SU SELECCION Y APLICACION INDUSTRIAL", haciéndo-
se acreedora a una calificación de MB, durante el Seminario de Tesis.

Sin más por el momento quedo de usted,

Atentamente.

ING. JOSÉ LUIS CASTAÑEDA Z.

ING. JOSÉ ANTONIO TORRES II.
Jefe del Área Eléctrica-Electrónica

INGENIERO

ING. MARCIAL RICO RICO
Director de Seminario de Tesis.

ING. ARTURO ROJAS DE BENGARDI
Director de la Escuela de Ingeniería.

/erg.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

México, D.F., a 8 de Julio de 1985.

ING. ARTURO ROJAS DE BENGARDI
Director de la Escuela de Ingeniería
Universidad La Salle.

Estimado Ingeniero Rojas:

Por medio de la presente me permito hacer de su conocimiento que la -
SRITA. MA. DE LOS ANGELES ORATE ORDONEZ ha completado, a mi parecer, el
100% de la Tesis "CAPACITORES DE POTENCIA. SU SELECCION Y APLICACION -
INDUSTRIAL".

Sin más por el momento quedo de usted,


ATENTAMENTE.


Ing. José Luis Castañeda Zuzuarregui


Ing. José Antonio Torres Hernández
Jefe del Área Eléctrica-Electrónica


Ing. Marcial Rico Rico
Jefe del Seminario de Tesis


Ing. Arturo Rojas de Bengardi
Director de la Escuela de Ingeniería


TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A MIS PADRES:

**USTEDES HAN HECHO POSIBLE TODO LO HERMOSO
DE MI VIDA, GRACIAS.**

CON TODO MI AGRADECIMIENTO A LOS INGENIEROS:

**RICARDO VALENZUELA GONZALEZ
JOSE LUIS CASTAÑEDA ZUZUARREGUI**

POR SU TIEMPO, AMISTAD Y APOYO

POR SU CARINO Y PALABRAS DE ALIENTO GRACIAS A:

LETI

JAIME

MIS TIOS

MIS MAESTROS

MIS AMIGOS

**Y A TODOS AQUELLOS QUE DE ALGUNA MANERA HICIERON
POSIBLE ESTE TRABAJO.**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

I N D I C E

INTRODUCCION.	1
CAPITULO 1. - CONCEPTOS BASICOS SOBRE CAPACITORES.	4
A. - Capacidad y Capacitores	
B. - Estructura y tipos de Capacitores	
C. - Carga y descarga de un capacitor	
D. - Energía y densidad de energía en un capacitor	
E. - Fuerza entre las armaduras de un capacitor	
F. - Corriente de desplazamiento	
G. - Capacitores en serie y en paralelo	
CAPITULO 2. - POTENCIA ACTIVA Y POTENCIA REACTIVA.	17
A. - Potencia en circuitos monofásicos de c.a.	
B. - Factor de Potencia	
C. - Triángulo de potencias	
D. - Potencia Compleja	
E. - Potencia en cargas trifásicas equilibradas	
CAPITULO 3. - EFECTOS DE LA POTENCIA REACTIVA SOBRE EL VOLTAJE DEL SISTEMA.	26
A. - Características de la carga	

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- B. - La potencia real y la frecuencia del sistema
- C. - Potencia reactiva absorbida por la carga
- D. - Efectos de la potencia reactiva sobre el voltaje del sistema
- E. - Regulación del voltaje mediante la potencia reactiva

CAPITULO 4. - FUENTES DE POTENCIA REACTIVA Y LAS VENTAJAS DE LOS CAPACITORES. 38

- A. - Uso de máquinas síncronas
- B. - Instalación de bancos de capacitores
- C. - Ejemplo práctico
- D. - Consideraciones prácticas

CAPITULO 5. - DETERMINACION DE LAS NECESIDADES DE POTENCIA REACTIVA EN UNA INSTALACION ELECTRICA. 53

- A. - Determinación del factor de potencia de una instalación.
- B. - Cálculo de la potencia reactiva requerida en capacitores para corregir el factor de potencia
- C. - Determinación de las necesidades de reactivos en el sistema

CAPITULO 6. - SELECCION E INSTALACION DE UN BANCO DE CAPACITORES. 59

- A. - Consideraciones generales
- B. - Factores que determinan la instalación de capacitores en alta o baja tensión.
- C. - Criterios para seleccionar un banco fijo o desconectable
- D. - Instalación de capacitores en baja tensión
- E. - Instalación de capacitores en alta tensión
- F. - Localización óptima de capacitores en derivación

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO 7. - CASO PRACTICO.	82
CAPITULO 8. - OPERACION DE BANCOS DE CAPACITORES.	94
A. - Conexión y desconexión	
B. - Equipo de conexión y desconexión para baja tensión	
C. - Equipo de conexión y desconexión para alta tensión	
D. - Energización de un banco aislado	
E. - Energización de bancos en paralelo	
F. - Desenergización de un banco de capacitores	
G. - Operación de capacitores con el neutro aislado	
CAPITULO 9 . - PROTECCION Y CONTROL.	106
A. - Protección	
B. - Control	
CONCLUSIONES	126
BIBLIOGRAFIA	127

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

INTRODUCCION

A lo largo de la carrera es muy frecuente la aparición de los capacitores como elementos de suma importancia en el estudio de circuitos aplicados en electricidad, electrónica, sistemas de potencia y comunicaciones. Sin embargo, y debido a la gran variedad de aplicaciones que pueden dárseles, no es posible tratarlos a fondo durante los cursos regulares; este trabajo pretende ofrecer de manera sencilla datos que permitan comprender el funcionamiento de los capacitores y está enfocado a la aplicación actual de los capacitores de potencia en la industria.

El capacitor eléctrico o condensador fue descubierto por Von Kleist en el año de 1745. Era usado como almacenador de cargas eléctricas y estaba constituido por un cilindro de vidrio con las paredes recubiertas por láminas metálicas.

Hacia el año de 1830, Faraday introdujo el concepto de dieléctrico, al comprobar que la carga eléctrica almacenada no sólo dependía del espesor del aislante interpuesto entre las láminas metálicas, sino también de lo que él llamó "capacidad de almacenamiento específica". Halló que dicha capacidad era mucho mayor en sustancias como la laca y el vidrio que la obtenida en aire y determinó las primeras constantes dieléctricas.

El capacitor comenzó a fabricarse en forma industrial hasta principios del siglo XX; rápidamente se convirtió en un instrumento indispensable en el

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

desarrollo de la técnica y recibió su impulso definitivo con el surgimiento y progreso del telégrafo inalámbrico y la radiodifusión.

Para cada aplicación específica se han venido usando dieléctricos que van desde papel impregnado en laca, cera de abejas y petróleo, hasta vidrio, plástico, diferentes óxidos, polybutano, etc.

Actualmente una de las aplicaciones más importantes de los capacitores se tienen en los sistemas de potencia. Los capacitores de potencia se usan desde el año de 1914. La introducción de los askareles (hidrocarburos aromático clorados) como impregnantes produjo, en el año de 1932 una brusca disminución del tamaño, peso y costo de los capacitores de potencia, así como en la seguridad de su uso, debido a ser incombustible - el nuevo impregnante. Hoy en día los askareles han sido prohibidos en los Estados Unidos por su alto índice de toxicidad.

En el año de 1937, apareció el capacitor de potencia para intemperie y a partir de entonces su uso se ha venido incrementando de manera extraordinaria.

La calidad de las materias primas, el uso de purificadores y estabilizadores y la introducción de dieléctricos plásticos, han permitido la fabricación de unidades más compactas, más resistentes y con mayor promedio de vida.

Todo trabajo de Ingeniería exige mantener un compromiso entre la eficiencia y seguridad de los diseños y sus costos. Los capacitores de potencia permiten optimizar la transmisión y distribución de la energía eléctrica a un costo razonablemente bajo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La corrección del factor de potencia en las líneas de transmisión, por medio del uso de capacitores, permite aumentar la capacidad de transmisión - la energía activa disponible en los generadores eléctricos, el aprovechamiento de la capacidad de los transformadores y la regulación del voltaje - en los puntos de consumo.

En instalaciones industriales, un bajo factor de potencia implica el riesgo de pérdidas excesivas de energía y sobrecargas en los equipos eléctricos y en las líneas. Esto puede traducirse en la necesidad de ampliar la capacidad existente con la compra de nuevos equipos de transformación y generación. Por otra parte, en nuestro país existe una sanción económica que debe pagarse mensualmente si se trabaja con un factor de potencia menor al 85% - atrasado.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO 1

CONCEPTOS BASICOS SOBRE CAPACITORES.

A. - CAPACIDAD Y CAPACITORES. -

Se conoce como CAPACIDAD a la propiedad que poseen los conductores para almacenar cargas eléctricas con determinados potenciales.

Supongamos una esfera conductora situada en el vacío; según la relación:

$$q = 4 \pi \epsilon_0 a V \quad \text{donde: } q = \text{carga}$$
$$a = \text{radio}$$

su carga será directamente proporcional a su potencial, es decir:

$$q = \epsilon V$$

$$q = C V$$

$$C = q/V$$

donde "C" es una constante de proporcionalidad que depende del tamaño y forma del conductor.

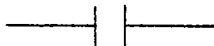
En todo cuerpo cargado aislado, podemos determinar esa constante de proporcionalidad, de allí que, generalizando llamaremos CAPACIDAD a dicho factor constante y le definiremos como la razón de la carga de un conductor a su potencial.

Según la definición, la capacidad se expresa en Coulombs/volts y se conoce como Faradio a la capacidad de 1 coulomb por volt.

Analicemos ahora, el caso de varios conductores con cargas positivas y negativas y próximos entre sí. El potencial de cada uno de ellos dependerá no sólo de su propia carga, sino del valor y signo de las cargas de los otros conductores, y de su posición, tamaño y forma.

La proximidad de conductores con cargas de signo contrario disminuirá el potencial de cada conductor pero aumentará su capacidad (razón de carga al potencial).

Cuando dos conductores próximos reciben cargas de igual magnitud y -- signo contrario (como se conseguiría al conectarlos a los bornes de una batería), se obtiene un dispositivo conocido como CONDENSADOR o CAPACITOR, cuyo símbolo es :



El hecho de que cada conductor este próximo a otro con carga contraria hace posible el paso de cantidades relativamente grandes de carga de -- uno a otro conductor con diferencias de potencial comparativamente pequeñas.

Se llama CAPACIDAD DE UN CONDENSADOR a la razón de la carga de cualquiera de los conductores, sin considerar su signo, a la diferencia de potencial entre ambos:

$$C = q / V_{ab}$$

Dicha capacidad, se refiere al almacenamiento de energía entre los --

ductores por medio de las cargas que se localizan en ellos.

Las aplicaciones de los condensadores son muy variadas y van desde los circuitos sintonizadores y rectificadores de onda usados en electrónica hasta los circuitos apagachispas y mejoradores del factor de potencia de instalaciones industriales.

B. - ESTRUCTURA Y TIPOS DE CAPACITORES. -

Aunque existen otros tipos de condensadores, mencionaremos aquí únicamente los tres más importantes:

- De Placas Paralelas
- Cilíndricos
- Variables

°Condensador de Placas Paralelas. -

También llamado condensador plano, es el tipo más importante y quizás el más usado. Está formado por 2 láminas conductoras paralelas separadas por una distancia pequeña en comparación con las dimensiones lineales de las láminas.

Si consideramos dichas láminas en el vacío y muy próximas entre sí, tendremos entre ellas un campo eléctrico uniformemente distribuido y expresado según la ecuación:

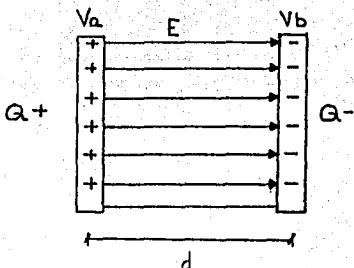
$$\vec{E} = 1/E_0 \sigma = q / E_0 A$$

donde: E_0 = capacidad específica de inducción en el vacío

q = carga de cada lámina

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A = área de cada lámina



La diferencia de potencial entre ellas será :

$$V_{ab} = \vec{E} \times d = qd / \epsilon_0 A$$

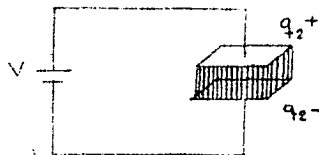
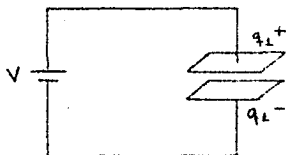
y por lo tanto: la capacidad de un condensador plano en el vacío está dada por:

$$C = q / V_{ab} = \epsilon_0 A / d = \text{constante}$$

De la relación anterior podemos ver que la capacidad para un condensador dado, será constante e independiente de la carga, directamente proporcional al área de las láminas e inversamente proporcional a su separación. Esta capacidad está dada en Faradios si el área se expresa en metros², la distancia en metros y ϵ_0 en Faradios / metro. Puesto que el Faradio es una unidad muy grande, comunmente se usan sus submúltiplos: microfaradios (10^{-6}), picofaradios (10^{-9}) y nanofaradios (10^{-12}).

Si se interpone entre las placas, un material aislante o dieléctrico de modo que ocupe todo el espacio intermedio entre las placas, se observa -- que sin variar la tensión de las mismas, sus cargas adquirirán valores --

más elevados.



$$q_2 > q_1$$

Esto se debe a que la presencia del dieléctrico disminuye el número de líneas de fuerza del campo eléctrico entre las placas, en un factor K_e -- conocido como constante dieléctrica:

$$\vec{E} = \sigma / K_e \epsilon_0 = q / K_e \epsilon_0 A$$

$$V_{ab} = \vec{E} \cdot d = dq / K_e \epsilon_0 A$$

y

$$C = q / V_{ab} = K_e \epsilon_0 A / d = \epsilon A / d$$

De donde concluimos que la capacidad de un condensador de láminas paralelas aumenta en un factor K_e con la introducción del dieléctrico.

El coeficiente dieléctrico (K_e) de una sustancia, puede definirse como la razón de la capacidad de un condensador que tenga dicha sustancia entre sus láminas, a la capacidad del mismo condensador en vacío:

$$K_e = C / C_0 = \epsilon / \epsilon_0$$

Generalmente se usan dieléctricos sólidos, porque permiten un soporte mecánico entre las placas, aumentan la capacidad y permiten una diferencia de potencial máxima mayor que en el aire, sin romperse (conducir).

°Capacitores cilíndricos. -

Son utilizados como patrones debido a que su capacidad puede calcularse con mucha precisión a partir de sus dimensiones.

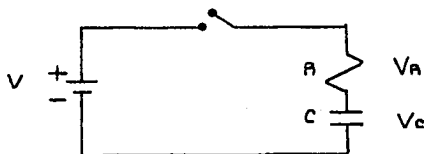
°Capacitores Variables. -

Son usualmente condensadores de aire de capacidad pequeña y que puede modificarse a voluntad entre ciertos límites. Están formados por 2 grupos de láminas metálicas paralelas, uno de ellos fijo y el otro móvil - que pueden intercalarse haciendo girar un pequeño eje. Esto permite variar el área del condensador y con ello su capacidad.

C - CARGA Y DESCARGA DE UN CAPACITOR. -

La carga de un capacitor depende de su capacidad y de la resistencia del circuito en que se encuentra y no es instantánea.

Consideremos el siguiente circuito:



Aplicando la 2a. ley de Kirchoff al circuito obtenemos:

$$V = Ri + \frac{1}{C} \int i dt$$

derivando:

$$1/C + R di/dt = 0$$

separando variables e integrando:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$di/i = -dt / CR$$

$$\ln i = -t/CR + K \quad K = \text{constante de Integración} \quad \text{--- (1)}$$

para $t=0$:

$$q=0 \quad I_0 = V/R \quad \text{por tanto:} \quad K = \ln V/R$$

sustituyendo en (1):

$$\ln i - \ln V/R = -t/RC$$

$$\ln iR/V = -t/RC$$

$$iR/V = e^{-t/RC}$$

$$i = V/R e^{-t/RC}$$

La carga del condensador se determina como sigue:

$$i = dq/dt \quad \text{por tanto} \quad q = \int i dt$$

$$q = V/R \int e^{-t/RC} dt$$

$$q = -VC e^{-t/RC} + K' \quad \text{--- (2)}$$

para $t=0$:

$$q=0 \quad 0 = -VC + K' \quad K' = VC$$

sustituyendo en (2)

$$q = -VC e^{-t/RC} + VC$$

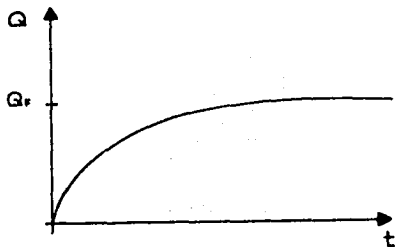
$$q = VC (1 - e^{-t/RC})$$

puesto que VC es igual a la carga final del capacitor:

$$q = Q (1 - e^{-t/RC}) \quad q - \text{carga instantánea en coulombs}$$

Dicha ecuación conduce a una curva de la forma.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



La constante de tiempo del circuito está dada por: $T = RC$
es decir, para $t = RC$ seg.:

$$i = V/R e^{-RC/RC} = V/R (1/2.718) = V/R (0.368) = 0.368 I_0$$

la corriente inicial se ha reducido al 36.8% de su valor inicial y la carga -
ha alcanzado un valor:

$$q = Q(1 - 0.368) = 0.632 Q$$

del 63.2% de la carga final.

Se considera que para un tiempo de $4T$ el capacitor ha llegado a su carga -
final.

La descarga del capacitor tiene un comportamiento análogo a la carga.

D. - ENERGIA Y DENSIDAD DE ENERGIA EN UN CAPACITOR. -

La carga de un capacitor consiste en el paso de carga de la armadu -
ra de menor potencial a la de mayor potencial y requiere un consumo de e -
nergía.

Si el proceso comienza con las láminas totalmente descargadas, llegará -
un momento en que la cantidad de carga transportada sea q y el trabajo ne -
cesario para transportar la siguiente carga será:

$$dw = V_{ab} dq = 1/C \times q \, dq$$

El trabajo total en Joules realizado para alcanzar la carga final es:

$$W = \int dw = Q^2 / 2C = C \cdot V_{ab}^2 / 2 = Q \cdot V_{ab} / 2$$

donde: Q = carga final C = Capacidad

V_{ab} = diferencia de potencial al alcanzar la carga final

Si analizamos ahora la energía de un condensador desde el punto de vista de su campo eléctrico y no de las cargas de sus armaduras, hallaremos que está distribuida por unidad de volumen, es decir, podremos hablar de una densidad de energía:

Densidad de energía = $W/V = (QV_{ab}/2) / Ad$

como: $Q/A = \sigma = E$ y $V_{ab} = Ed$

$$\text{Densidad de energía} = \vec{E}^2 / 2$$

donde:

\vec{E} = campo eléctrico

= $K_e E_0$

E. - FUERZA ENTRE LAS ARMADURAS DE UN CAPACITOR. -

Existe una fuerza de atracción entre las cargas positivas y negativas de las armaduras de un capacitor; si las láminas se encuentran en equilibrio mecánico, dicha fuerza eléctrica ha de ser contrarrestada por una fuerza mecánica ejercida por los soportes de las láminas si están en vacío, o por el propio dieléctrico.

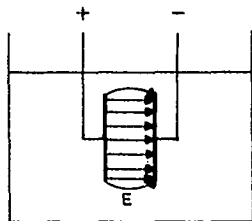
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Si se tiene un dieléctrico, este queda sometido a un esfuerzo conocido como electrostricción debido al campo eléctrico; a su vez el dieléctrico ejerce fuerzas mecánicas sobre las láminas. El conjunto se equilibra con -- fuerzas electrostáticas y elásticas y su análisis es complicado.

El caso más sencillo es cuando se tiene un fluido como dieléctrico, ya -- que reduce el aspecto elástico, y será el que consideraremos con detalle.

La figura muestra 2 placas sumergidas en un fluido dieléctrico:



Las fuerzas que permiten el equilibrio del sistema son:

- Fuerza de atracción eléctrica de las cargas
- Fuerza del líquido entre las láminas
- Fuerza del líquido exterior a las láminas
- Fuerza mecánica en los apoyos.

La fuerza mecánica se ve reducida por 2 efectos del líquido:

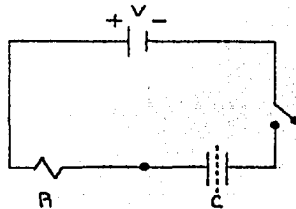
- 1) En los bordes de la lámina se tienen fuerzas sobre las moléculas del -- líquido, que tienden a comprimir el fluido entre las láminas empujándolas -- hacia afuera en contra de la atracción eléctrica.
- 2) La intensidad de campo eléctrico no es uniforme en la capa límite del -- líquido adyacente a las láminas. A nivel molecular, la fuerza ejercida ha-

cia la placa es más grande en un factor K_e , que la ejerce hacia el líquido. Esto aumenta la presión del líquido contra las láminas y reduce la fuerza necesaria en los apoyos.

Es importante señalar que la fuerza neta entre conductores cargados con un dieléctrico entre ellos, se reduce en un factor $1/K_e$ respecto a su valor en el vacío. Este sería el caso de los capacitores electrolíticos.

F - CORRIENTE DE DESPLAZAMIENTO.-

Consideremos el siguiente circuito:



Cuando se cierra el interruptor se establece una corriente de conducción (flujo de carga); sin embargo, dicha corriente es nula en cualquier sección transversal que pase por el condensador debido a que el dieléctrico es aislante.

Debido a la corriente de conducción, entran electrones libres en una de las placas del capacitor y obligan a otros a salir de la otra placa para mantener la igualdad de cargas. Este fenómeno se conoce como desplazamiento pero NO significa que exista un flujo de electrones libres a través del dieléctrico.

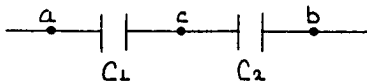
Este paso de cargas es conocido como Corriente de Desplazamiento y es de

Igual magnitud que la corriente de conducción. Permite considerar el circuito como cerrado, a pesar de no representar una trayectoria continua. Hablando prácticamente, ningún aislante es perfecto y por tanto habrá una corriente de conducción a través de los dieléctricos además de la corriente de desplazamiento. La corriente real en cualquier sección transversal de un circuito se considera como suma de las 2 corrientes; sin embargo, siempre que no se trate de corrientes de alta frecuencia puede considerarse como cero la corriente de conducción del dieléctrico y en el conductor la corriente de desplazamiento puede despreciarse.

G- CAPACITORES EN SERIE Y EN PARALELO. -

La capacidad equivalente de una red de capacitores se define como la -- razón de la carga desplazada a la diferencia de potencial entre los bornes de la red.

Supongamos una conexión de capacitores en serie en cuyos extremos se mantiene una diferencia de potencial V_{ab} :



$$Q_1 = C_1 V_{ac}$$

$$Q_2 = C_2 V_{cb}$$

$$V_{ab} = V_{ac} + V_{cb}$$

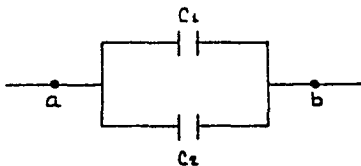
La carga que pasa a través de la red debe ser la misma, por tanto:

$$V_{ab} = Q/C_1 + Q/C_2$$

$$V_{ab}/Q = 1/C_1 + 1/C_2 = 1/C_t$$

Es decir, la inversa de la capacidad equivalente de varios capacitores en serie, es igual a la suma de las inversas de las capacidades individuales.

Si consideramos ahora una agrupación en paralelo como la que muestra la figura tenemos:



$$Q = Q_1 + Q_2 = C_1 V_{ab} + C_2 V_{ab}$$

$$Q/V_{ab} = C = C_1 + C_2$$

Es decir, la capacidad equivalente de varios condensadores conectados en paralelo es igual a la suma de las capacidades individuales.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO 2

POTENCIA ACTIVA Y POTENCIA REACTIVA

A. - POTENCIA EN CIRCUITOS MONOFASICOS C. A. . -

La potencia es uno de los parámetros más importantes en el estudio y aplicación de los dispositivos eléctricos. Los sistemas de potencia manejados en Ingeniería, se refieren casi siempre a la descripción de la razón de cambio de la energía respecto al tiempo en función del voltaje y la corriente.

La potencia que toma la carga en cualquier instante es el producto de la caída de tensión instantánea a través de la carga y la corriente instantánea en amperes: $p = vi$

Si consideramos: $v = V_{max} \text{ Sen } \omega t$ $i = I_{max} \text{ Sen } (\omega t - \theta)$

tenemos:

$$p = vi = V_{max} I_{max} \text{ Sen } \omega t \text{ Sen } (\omega t - \theta) \quad \text{--- (1)}$$

La potencia instantánea es positiva cuando v e i son positivos, y se refiere a una transferencia de energía de la fuente a la carga; si v e i son negativos o de signos opuestos, la potencia será negativa y significa que la energía se transfiere de la carga a la fuente.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En toda red eléctrica de corriente alterna existen dos tipos de cargas : óhmicas o resistivas y reactivas.

Según el tipo de carga que se maneje será el ángulo ϕ que formen la corriente y el voltaje . A continuación consideramos los diferentes casos:

***CARGA INDUCTIVA .** - La corriente atrasa al voltaje un ángulo $\phi = 90^\circ$ por tanto:

$$p = v i = V_m I_m (\text{Sen } \omega t) (\text{Sen } (\omega t - 90^\circ))$$

sabiendo que:

$$\text{Sen } (\omega t - 90^\circ) = - \text{Cos } \omega t \quad \text{y} \quad 2 \text{Sen } X \text{ Cos } X = \text{Sen } 2X$$

obtenemos:

$$p = - V_m I_m / 2 (\text{Sen } 2\omega t)$$

La frecuencia de la potencia es el doble que la del voltaje y la corriente. Cuando v e i son signo contrario, la bobina devuelve a la fuente la energía que le habfa sido suministrada, por lo tanto , el valor medio de la potencia p en un ciclo completo es cero.

***CARGA CAPACITIVA .** - La corriente adelanta al voltaje en un circuito - capacitivo puro, en un ángulo $\phi = 90^\circ$, por lo tanto:

$$p = v i = V_m I_m \text{Sen } \omega t (\text{Sen } (\omega t + 90^\circ))$$

$$p = V_m I_m \text{Sen } \omega t \text{Cos } \omega t$$

$$p = V_m I_m \text{Sen } 2\omega t / 2$$

La frecuencia de la potencia es nuevamente el doble que la del voltaje y la corriente. Cuando v e i son de signo contrario, el capacitor devuelve a la fuente la energía que habfa almacenado y por ello, el valor medio de la po

tencia en un ciclo es cero.

°CARGA RESISTIVA. - La corriente está siempre en fase con el voltaje:

$$p = v i = V_m I_m \text{ Sen}^2 \omega t$$

$$p = 1/2 V_m I_m (1 - \text{Cos } 2\omega t)$$

En este caso la frecuencia de la potencia será también el doble que la del voltaje y la corriente, pero se tendrá siempre un valor positivo de potencia, con un valor medio en un ciclo de :

$$p = 1/2 V_m I_m$$

Del análisis de los casos anteriores podemos ver, que únicamente - en las cargas resistivas la energía eléctrica consumida se transforma íntegramente en trabajo mecánico, calor o cualquier otra forma de energía - no retornable a la red.

En las cargas reactivas, la energía se almacena en forma de campo eléctrico o magnético y se devuelve a la red en un tiempo igual al que tardó en almacenarse.

Resumiendo podemos decir, que únicamente existe la potencia activa o -- real en los elementos resistivos de las cargas.

Retomando la ecuación (1) tenemos:

$$p = v i = V_m I_m \text{ Sen } \omega t \text{ Sen } (\omega t + \theta)$$

$$\text{Sen } a \text{ Sen } b = 1/2 (\text{Cos } (a-b) - \text{Cos } (a+b))$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$p = 1/2 V_m I_m (\cos \theta - \cos (2\omega t + \theta))$$

el valor medio del segundo término es cero, por tanto el valor de la potencia activa será:

$$p = 1/2 V_m I_m \cos \theta$$

pero:

$$V = V_m / \sqrt{2} \quad I = I_m / \sqrt{2}$$

consecuentemente

$$P = V I \cos \theta \quad \text{--- (2)}$$

B. - FACTOR DE POTENCIA. -

El factor " $\cos \theta$ " de la ecuación (2), se conoce como factor de potencia y se refiere al ángulo que forman la corriente y el voltaje; su variación está siempre entre $\pm 90^\circ$.

Toda carga real puede considerarse compuesta por una parte puramente resistiva y otra parte reactiva ideal. La corriente que demandará una carga como la descrita, formará con el voltaje un ángulo :

$$\theta = \text{Tg}^{-1} X/R$$

donde: X = reactancia en ohms

R = resistencia en ohms

Se llama factor de potencia al coseno del ángulo θ , debido a que representa la relación que existe entre la corriente real y la corriente total consumida, es decir, es una medida de la relación entre la potencia real o activa y la potencia total consumida por la carga.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En un circuito inductivo-resistivo en que la corriente atrasa al voltaje, -
hablamos de un factor de potencia en retraso; a su vez, en un circuito ca-
pacitivo-resistivo en que la corriente adelanta al voltaje hablamos de un -
factor de potencia en adelanto.

C. - TRIANGULO DE POTENCIAS. -

Anteriormente se estudiaron circuitos resistivos, capacitivos e induc-
tivos puros y se encontró que la potencia activa o real, está presente sólo-
en los primeros.

La componente de la potencia instantánea que toma valores alternativa --
mente positivos y negativos y cuyo valor promedio es cero, se denomina -
POTENCIA REACTIVA y expresa el flujo de energía desde la carga y hacia
la carga alternadamente.

Esta potencia reactiva Q es la que se presenta en circuitos inductivos y-
capacitivos puros.

Existe además, una potencia que comprende a las potencias real y --
reactiva; es la resultante de la suma vectorial de estas potencias y es igual
al producto VI (voltaje por corriente) donde I es la corriente total demanda
da por una carga real (impedancia formada por resistencias y reactancias
 $Z \angle \theta$).

Resumiendo podemos tener:

° Potencia Activa . - $P = \text{voltaje} \times \text{componente activa (en fase) de la corriente}$

$$P = VI \cos \theta \quad (\text{Watts, KW})$$

° Potencia Reactiva. - $Q = \text{voltaje} \times \text{componente reactiva (en cuadratura)-}$
de la corriente.

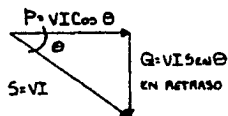
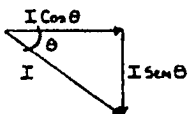
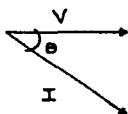
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$Q = V I \text{ Sen } \theta \quad (\text{VAR o KVAR})$$

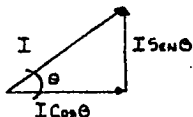
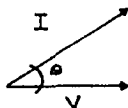
Potencia Aparente. - $S = \text{voltaje} \times \text{corriente total}$ (VA o KVA)

Con la información anterior podemos formar lo que se conoce como triángulo de potencias. Analizaremos dos casos:

1) Carga Inductiva-Resistiva



2) Carga Capacitiva-Resistiva



En las figuras se nota que la potencia aparente es siempre la hipotenusa del triángulo, la potencia real el cateto adyacente y la potencia reactiva el cate opuesto. El ángulo θ es positivo o negativo según la carga.

D. - POTENCIA COMPLEJA. -

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

El triángulo de potencias sugiere que puede expresarse la potencia aparente como una potencia compleja cuya parte real sea la potencia activa P y la parte imaginaria sea la potencia reactiva Q.

Hagamos:

$$\mathbf{W} = V e^{j\alpha} \quad \mathbf{I} = I e^{j(\alpha + \Theta)}$$

$$S = \mathbf{W} \mathbf{I}^*$$

$$S = V I e^{-j\Theta}$$

$$S = V I (\cos \Theta - j \sin \Theta)$$

$$S = VI \cos \Theta - j VI \sin \Theta$$

$$S = P - jQ$$

La potencia aparente tiene siempre el ángulo de la impedancia de carga, -- de ahí que la potencia aparente se obtenga con el conjugado de la corriente.

El módulo de S es la magnitud de la potencia aparente; un ángulo de fase en adelante implica una potencia reactiva adelantada y viceversa.

Concluyendo:

$$P = VI \cos \Theta = \operatorname{Re}(\mathbf{W} \mathbf{I}^*) = R I^2 = V_R^2 / R$$

$$Q = VI \sin \Theta = \operatorname{Im}(\mathbf{W} \mathbf{I}^*) = X I^2 = V_X^2 / X$$

$$S = VI = \mathbf{W} \mathbf{I} = Z I^2 = V^2 / Z$$

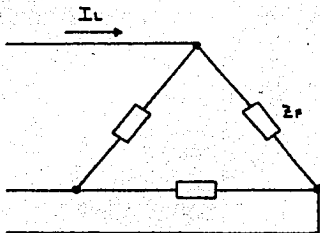
$$\text{Factor de potencia} = f.p. = \cos \Theta = R / Z = P / S$$

E. - POTENCIA EN CARGAS TRIFASICAS EQUILIBRADAS. -

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La potencia de cada fase en un circuito trifásico con cargas equilibradas será siempre un tercio del total y dependerá de la conexión de las -- cargas.

Para un circuito conectado en DELTA tenemos:



$$P_f = V_l I_f \cos \theta$$

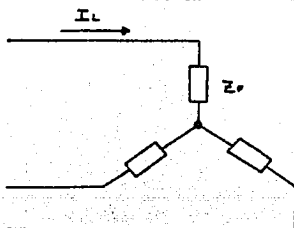
$$P_t = 3 V_l I_f \cos \theta$$

$$I_f = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$$

por lo tanto

$$P_t = \sqrt{3} V_l I_L \cos \theta$$

Para un circuito conectado en ESTRELLA:



$$P_f = V_f I_f \cos \theta$$

$$P_t = 3 V_f I_f \cos \theta$$

$$V_f = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

por lo tanto

$$P_t = \sqrt{3} V_l I_l \cos \theta$$

Es decir, la potencia real total en cualquier carga trifásica, está dada por la expresión $P_t = 3 V_l I_l \cos \theta$ siendo θ el ángulo de la impedancia de cada fase.

Con el mismo razonamiento encontramos que para cualquier circuito trifásico con carga balanceada, sin importar su conexión las potencias totales son:

$$S_t = \sqrt{3} V_l I_l$$

$$Q_t = \sqrt{3} V_l I_l \sin \theta$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO 3

EFFECTOS DE LA POTENCIA REACTIVA SOBRE EL VOLTAJE DEL SISTEMA.

A. - CARACTERISTICAS DE LA CARGA. -

Nos referimos como 'carga' al conjunto de dispositivos que toman -- energía de la red; los sistemas de potencia, se diseñan de tal manera que sean capaces de alimentar todas las posibles cargas.

Para lograr una capacidad de suministro adecuada, es necesario conocer el tamaño, la simetría, la constancia y el ciclo de demanda de las cargas. Esto no es posible con exactitud debido a que, aunque las cargas industriales -- tienen un comportamiento muy específico, las cargas domésticas (monofásicas) son totalmente aleatorias. Sin embargo, es posible obtener un patrón-promedio en los transformadores de distribución y llegar con esto a una situación casi predecible.

Existen tres aspectos que facilitan mucho la caracterización de las -- cargas:

1) A pesar de que las cargas son variables en el tiempo, las variaciones -- son relativamente lentas, comparadas con las constantes de tiempo del --

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

sistema de distribución; esto permite considerar una operación en estado estable (cuasiestática).

2) La carga típica es siempre simétrica, ya sea por el diseño trifásico balanceado de las máquinas o por la alimentación balanceadamente distribuida para las cargas monofásicas.

3) La carga típica tiene un consumo considerable de potencia reactiva. Esto se debe a que los motores (que representan carga inductiva a menos -- que estén sobreexcitados) forman un alto porcentaje de la carga total.

Por otra parte, debe tomarse en cuenta que una serie de elementos del sistema mismo (como los transformadores) son consumidores de potencia -- reactiva.

Dentro de los sistemas de potencia, la alimentación de las diferentes cargas se lleva a cabo manteniendo constantes el voltaje y la frecuencia; - los valores de estas variables están directamente relacionados con los flujos de potencia real y reactiva.

B. - LA POTENCIA REAL Y LA FRECUENCIA DEL SISTEMA. -

La frecuencia del sistema debe mantenerse dentro de fluctuaciones del orden de 60 ± 0.02 Hz, debido a que es mucho más fácil controlar el sistema con variaciones de frecuencia pequeños y a que la mayoría de los motores que forman la carga tienen velocidades directamente proporcionales a la frecuencia.

La frecuencia de la red está íntimamente ligada con el balance de potencia real en el sistema. Los generadores operan de manera síncrona, generan

do la potencia demandada en cada momento.

Una vez que un generador se sincroniza con la red, las fuerzas electromecánicas creadas en la máquina, le forzan a operar a la velocidad y frecuencia del sistema y permiten controlar la generación de potencia real manipulando el par motriz de su primotor.

Si se aumenta dicho par, el generador tiende a acelerarse; sin embargo, su velocidad está ligada a la del resto de la red y lo que sucede es que el ángulo de operación se abre unos cuantos grados incrementando con ello la corriente y la potencia entregadas.

El incremento de corriente crea un par de desaceleración que compensa el aumento de velocidad en la máquina; esto constituye un mecanismo de balance en cada generador, si todos los generadores tuvieran un balance de par-mecánico perfecto, la velocidad y por tanto la frecuencia se mantendrían -- constantes al igual que el balance de potencia real. Sin embargo, las fluctuaciones en la carga son impredecibles y ocasionan cambios en la frecuencia. Por ejemplo si disminuye la carga y se mantiene constante el par de las máquinas, la frecuencia tiende a elevarse en toda la red. Los motores alimentados por la red experimentan por tanto un aumento de velocidad y de mandan mayor potencia ($P = \text{RPM} \times \text{Par}$); este incremento de carga balanceará el anterior decremento y la frecuencia se nivelará a un nuevo valor -- más alto que el original.

De los puntos anteriores es claro que la frecuencia es realmente un indicador de la demanda de la potencia real del sistema.

C. - POTENCIA REACTIVA ABSORBIDA POR LA CARGA.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El voltaje de las barras del sistema depende del consumo de potencia reactiva por parte de la carga y los elementos de la red. El factor de potencia natural de la carga total del sistema es aproximadamente de 70%, que corresponde a un ángulo de fase entre voltaje y corriente de 45° y por tanto, a un consumo de potencia reactiva igual al de potencia real.

En México, las tarifas eléctricas hacen conveniente para los grandes consumidores trabajar con un factor de potencia de un 85% mínimo, para lo cual deben producir una parte de su consumo reactivo; sin embargo, la potencia reactiva que debe suministrarse a la carga con un factor de potencia de 85% es de aproximadamente 50% de la potencia real (activa).

Por otra parte, algunos elementos del sistema mismo consumen potencia reactiva:

- Los transformadores consumen permanentemente potencia reactiva magnetizante, que, en los transformadores de distribución puede ser de hasta el 5% de su potencia nominal. Además, absorben una potencia reactiva proporcional al cuadrado de la corriente que circula por sus devanados.

- Las líneas de transmisión absorben potencia reactiva proporcional al cuadrado de la corriente que circula por ellas (debido a su reactancia longitudinal) pero al mismo tiempo producen potencia reactiva debido a su capacitancia transversal.

Ambos fenómenos se compensan cuando la carga que circula por la línea es igual a su potencia característica $P_c = V^2 / Z_c$

donde:

P_c = potencia característica trifásica

V = voltaje entre hilos

Z_c = impedancia característica ($\sqrt{L/C}$)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

L = inductancia por fase

C = capacitancia al neutro

A las horas de carga pico, las líneas aéreas transmiten potencias superiores a su potencia característica y constituyen consumidores de potencia reactiva.

Los cables subterráneos de las redes de transmisión y distribución primaria conducen potencias menores a su potencia característica, debido a las limitaciones térmicas y se comportan siempre como productores de potencia reactiva.

Como consecuencia de todas las demandas enumeradas, la potencia reactiva varía a lo largo del día, pero lo hace en menor grado que la potencia real. Esto se debe fundamentalmente a dos razones:

- 1) El par mecánico aplicado a los motores eléctricos puede variar considerablemente sin que la potencia reactiva absorbida por el motor varíe mucho.
- 2) La excitación de los transformadores de distribución consume una cantidad prácticamente constante de potencia reactiva durante todo el día.

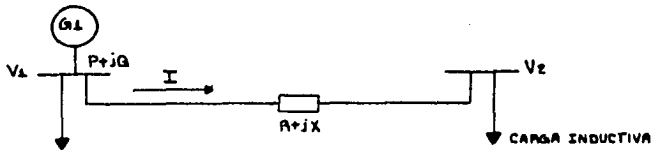
El máximo de la potencia reactiva absorbida por el sistema en un día coincide generalmente con el máximo de potencia real demandada y corresponde a la suma de potencia reactiva absorbida por los consumidores y por los transformadores de distribución.

Por otro lado, la red de transmisión produce potencia reactiva a las horas de baja carga, ocasionando elevaciones en el voltaje y consume reactivos durante las horas de carga máxima.

D- EFECTOS DE LA POTENCIA REACTIVA SOBRE EL VOLTAJE DEL SISTEMA. -

TESIS CON 30
FALLA DE ORIGEN

Consideremos el siguiente sistema:

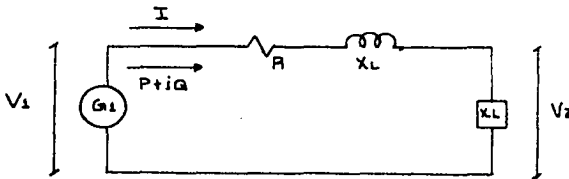


El generador conectado a la barra 1 debe suministrar la potencia real requerida por la resistencia de los conductores y la potencia reactiva requerida por la inductancia de la línea y de la carga.

Para facilitar el análisis del circuito, estamos considerando una carga inductiva pura que provocará una corriente atrasada 90° respecto al voltaje de la barra 1 que tomamos como referencia.

Dicha corriente provocará una caída de tensión en la impedancia de la línea. El voltaje de la barra 1, que se mantiene constante controlando el campo magnético del generador, será igual a la suma de la caída de tensión en la línea más el voltaje de la barra 2 (fasorialmente).

El circuito monofásico equivalente de dicho sistema sería:



y podría representar también un transformador si se desprecia la corriente de excitación, o una línea de transmisión corta donde se desprecia la capacitancia transversal.

Si en el circuito despreciamos la resistencia de la línea podemos tener:

$$V_2 = V_1 - IZ = V_1 - jX$$

La corriente de línea satisface aproximadamente la relación:

$$V_1 I^* = P + jQ$$

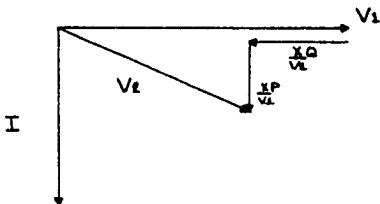
por lo tanto

$$I = \frac{P - jQ}{V_1^*} = \frac{P - jQ}{V_1}$$

debido a que el voltaje V_1 es nuestra referencia.

$$V_2 = V_1 - \frac{P - jQ}{V_1} jX = V_1 - \frac{X}{V_1} Q - j \frac{X}{V_1} P$$

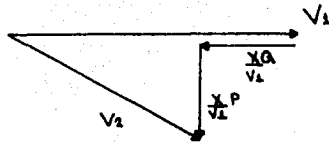
En esta última ecuación, las caídas de voltaje en la línea se han expresado en función de los flujos de potencias real y reactiva que circulan por ella. El diagrama fasorial correspondiente sería como sigue:



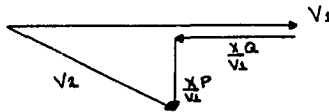
Analicemos que sucede variando los flujos de potencias real y reactiva en la misma proporción:

1) Crece jXP/V_1

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



2) Crece XQ/V_1



3) Decrece XP/V_1



4) Decrece XQ/V_1



De los diagramas puede observarse que:

• Un cambio en la potencia real provoca una variación poco apreciable en la magnitud del voltaje V_2 pero altera notablemente el ángulo δ entre V_1 y V_2 .

• Un cambio en la potencia reactiva afecta la magnitud del voltaje V_2 en --

forma directamente proporcional, disminuyéndolo o aumentándolo de manera crítica.

Estas conclusiones son válidas para sistemas con cargas compuestas como los encontrados en la realidad.

Es importante recalcar el caso en que hablamos de una disminución en la demanda de reactivos. Durante las horas de la madrugada en que la carga es muy ligera, se presentan aumentos en el flujo de potencia reactiva debidos a la capacitancia transversal de líneas y cables de la red. El flujo de potencia reactiva invierte su dirección y provoca un aumento de voltaje en lugar de una caída. Dichas elevaciones deben controlarse por medio de elementos que demanden reactivos.

E. - REGULACION DEL VOLTAJE MEDIANTE LA POTENCIA REACTIVA. -

En las líneas de alta tensión y en los transformadores, la resistencia (R) es pequeña comparada con la reactancia inductiva (jX), por tanto, la variación del módulo del voltaje y en consecuencia la regulación de voltaje en el sistema se debe principalmente a la transmisión de potencia reactiva, mientras que la variación del ángulo de fase del voltaje se debe a la transmisión de potencia real.

Generalizando podemos afirmar, que la potencia real fluye siempre de la barra cuyo voltaje tenga un ángulo más grande hacia aquella donde el ángulo sea más pequeño; por su parte, la potencia reactiva fluye del punto de mayor al de menor voltaje.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

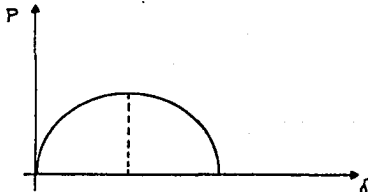
Cuando hablamos de las características de las cargas, se dijo que los sistemas de potencia alimentan las cargas con un voltaje y frecuencia constantes.

En general, el ángulo de fase δ entre los voltajes, no afecta al funcionamiento del sistema siempre que se mantenga dentro de los límites de estabilidad:

La potencia real transferida de una barra a otra a través de una línea en que sólo se considera una reactancia, está dada por la relación:

$$P = \frac{|V_1| \cdot |V_2|}{X} \text{ Sen } \delta$$

graficando obtenemos



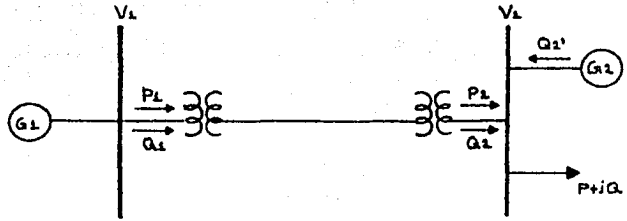
La máxima transferencia de potencia real se tiene cuando $\delta = 90^\circ$ y es el punto límite para una operación estable del sistema. Si el ángulo fuera mayor de 90° el sistema entraría en oscilación, de ahí que usualmente se procure tener un ángulo δ pequeño.

En la práctica, para reducir la reactancia (de la línea) y aumentar la potencia transmitida, se colocan dos líneas en paralelo.

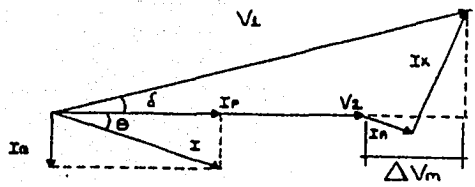
Por otra parte, la variación del módulo del voltaje, producida por las variaciones de carga, debe limitarse a valores pequeños para no afectar la operación de los aparatos eléctricos conectados al sistema.

Esto se consigue reduciendo al mínimo la transmisión de potencia activa por la red.

Consideremos el siguiente diagrama unifilar:



La diferencia entre los voltajes de las barras está dada por:



$$V_1 - V_2 = \Delta V_m = RI \cos \theta + XI \sin \theta$$

$$I \cos \theta = I_p = P_2 / V_2$$

$$I \sin \theta = I_q = Q_2 / V_2$$

$$V_1 - V_2 = \frac{R P^2 + X Q^2}{V_2}$$

donde R es la suma de las resistencias de la línea y los transformadores y X, la suma de las reactancias de la línea y los transformadores.

Despejando Q_2 tenemos:

$$Q_2 = \frac{V_2 (V_1 - V_2)}{X} - \frac{R P_2}{X}$$

El voltaje V_1 se mantiene constante mediante la regulación del generador.

El voltaje V_2 , puede mantenerse constante cuando varía la potencia real P_2 , controlando la potencia reactiva en ese punto, de forma que:

$$Q_2 = K - \frac{R P_2}{X}$$

Este control de Q_2 se realiza variando la potencia reactiva inyectada en el punto de recepción.

Si toda la potencia reactiva requerida por el sistema y los consumidores se produjese mediante los generadores, estos tendrían que producir -- igual cantidad de potencias real y reactiva, las líneas de transmisión y los transformadores deberían sobredimensionarse, las pérdidas totales del -- sistema serían del doble y las caídas de voltaje en las líneas aéreas y en -- los transformadores se deberían principalmente a la circulación de potencia reactiva.

Todo lo anterior hace evidente la conveniencia de evitar al máximo la -- transmisión de potencia reactiva y el hecho de que esta debe producirse en el lugar más próximo a donde se va a consumir.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO 4

FUENTES DE POTENCIA REACTIVA Y LAS VENTAJAS DE LOS CAPACITORES.

Existen básicamente dos métodos de compensación de reactivos:

A. - Uso de máquinas síncronas

B. - Instalación de bancos de capacitores

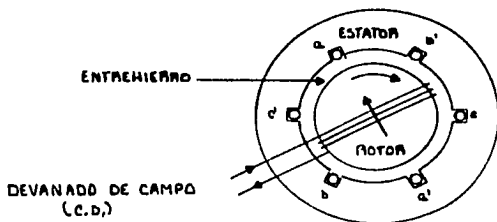
El segundo método tiene, entre otras ventajas que se mencionarán más adelante, la de suministrar un flujo LOCAL de reactivos. Este hecho, como se vió en el capítulo anterior, es lo más conveniente para conseguir una adecuada regulación de voltaje evitando sobrecargar las líneas.

A. - USO DE MAQUINAS SINCRONAS. -

La estructura y principio de operación de los generadores y motores síncronos, son básicamente los mismos, por lo que analizaremos aquí únicamente lo que sucede con los generadores.

La siguiente figura muestra un generador trifásico de c.a. elemental: aplicando una excitación de corriente directa al devanado de campo, se crea un flujo magnético. Por medio de un primotor (turbinas de agua o vapor), se hace girar el rotor sobre el cual se encuentra el devanado, consiguiendo que el campo magnético gire.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



De acuerdo con la Ley de Faraday:

$$V = N \frac{d\phi}{dt}$$

esa variación de flujo inducirá un voltaje en las bobinas a, b y c de la armadura (estator). Por estar dichas bobinas desplazadas 120° entre sí, se obtiene en sus terminales un voltaje senoidal bastante puro.

Analicemos una sola fase llamando E_g al voltaje generado sin carga.

Cuando se conecta una carga al generador, comienza a fluir una corriente; el voltaje terminal de la máquina puede disminuir o aumentar dependiendo del tipo de carga.

Tres factores controlan la tendencia de la máquina a ganar o perder voltaje:

1. - La resistencia del devanado de armadura
2. - La reactancia del devanado de armadura
3. - La reacción de armadura

Los dos primeros factores implican siempre una caída de tensión en fase y en cuadratura con la corriente respectivamente, sin importar el factor de potencia de la carga. Por lo tanto, es la reacción de armadura básicamente el factor que decide el efecto en el voltaje.

Al fluir la corriente en el devanado de armadura se crea un flujo magnético que reacciona con el flujo principal reduciéndolo o aumentándolo. Este

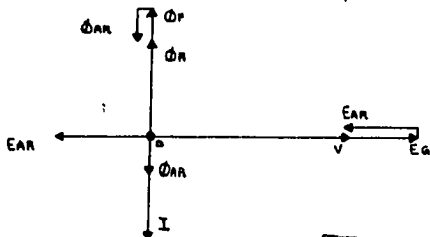
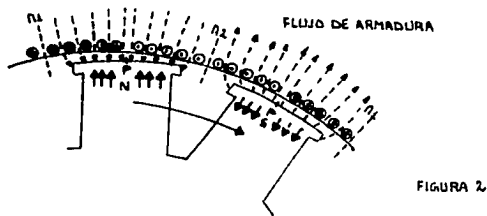
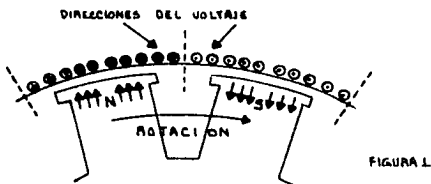
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

cambio en el flujo resultante implica una caída o un aumento en el voltaje terminal de la máquina.

Analicemos dos casos:

°Factor de potencia 0 atrasado (carga inductiva pura). -

Si se asumen las direcciones de rotación del generador y de los voltajes que muestra la figura 1, tendremos que para un factor de potencia - 0 (-) las corrientes en la armadura tendrán las mismas direcciones que se indican para los voltajes, después de que los polos se hayan movido 90°; es decir:

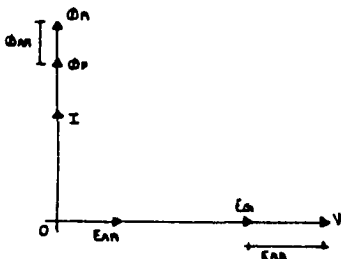
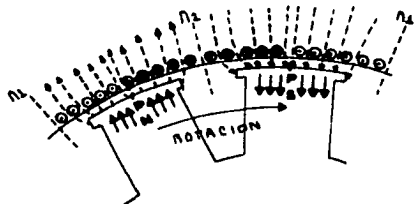


TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Analizando la figura 2 con la regla de la mano derecha y suponiendo que los conductores forman una espiral alrededor del punto P, se encuentra que el flujo en la armadura se opone al flujo principal y tiende a reducirlo (proporcionalmente a la corriente de armadura), siempre que el hierro no esté saturado. Esto provoca consecuentemente una reducción del voltaje terminal del generador.

°Factor de potencia 0 adelantado (carga capacitiva pura).-

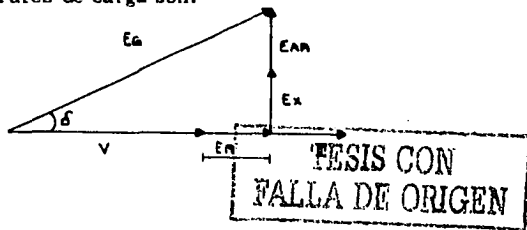
En este caso, las corrientes tendrán las mismas direcciones de los voltajes cuando los polos estén 90° eléctricos adelante.



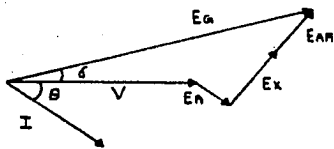
Siguiendo el mismo razonamiento que en el caso anterior hallamos que el flujo principal se suma con el flujo de armadura aumentando con ello el voltaje terminal de la máquina.

Los diagramas fasoriales completos de un generador, correspondientes a los tres tipos generales de carga son:

CARGA RESISTIVA

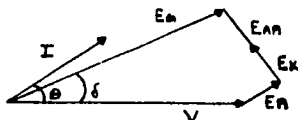


TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



CARGA CAPACITIVA-RESISTIVA

CARGA INDUCTIVA-RESISTIVA



- donde: E_r - caída de voltaje en la resistencia de armadura
 E_x - " " " reactancia "
 E_{ar} - efecto de reacción de armadura
 E_g - voltaje terminal del generador sin carga
 V - voltaje terminal

De los diagramas fasoriales podemos obtener:

$$V = E_g - I_a (R_a + j (X_a + X_{ar}))$$

debe notarse, que el voltaje generado sin carga, siempre adelanta al voltaje terminal.

Analicemos ahora lo que sucede con los generadores usados en grandes sistemas de potencia; el voltaje terminal de dichas máquinas debe mantenerse constante para no afectar a los consumidores.

El generador proporciona potencia real debido a la fuerza o movimiento de su primotor. Por ejemplo, en el caso de una turbina, la cantidad de agua impulsora tendrá efecto directo sobre la cantidad de potencia real entregada por la máquina. Por otra parte, la excitación de campo del generador es quien regula la producción de reactivos.

Un generador puede operarse de modo que proporcione únicamente potencia real; esto es, la máquina puede trabajar con un factor de potencia igual

a 1, aunque la carga tenga un factor de potencia distinto siempre y cuando los reactivos demandados por la carga sean suministrados por otra fuente (ya sea capacitores o algún otro generador del sistema).

Supongamos un generador conectado a través de una línea a una carga en la que debe mantenerse un voltaje constante. Si los reactivos demandados por la carga aumentan manteniéndose la fuerza del primotor de generador constante, el voltaje comienza a caer. De acuerdo con la relación $V = N \frac{d\phi}{dt}$ es posible mantener el valor del voltaje aumentando la cantidad de flujo magnético; esto se logra sobreexcitando el campo del generador.

El aumento en el campo provocará un flujo de reactivos, sin afectar la potencia real, de manera que se compense la pérdida de voltaje.

En condiciones de sobreexcitación tan o generadores como motores, pueden considerarse suministrando corriente en atraso al sistema; actúan como -- circuitos capacitivos proporcionando potencia reactiva a través de las líneas. Cuando disminuye la carga (como en las horas de madrugada) es necesaria -- rrio subexcitar las máquinas ya que comienzan a comportarse como circuitos inductivos absorbiendo la potencia reactiva suministrada por la capacitancia de las líneas

En los sistemas de potencia, los generadores se usan para producir un mínimo de reactivos, a fin de no sobrecargarlos.

Los motores pueden usarse para producir trabajo mecánico o reactivos (si son sobreexcitados), pero aunque pueden ayudar a mejorar el factor de potencia, no constituyen una forma de compensación fácilmente controlable. Existen otros motores síncronos diseñados exclusivamente para actuar co-

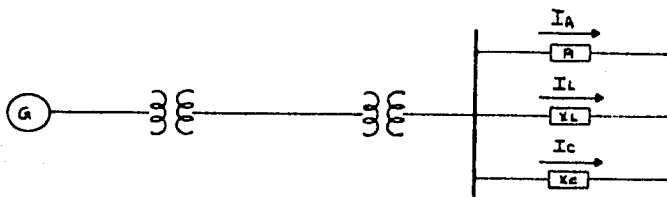
mo productores de reactivos; nunca se usan para trabajo mecánico y suelen ser de gran tamaño y gran capacidad para proporcionar potencia reactiva ya sea capacitiva o inductiva. Estos motores se conocen como capacitores síncronos, mejoran la estabilidad de las líneas de transmisión en regímenes transitorios, pero implican una inversión inicial muy grande y un mantenimiento bastante costoso.

Los motores síncronos que proporcionan movimiento y reactivos son muy usados en la industria cementera.

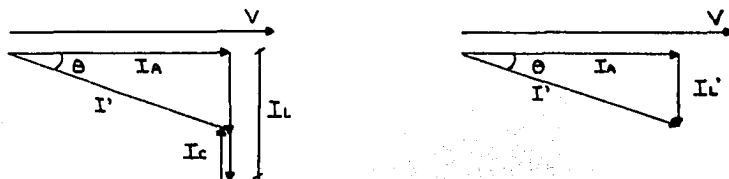
B. - INSTALACION DE BANCOS DE CAPACITORES. -

Los capacitores de potencia constituyen una forma sencilla y económica de producir potencia reactiva y mejorar el factor de potencia del sistema. Estos capacitores conectados en paralelo a un equipo especial o a la carga que supone una instalación industrial, representan una carga reactiva que toma corrientes adelantadas 90° al voltaje. Dichas corrientes tienen una fase opuesta a las corrientes reactivas de tipo inductivo y por ello, reducen la corriente reactiva total que consume la instalación.

Consideremos el siguiente diagrama unifilar:



X_c representa la reactancia del banco de capacitores instalado en paralelo con la carga. El diagrama fasorial sería:

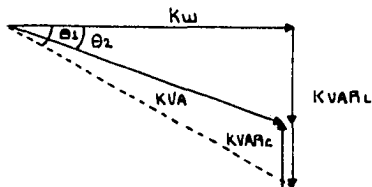


La presencia de I_c disminuye notablemente a I y por tanto a la corriente total I , aunque esta siga siendo de tipo inductivo.

Físicamente, no se anulan ni la corriente capacitiva, ni una parte de la corriente inductiva, lo que sucede es que ahora la corriente $I - I' = I_c$ fluye del banco de capacitores en lugar de ser enviada por la línea, es decir se inyecta localmente.

Aumentando la reactancia capacitiva (es decir, la potencia del banco), el ángulo θ puede disminuirse tanto como se desee aumentando con ello el factor de potencia.

Estas observaciones pueden trasladarse al triángulo de potencias:



Si se conoce para una determinada instalación industrial la potencia activa consumida y el factor de potencia de operación, es fácil determinar la poten

cia del banco de capacitores que es necesario instalar para aumentar el factor de potencia a un nuevo valor $\text{Cos } \Theta_2$. De la figura anterior:

$$\text{KVAR} = \text{KW} (\text{Tg } \Theta_1 - \text{Tg } \Theta_2)$$

Si el banco de capacitores se instala del lado de baja tensión de los transformadores, se consigue un aumento en la capacidad de carga, debido al nuevo factor de potencia. Si denominamos KVA a la capacidad total del transformador, dicho incremento puede calcularse como sigue:

$$\text{KW } 2 - \text{KW } 1 = \text{KVA} (\text{Cos } \Theta_2 - \text{Cos } \Theta_1)$$

Expresado en porcentaje de la capacidad total tenemos:

$$\text{KW} = 100 ((\text{Cos } \Theta_2 / \text{Cos } \Theta_1) - 1) \%$$

Si el transformador está sobrecargado en un valor ΔKVA y se quiere corregir este hecho mejorando el factor de potencia, puede calcularse la potencia reactiva requerida a partir de los factores de potencia con y sin sobrecarga:

$$\text{Cos } \Theta_1 = \frac{\text{KW}}{\text{KVA} + \Delta \text{KVA}} \qquad \text{Cos } \Theta_2 = \frac{\text{KW}}{\text{KVA}}$$

$$\text{KVAR} = \text{KW} (\text{Tg } \Theta_1 - \text{Tg } \Theta_2)$$

Lo mismo puede hacerse en el caso de generadores con una capacidad expresada en KVA.

La instalación de bancos de capacitores ayuda también a reducir las pérdidas por efecto Joule en las líneas que van de los generadores al punto donde están instalados los capacitores. Dichas pérdidas se deben tanto a las corrientes activas como a las reactivas y son iguales a:



 TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

$$\text{Pérdidas} = R I_a^2 + R I_l^2$$

donde: R = resistencia óhmica total de una instalación industrial

Si consideramos que el voltaje y la demanda de potencia activa no varían - apreciablemente después de la corrección del factor de potencia mediante - la instalación de bancos de capacitores, podemos cuantificar la disminu - ción de pérdidas por efecto Joule con la siguiente relación:

$$-\Delta \text{Pérdidas} = 100 (1 - (\cos \theta_1 / \cos \theta_2)^2) \%$$

Esta ecuación se obtiene a partir de las corrientes de cada factor de poten - cía y considerando que la potencia activa no cambia.

Puede demostrarse que el paso de un factor de potencia de 70% (f.p. - natural de la carga) a otro de 85% (valor mínimo de operación sin sanción - económica), produce una disminución de 30% en las pérdidas.

Por último, los capacitores son usados para regular el voltaje de opera - ción. En el capítulo anterior se comprobó que el voltaje podía controlarse - manipulando el flujo de reactivos por la línea, los capacitores proporcio - nan flujos locales de reactivos cuando se conectan en paralelo con las cargas y contribuyen a disminuir la caída de tensión en la línea cuando se conec - tan en serie con esta.

El uso de los capacitores de potencia como fuentes de reactivos, impli - ca grandes ventajas: - Bajo costo por KVAR instalado - Fácil manejo --
- Mantenimiento económico, sencillo y mínimo.

Los bancos de capacitores ofrecen el mismo grado de seguridad de funcio - namiento que los otros métodos de producción de potencia reactiva; pueden - proporcionar la potencia necesaria, instalándose en bancos fijos, desconec -

tables o combinados.

Todos estos factores han logrado la enorme aceptación de los capacitores de potencia en los sistemas de distribución y consumo de energía eléctrica y el aumento constante de su demanda.

C. - EJEMPLO PRACTICO. -

Los siguientes diagramas corresponden a la red de voltaje de 23KV de la subestación Remedios. Los pequeños cuadros que aparecen conectados a las barras son precisamente bancos de capacitores de diferentes potencias.

Analizando el primer diagrama, encontramos un voltaje en la barra inferior de 22.3KV. La potencia leída en el transformador reductor es de 35.2 MVA, 31.9 MW y 15.4 MVARs; dicha potencia es enviada hacia la subestación a través de la red de transmisión desde las plantas generadoras.

Como demostramos anteriormente el flujo de reactivos por las líneas provoca pérdidas de energía y sobrecarga del equipo. De manera local, con la conexión de un banco de capacitores, podemos suministrar una parte de dicha potencia reactiva y aumentar con ello el voltaje de la barra.

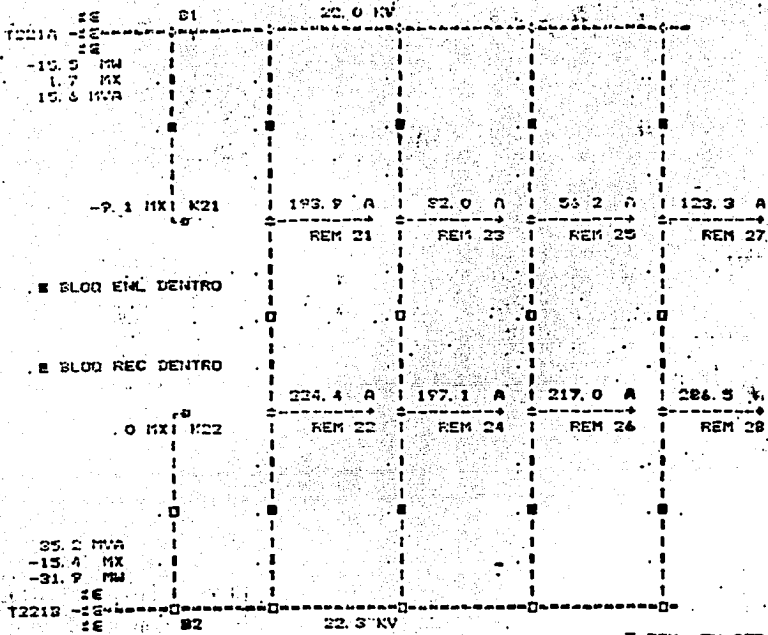
En el primer diagrama, el cuadro en blanco de la parte inferior representa un banco de capacitores desconectado. En el segundo diagrama, el mismo cuadro oscurecido, indica la conexión del banco. El efecto de dicha operación se refleja de inmediato en un aumento en el voltaje de la barra, hasta 23.2 KV. Además, el flujo de potencia reactiva se ha reducido significativamente (más del 50%) por la potencia suministrada localmente (8.2KVAR).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

MD 3 HORA 10:58:17
 AL FECHA 9/ 3/85

REPETIDOS 23 KV (REM)

PAG 58/5



T. REM: EN-SER
 CONTR: REMOTO

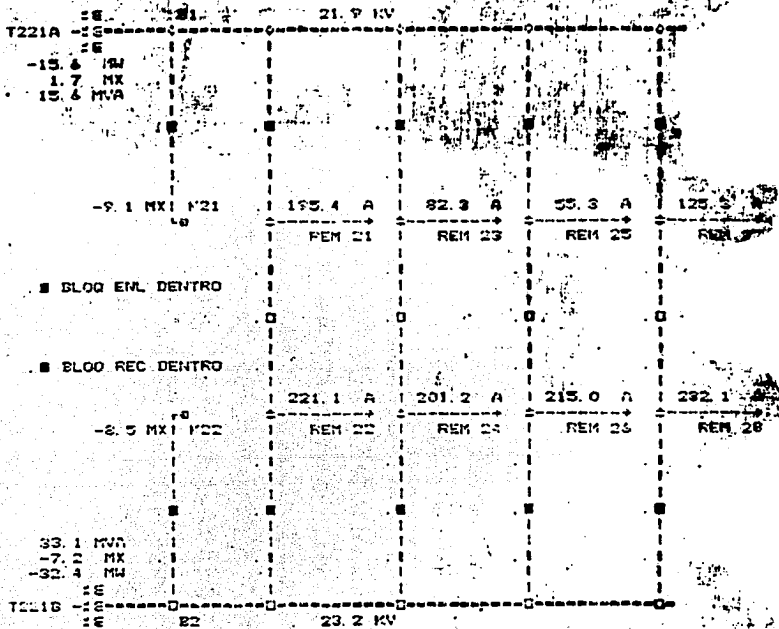
INT 23KV NORMAL

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

MD 3 HORA 10.55
AL FECHA 17/07

REMEDIOS 23 KV (REM)

PAG 23



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Las variaciones de las potencias aparente y real, no son de consideración.

Este ejemplo, obtenido en tiempo y operación reales, es la mejor prueba del efecto de los reactivos en el voltaje del sistema.

D.- CONSIDERACIONES PRACTICAS.-

Mientras las redes de transmisión no se desarrollaron, la producción de potencia reactiva se realizó exclusivamente con los generadores. A medida que dichas redes se extendieron, se instalaron condensadores -- síncronos en diferentes puntos del sistema para ayudar a la regulación del voltaje y a mejorar la estabilidad transitoria del sistema. Posteriormente el perfeccionamiento de los capacitores permitió que su uso se extendiera -- como fuentes de potencia reactiva sumamente económicas.

La repartición óptima de la producción de reactivos entre los 3 medios citados, se logra mediante consideraciones económicas y técnicas; en general -- podemos decir que existen las siguientes reglas básicas para la producción de potencia reactiva:

I- La mayor parte de reactivos debe obtenerse conectando bancos de capacitores en derivación en el sistema de distribución.

II- Unos cuantos de estos bancos deben conectarse permanentemente, pero la mayor parte debe desconectarse a las horas de baja carga.

La capacidad total de los bancos fijos debe ser menor que la carga reactiva mínima, ya que en horas de poca carga la red de transmisión produce -- reactivos y el voltaje puede elevarse en exceso.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

III. - Los generadores sólo deben proporcionar a las horas de mayor carga los reactivos demandados por los transformadores de la misma planta generadora.

IV. - Los capacitores síncronos se justifican sólo en los puntos donde, según la hora del día se necesite producir o absorber potencia reactiva, en algunos casos para resolver problemas de estabilidad y en aplicaciones muy grandes como en el caso de las cementeras.

V. - A las horas de baja carga, puede requerirse usar reactores desconectables para absorber parte de los reactivos producidos por las líneas de transmisión.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

DETERMINACION DE LAS NECESIDADES DE POTENCIA REACTIVA EN
UNA INSTALACION ELECTRICA.

A. - DETERMINACION DEL FACTOR DE POTENCIA DE UNA INSTALACION. -

Existen varios métodos, todos ellos muy sencillo, para determinar el factor de potencia de una instalación industrial cualquiera. A continuación se describen brevemente.

1) Con un indicador del factor de potencia. -

Es el método más elemental y permite medir simultáneamente el $\cos \theta$ y los kilowatts consumidos a plena carga. Con estos valores, es posible calcular los KVARs capacitivos requeridos.

2) Con un registrador de potencia activa y uno de potencia reactiva. -

Se determinan los valores de potencias activa y reactiva tomándolos de las cintas registradoras y se calcula el factor de potencia con la siguiente relación:

$$\cos \theta = \frac{KW}{KW^2 + KVAR^2}$$

3) Con un wattmetro, un voltímetro y un amperímetro. -

En condiciones de plena carga se registran los valores de potencia

activa, voltaje entre fases y corriente de fase. Se calcula la potencia aparente en KVA con la ecuación:

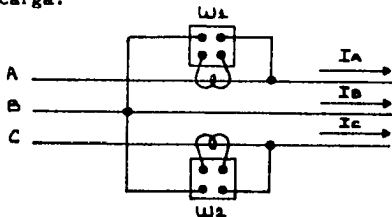
$$KVA = \sqrt{3} KV \times I$$

y con este valor y el de la potencia activa, el factor de potencia está dado por la expresión:

$$\cos \Theta = \frac{KW}{KVA}$$

4) Método de los dos wattmetros. -

Los instrumentos se conectan como muestra la figura y se toman sus lecturas a plena carga.



Con dichos valores se calcula la relación: $K = KW1 / KW2$

que puede ser positiva o negativa según los signos de las potencias.

El factor de potencia se calcula por medio de la expresión:

$$\cos \Theta = \frac{1 + K}{2 \sqrt{1 - K + K^2}}$$

Este método se usa para cargas balanceadas.

5) A través del consumo global de energía. -

El factor de potencia de cualquier instalación industrial varía de -- acuerdo a los equipos instalados en la misma y a los horarios de trabajo.

Por esta razón, las mediciones anteriores se especificaron a plena carga y proporcionan el factor de potencia para ciertas condiciones solamente. Cuando la carga alimentada no está sujeta a grandes alteraciones durante horas de trabajo, puede ser práctico medir el factor de potencia medio, usando los valores de potencias activa y reactiva consumidas por hora durante un mes.

Dicho factor de potencia está definido por la expresión:

$$\cos \Theta = \frac{KWh}{\sqrt{KWh^2 + KVARh^2}}$$

Las magnitudes de KWh y KVARh suelen especificarse en los recibos de la compañía suministradora.

Si las variaciones de carga durante horas de trabajo son considerables y proceden de equipos de distinta naturaleza, puede ser conveniente medir el factor de potencia a plena carga y calcular los KVARs necesarios bajo las mismas condiciones. Los métodos antes mencionados son adecuados en ese caso.

6) Con un contador de energía activa y uno de energía reactiva. -

En condiciones de plena carga, se hace una lectura simultánea de los instrumentos durante un cierto tiempo. El factor de potencia se determina con la expresión:

$$\cos \Theta = \frac{KW}{\sqrt{KW^2 + KVAR^2}}$$

Donde los valores de las potencias se obtienen dividiendo la lectura entre el tiempo durante el que se tomó.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

B. - CALCULO DE LA POTENCIA REACTIVA REQUERIDA EN CAPACITORES PARA CORREGIR EL FACTOR DE POTENCIA. -

La potencia del banco de capacitores que es necesario instalar para pasar de un factor de potencia $\cos \theta_1$ a uno $\cos \theta_2$, esta dada por la expresión:

$$KVAR = KW (Tg \theta_1 - Tg \theta_2)$$

dicha relación se obtiene a partir del triángulo de potencias.

Si la carga alimentada no está sujeta a grandes variaciones podemos considerar como $\cos \theta_1$, el factor de potencia medio; el consumo en KW corresponderá al valor del consumo medio que se obtiene al dividir los kilowatts consumidos durante un mes, entre las horas de trabajo mensuales.

El valor del factor de potencia $\cos \theta_2$ al que se desea llegar, debe estimarse algo mayor que el mínimo aceptable por la compañía eléctrica, a fin de poder alcanzar un factor de potencia satisfactorio a plena carga. En la práctica suele corregirse hasta un $\cos \theta_2$ de 90 o 95%.

Cuando la carga está sometida a fluctuaciones grandes, el cálculo para la corrección del factor de potencia utiliza la expresión anterior pero -- sustituyendo como $\cos \theta_1$, el factor de potencia medido a plena carga con -- alguno de los procedimientos antes descritos. El consumo en kilowatts -- responderá al consumo medio a plena carga.

Por ser estas condiciones de cálculo las de carga máxima, el factor de potencia $\cos \theta_2$ a que se debe llegar, puede ser el mínimo permitido por la compañía suministradora.

°Corrección del factor de potencia con un banco de capacitores desconectables. -

En el caso de que las variaciones de carga sean muy severas, es -- conveniente instalar un banco de capacitores parcial o totalmente desconectable, cuya acción sea automática siguiendo las fluctuaciones de demanda de potencia reactiva del sistema.

Para determinar si es necesario un banco de este tipo, puede calcularse el valor que va a tomar el factor de potencia en condiciones de carga mínima suponiendo instalado un banco fijo que corrige el factor al 85% cuando se trabaja a plena carga.

Si el resultado es un factor de potencia considerablemente en adelanto, debe instalarse un banco de secciones desconectables que sea capaz de mantener un factor de potencia aproximado a la unidad en cualquier condición de carga.

Otra alternativa sería, compensar en forma individual cada carga conectándola y desconectándola con sus capacitores correspondientes; sin embargo, esta opción es muy costosa.

C.- DETERMINACION DE LAS NECESIDADES DE REACTIVOS EN EL SISTEMA.-

Hemos analizado la manera de determinar la necesidad de reactivos de una instalación industrial; es interesante ahora, plantear la manera de determinar los reactivos que requiere todo el sistema de suministro eléctrico. La producción total de potencia reactiva por medio de generadores y bancos de capacitores, debe ser igual a la demanda más las pérdidas. Dichas pérdidas varían considerablemente según la distribución de la carga

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

en el sistema y sólo es posible evaluarlas mediante el estudio cuidadoso de flujos de energía.

Una vez que se conocen tanto cargas como pérdidas reactivas, es posible fijar la generación reactiva de cada planta dentro de sus límites de capacidad y estimar entonces la cantidad de capacitores estáticos que deberán -- instalarse así como su distribución en el sistema.

Una vez efectuados los ajustes, es necesario volver a estudiar el flujo de energía, vigilando que no se excedan los límites de las plantas generadoras y verificando las tensiones del sistema para comprobar si el número de -- bancos distribuidos entre las cargas es o no suficiente.

La localización exacta de los bancos de capacitores puede determinarse de acuerdo a la magnitud de las deficiencias de voltaje.

Por último, es necesario efectuar estudios a carga mínima, para -- determinar que proporción de los bancos debe quedar permanentemente -- conectada. Todos los bancos deberán contar con un control de conexión y desconexión adecuado.

CAPITULO 6

SELECCION E INSTALACION DE UN BANCO DE CAPACITORES.

A. - CONSIDERACIONES GENERALES. -

En el capítulo 5 se explicó la manera de calcular los KVAR que es necesario suministrar, según las condiciones del sistema, para obtener un buen factor de potencia. Dichos KVAR son precisamente los que debe tener nuestro banco de capacitores si es la forma de compensación elegida, es decir, dicha magnitud determinará la selección de la capacidad del banco.

Aunque este es el factor más importante para la selección, existen otros detalles a los que debe darse importancia y que dependen de consideraciones de instalación; a continuación se describen brevemente:

1) Ventilación. -

Cada capacitor en operación, se convierte en un generador de calor de cierta importancia; dicha energía calorífica debe disiparse para que la temperatura de operación no sobrepase el valor de diseño y proteger así los dieléctricos de los capacitores que son muy sensibles a las temperaturas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Una operación a temperatura media 10°C superior a la normal, es capaz de disminuir la vida media del capacitor en más de un 70%; sobrecalentamientos mayores disminuyen la vida del capacitor en forma exponencial.

Si el banco se va a instalar al aire libre, el calor puede disiparse por convección natural; esto se logra manteniendo los espacios especificados por los fabricantes entre capacitor y capacitor y colocándolos en bastidores que los eleven del piso, para proveer de una ventilación inferior. En el caso de instalación en un local cerrado o gabinete, además de las precauciones anteriores, debe comprobarse que la temperatura interior durante la operación normal, no sobrepase los límites de diseño. Para garantizar la estabilidad térmica de los capacitores se han establecido valores máximos de temperatura según las normas Nema, Ansi y Connie:

METODO DE MONTAJE	MEDIA EN 24h* ° C	MEDIA ANUAL °C
Capacitor aislado	46	35
Capacitores en hilera	40	25
Capacitores en varias hileras contiguas	35	20
En locales cerrados	35	20

* Media aritmética de lecturas horarias durante las 24 horas del día más caluroso de la localidad.

En el caso de que esas temperaturas se sobrepasen en locales cerrados, debe instalarse un sistema de ventilación forzada.

Usualmente los problemas de ventilación son más críticos en instalaciones en alta tensión que manejan grandes cantidades de energía.

2) Frecuencia y voltaje de operación. -

Los capacitores de potencia fabricados bajo normas americanas, se diseñan para operar a 60 Hz nominalmente; sin embargo, pueden trabajar a una frecuencia más baja (nunca mayor) aunque proporcionando menos potencia reactiva:

$$\text{KVAR suministrados} = (f/60) \text{ KVAR nominales}$$

De igual manera, si los capacitores operan a un voltaje menor a su voltaje nominal, disminuye la potencia reactiva proporcionalmente al cuadrado de la relación de voltajes:

$$\text{KVAR suministrados} = (V \text{ aplicado}/V \text{ nominal})^2 \text{ KVAR nominales}$$

Los capacitores de potencia para alta tensión, usualmente pueden operar a voltajes de hasta 1.1 veces el voltaje nominal, sin problemas en el aislamiento o de estabilidad térmica. Con esto se previenen posibles fluctuaciones de voltaje en las líneas o elevaciones debidas a la operación con baja carga.

Sin embargo, una operación permanente con este sobrevoltaje puede reducir la vida media del capacitor en más del 50%.

3) Corriente nominal de operación. -

La corriente nominal por fase de un capacitor trifásico, puede calcularse con la siguiente expresión:

$$I_n = \text{KVAR capacitor} / \sqrt{3} \text{ KV}_{pp}$$

independientemente de que la conexión interna del capacitor sea delta o es- 67

trella. La corriente que toma un capacitor de potencia es directamente -
proporcional a la frecuencia de operación, a su capacidad y al voltaje apli-
cado entre bornes.

4) Perturbaciones producidas por corrientes armónicas. -

Instalaciones en las que existen hornos metalúrgicos de arco o de --
Inducción, motores que entran y salen de operación constantemente, etc.,
son propicias a generar corrientes armónicas que pueden constituir sobre
corrientes muy considerables para los capacitores de potencia.

En la práctica se presentan armónicas de orden impar. Si $e_3, e_5, e_7 \dots$, --
etc., son los valores eficaces de voltaje de las armónicas medidos en por-
ciento de la onda fundamental, entre los bornes del capacitor se tendrá un -
voltaje de:

$$V = 0.01 V \text{ nominal } (100^2 + e_3^2 + e_5^2 + \dots)^{1/2}$$

y la corriente eficaz total que toma cada capacitor:

$$I = 0.01 I \text{ nominal } (100^2 + 9e_3^2 + 25e_5^2 + \dots)^{1/2}$$

por su parte, la potencia reactiva de operación debido exclusivamente a --
dichas armónicas, se incrementa según la relación:

$$KVAR = 0.01 (3e_3^2 + 5e_5^2 + \dots) \%$$

De acuerdo a las normas CCONIE; NEMA y ANSI, el voltaje total resultan-
te debe ser máximo 100.1 % el voltaje nominal y la sobrecorriente máxima-
permisible debida a la onda de voltaje fundamental y sus armónicas debe ser
del 35 % máximo, de la corriente nominal.

La combinación de ambos factores, no debe provocar un incremento de po-
tencia reactiva de operación, de más del 35% de la potencia nominal.

Un problema de sobrecarga de corriente o potencia provocará la elevación -
de la temperatura, pudiendo llegar incluso, a la deformación del tanque -

del capacitor como consecuencia de las altas presiones internas, debidas a la dilatación del líquido impregnante.

En instalaciones en las que este tipo de perturbaciones se presentan, deben preverse las sobrecorrientes tanto en los capacitores, como en el alambrado y equipo auxiliar. Asimismo, debe tenerse especial cuidado en ventilar o incluso refrigerar el banco y dejar el neutro flotante, en caso de conexión en estrella.

Si el problema de sobrecarga es muy considerable, puede considerarse la desconexión del banco en los períodos de máxima generación de armónicas, o su cambio de emplazamiento para evitar posibles resonancias parciales. Existen casos muy críticos, en que es necesario instalar inductancias de choque en serie con el banco, para evitar el paso a las altas frecuencias.

5) Condiciones anormales de operación. -

Las normas NEMA, CCONIE y ANSI especifican ciertas condiciones anormales que el usuario debe informar al proveedor sobre la operación de los capacitores:

- a. - Exposición a humos o vapores corrosivos.
- b. - " a polvos conductores o explosivos
- c. - " a choques mecánicos o vibraciones
- d. - " a radiaciones de calor diferentes a las solares que provoquen una temperatura de operación mayor a la permisible.
- e. - Montaje que de alguna manera dificulte la ventilación.
- f. - Operación a temperaturas ambiente más altas que la permisible.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- g. - Operación a altitudes superiores a 1800m sobre el nivel del mar.
- h. - Posibles sobrecargas de corriente o potencia debidas a niveles armónicos superiores a los admitidos.
- i. - Cualquier requerimiento fuera de lo común.

B.-FACTORES QUE DETERMINAN LA INSTALACION DE CAPACITORES EN ALTA O BAJA TENSION. -

1. - Factor Económico. -

Desde el punto de vista económico, la instalación de los capacitores en alta tensión es más conveniente; para voltajes de línea de hasta 48Kv, un banco fijo en alta tensión es hasta 10 veces más económico que uno de la misma potencia instalado en baja tensión. Si se trata de bancos desconectables la instalación en alta tensión es 8 veces más económica.

En el caso de instalaciones de bancos de capacitores de gran potencia o para voltajes de línea superiores a 100 KV, el costo se incrementa por KVAR instalado y debido al equipo auxiliar y a los aislamientos necesarios; sin embargo, la instalación en alta tensión es siempre ventajosa económicamente respecto a la instalación en baja tensión.

2. - Factores Técnicos . -

Cuando se pretende corregir el factor de potencia para evitar sanciones económicas por parte de la compañía suministradora, los bancos de capacitores deben instalarse de forma que la corriente reactiva que fluye de estos hacia la carga no pase a través del equipo de medición. Si dicho equipo se encuentra en el lado de baja tensión, los capacitores deben instalarse

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

en ese lado también.

Si se busca aumentar la capacidad de carga de un transformador, los capacitores deben instalarse en el lado del secundario (usualmente baja tensión), para que disminuya la corriente reactiva que pasa a través de la máquina.

En casi de que se quieran disminuir las pérdidas por efecto Joule, los bancos deben instalarse junto a las cargas principales para evitar el paso de corrientes inductivas por los cables. Si las cargas están en baja tensión, ahí deben instalarse los capacitores.

C.- CRITERIOS PARA SELECCIONAR UN BANCO FIJO O DESCONECTABLE

Son muchas las razones que determinan la instalación de bancos de capacitores de secciones desconectables; a continuación se enlistan las más importantes:

°Existen infinidad de equipos cuya demanda de potencia reactiva es muy variable. Los capacitores desconectables pueden suministrar esta potencia cuando sea la mayor demanda, evitando fluctuaciones al sistema y saliendo de operación al disminuir la carga.

°Los capacitores son, como se ha mencionado, un método para mantener la regulación del voltaje, sobre todo a las horas de plena carga. Si los bancos no fueran desconectables, una disminución de la carga ocasionaría sobre voltajes capaces de dañar los equipos eléctricos conectados al sistema, o incluso de sobreexcitar los transformadores causando un flujo excesivo de armónicas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

°Si los bancos se usan para corregir el factor de potencia de los generadores a un valor cercano a la unidad, puede ser necesario desconectarlos en momentos de baja carga para evitar una excitación excesivamente baja en los generadores, que podría reducir el margen de estabilidad del sistema.

°En ocasiones la corriente en adelanto de los capacitores puede llegar a -- provocar pérdidas por efecto Joule considerables, que pueden evitarse desconectando algunas secciones.

°Cuando en el sistema se presentan demandas excesivas y por tanto caídas peligrosas de voltaje, los bancos de secciones desconectables pueden ser -- una solución temporal; después de un apagón prolongado, estos bancos pueden usarse también para provocar sobrevoltajes deliberados por un corto -- tiempo o flujos adicionales de reactivos para el arranque de motores o correcciones extremas en el voltaje y el factor de potencia.

°La instalación de bancos de capacitores desconectables en puntos clave del sistema, permiten según la carga, controlar los flujos de reactivos a través de las líneas, manteniendo el nivel de voltaje.

D.- INSTALACION DE CAPACITORES EN BAJA TENSION. -

Los voltajes estándar de los capacitores de potencia para baja tensión son: 230 o 240 v, 460 o 480 v, 575 o 600 v, con potencias reactivas que varían entre 1 y 50 KVAR. Excepto en casos especiales, estos capacitores se encuentran en el mercado en unidades trifásicas.

1) Conexiones y Equipo Accesorio. -

Normalmente las unidades trifásicas tienen fábrica una conexión inter

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

na en delta y su voltaje nominal corresponde al voltaje entre fases. En el caso de unidades monofásicas, se usa también la conexión delta en bancos de 3 o múltiplos; dicha conexión permite aplicar el máximo voltaje posible sin afectar los dieléctricos.

° Tolerancia de sobrevoltaje. -

Los capacitores pueden soportar hasta 100.1% su voltaje nominal, pero además, en baja tensión, el voltaje nominal de los capacitores excede entre 5 y 10% al voltaje nominal de la línea a la que van a ser conectados; esto se hace para prevenir las elevaciones de voltaje ocasionadas por los mismos capacitores, sobre todo si su potencia es mayor a la adecuada, o por fluctuaciones en el voltaje de la línea.

Si se requiere más de una unidad trifásica, debe usarse una conexión en paralelo entre las unidades necesarias y la carga.

° Características del equipo accesorio. -

Por otra parte, el cableado, los equipos de conexión y desconexión, -- las cuchilla, etc., deben tener una corriente nominal de por lo menos 135% - la corriente nominal del banco dada por la relación:

$$I_{\text{en Fase}} = \frac{Q \text{ total del banco}}{\sqrt{3} V_{\text{nominal}} \times 10^{-3}}$$

Si existe el peligro de corrientes armónicas considerables, el criterio de selección del equipo debe adecuarse a la magnitud de dichas corrientes. Los capacitores para intemperie soportan más sobrecorriente y deben tener un aislamiento de 30KV de nivel básico de impulso.

El voltaje nominal de contactores, cuchillas, fusibles, etc., debe ser el adecuado para el voltaje de la línea a la cual se van a conectar.

° Resistencias de descarga. -

TESIS CON
BARRA DE ORIGEN

Los capacitores de potencia de baja tensión suelen tener resistencias de descarga internas que aseguran que el voltaje entre bornes baja a menos de 50 volts, un minuto después de la desenergización. Si no se cuenta con dichas resistencias, es necesario instalarlas externamente o asegurarse -- de que el capacitor va a funcionar en paralelo con algún equipo a través del cual pueda descargarse adecuadamente.

En el caso de bancos de secciones que entran y salen de operación continuamente deben instalarse resistencias de descarga rápida para evitar daños al capacitor y al equipo auxiliar.

*Cuchillas desconectadoras. -

Si el banco es fijo, las cuchillas deben instalarse de forma que permitan la desenergización para mantenimiento, sin paralizar el resto de la instalación. Si se trata de bancos desconectables, debe planearse la instalación de las cuchillas de forma que permitan desenergizar tanto el banco como los contactores con los que se efectúan las operaciones normales de conexión y desconexión.

*Fusibles. -

Los fusibles deben elegirse con una corriente nominal de por lo menos 165% la corriente de cada capacitor, en caso de protección individual, o de la corriente nominal del banco en caso de protección en grupo.

Para la protección individual del capacitor trifásico es común proteger 2-fases solamente; al proteger en grupo un banco de capacitores, debe instalarse un fusible por fase para prevenir cortocircuitos a tierra.

Existen capacitores con fusibles internos instalados en fábrica.

*Alambrado.

El alambrado debe diseñarse de forma que sean fácilmente desconectables

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

y reemplazables las unidades que lo componen.

°Puesta a tierra del bastidor. -

Aunque la mayor parte de las líneas de campo eléctrico debidas a la carga del capacitor, se cierran dentro del mismo, existe un campo eléctrico hacia el exterior; este hecho convierte al tanque del capacitor en una superficie equipotencial del mismo campo.

Para protección del personal y del mismo equipo, los tanques de los capacitores o el bastidor en que van a instalarse, deben conectarse a tierra.

2) Compensación individual. -

Consiste en instalar los capacitores junto a cada una de las cargas; -- con esta instalación se reducen al mínimo las pérdidas por efecto Joule, se asegura un buen factor de potencia sin importar las condiciones de la carga y pueden operarse la carga y los capacitores con el mismo dispositivo de conexión. Su desventaja es que es muy costoso ya que una parte de los capacitores suele estar siempre fuera de operación.

3) Compensación en grupo. -

Este tipo de compensación no minimiza las pérdidas por efecto Joule pero permite corregir el factor de potencia de la instalación en forma global; con este método se consigue además, aumentar la capacidad de carga activa de los transformadores o mejorar los niveles de voltaje.

Si se trata de cargas no sujetas a fuertes variaciones, pueden compensarse hasta un factor de potencia de un poco más de 85% usando un banco fijo; si la carga es muy variable, es conveniente instalar un banco de capacitores desconectables accionadas con un control automático, que permita a

gir el factor de potencia a un valor próximo a la unidad (+ - 98%) para --
cualquier condición de carga.

4) Compensación mixta. -

Este método de compensación consiste en compensar individualmente los aparatos de gran consumo de potencia e instalar para el resto de la -- carga, un solo banco fijo de secciones desconectables. De esta forma se -- puede prescindir del control automático.

5) Compensación de motores de inducción. -

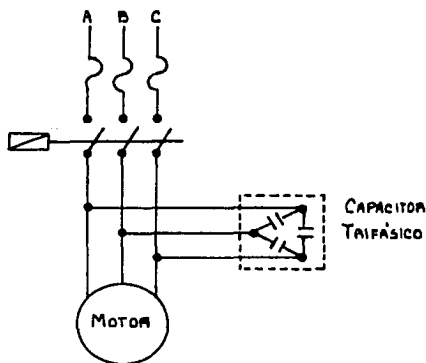
La demanda de potencia reactiva de los motores de inducción varía -- con las condiciones de carga; cuando se compensan individualmente estos -- motores, debe procurarse que la potencia del banco no exceda las necesida -- des de potencia reactiva del motor en la marcha en vacío, esto se debe -- a dos razones: + Si el banco se ajusta para plena carga, se tendrá un exce -- so de potencia reactiva en condiciones de baja carga.

+ Al desconectarse el motor, los capacitores se descargan a través de sus -- devanados; este hecho mantiene el campo magnético en las bobinas del mo -- tor induciendo una tensión de autoexcitación. Si los capacitores están sobre -- dimensionados, dicha tensión crece mucho y puede dañar el aislamiento del motor o incluso los capacitores mismos.

La compensación individual de un motor trifásico de inducción operado con un contactor tripolar, debe efectuarse como indica la figura; con esta conexión no se requieren resistencias de descarga y es suficiente con un lote de fusibles.

Cuando se usan arrancadores estrella-delta, la pérdida de sincronismo entre la tensión residual de los capacitores y la tensión de la carga, puede pro

vocar una autoexcitación del motor y llegar a dañar las bobinas con un sobrevoltaje.



Existen arrancadores que previenen esta situación, pero si fuera necesario -- usar un arrancador convencional, deben tomarse las siguientes precauciones:

- a. - En motores cuya potencia nominal sea inferior a 7.5HP, el arrancador debe conectarse de tal forma que cada fase de los capacitores quede en vacío en el momento del cambio de conexión, manteniendo un cierto potencial en las bobinas del motor. Al desconectarse el motor, las fases de los capacitores vuelven a quedar en vacío y en serie con los arrollamientos del motor por lo que es necesario instalar resistencias de descarga.
- b. - Para motores con una potencia nominal de entre 7.5 y 25 HP pueden instalarse capacitores monofásicos de modo que queden permanentemente en paralelo con un arrollamiento del motor a través del cual pueden descargar se.
- c. - Para potencias superiores a 25 HP, deben conectarse los capacitores -

con un contactor adicional una vez que el arrancador estrella-delta ha pasado a posición delta; con esta conexión son necesarias las resistencias de descarga.

Este tipo de conexión se usa en motores compensados que deben ser frenados con freno de electroimán, como sería el caso de motores de equipo de elevación.

7) Compensación de transformadores. -

Cuando se busca corregir el factor de potencia de un transformador usando capacitores en el lado de baja tensión, deben adquirirse con una potencia reactiva no mayor al 10 % de la potencia nominal del transformador. Esto reduce la posibilidad de resonancia y las pérdidas de energía cuando la máquina funciona en vacío. El banco deberá conectarse a la línea a través de fusibles y con resistencias de descarga, ya que la pérdida de un fusible evitará la descarga a través del transformador.

POTENCIA TRANSFORMADOR KVA	VOLTAJE DE LA LINEA (KV)		
	5/13	15/23	25/34
25	2	2.5	3
50	3.5	5	6
75	5	6	7
100	6	8	10
160	10	12.5	15
250	15	18	22
315	18	20	24
400	20	22.5	28
630	28	32.5	40

Potencia reactiva necesaria en capacitores para compensar transformadores.

Potencia reactiva en KVARs.

E. - INSTALACION DE CAPACITORES EN ALTA TENSION. -

Los voltajes estándar de los capacitores de potencia para alta tensión oscilan entre 2400 y 19920 volts tomando cualquier voltaje nominal entre fase y neutro de las líneas de distribución de hasta 34.5KV.

Las potencias reactivas para las unidades monofásicas son de 50, 100, 150, 200, 300 o 400 KVAR; en el caso de unidades trifásicas la potencia es de hasta 300 KVAR.

1) Conexiones y equipo accesorio. -

Excepto aquellos bancos instalados en líneas de 2400 volts, los bancos de capacitores de alta tensión se conectan en estrella ya sea con neutro conectado a tierra o flotante.

La decisión de dejar el neutro flotante o a tierra depende de las siguientes consideraciones:

a. - Conexión a tierra del sistema. - El sistema puede ser aislado, conectado a tierra en los transformadores de las subestaciones (directamente o a través de una impedancia), o conectado a tierra en múltiples puntos.

Para sistemas aislados con los neutros de los transformadores aterrizados a través de una impedancia, los capacitores se conectan con el neutro flotante para evitar los efectos de las corrientes armónicas excesivas.

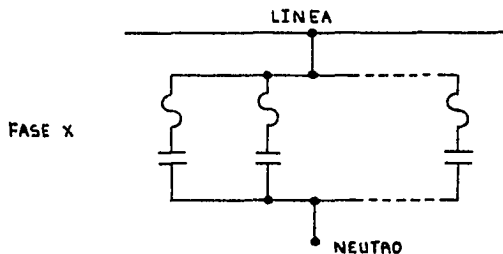
Si el sistema se conecta a tierra en múltiples puntos o con los neutros de los transformadores directamente a tierra, el neutro de los capacitores se aterriza. Esto facilita el accionamiento de los fusibles y evita sobrevoltajes excesivos en los momentos de la conexión y desconexión.

Sin embargo, la conexión con el neutro flotante es recomendable en todo caso

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ya que los fallos en las líneas pueden originar sobrevoltajes peligrosos para el banco si el neutro se encuentra a tierra.

b. - Economía de los fusibles. - La conexión efectuada con los capacitores determina la corriente de cortocircuito posible y en base a esta, se seleccionan los fusibles. Si se usa una conexión estrella como la de la figura, -- existen dos posibilidades para la corriente de corto:



- Con neutro flotante. - La corriente que circula a través de un capacitor con falla en cualquier fase, antes de llegar a actuar el fusible, alcanza sólo un -- valor de 3 veces la corriente nominal de fase, debido a la impedancia de las otras dos fases, por lo tanto, los fusibles son poco costosos.

- Con neutro conectado a tierra. - Un cortocircuito de fase a tierra en este caso si excede de 5000 amperes asimétricos con capacitores de 100 KVAR, o 8000 amperes con capacitores de 150 KVAR, debe ser interrumpido con fusibles de potencia limitadores de corriente, cuyo costo es mucho mayor -- que el de los fusibles tipo expulsión.

Si se usan varias líneas de capacitores (en serie en cada fase), la corriente de falla de cualquier fila está limitada por las impedancias de los capacitores conectados en serie al capacitor que falló; esto hace que la conexión del --

neutro no influya mucho en la magnitud de la corriente y por tanto en el costo de los fusibles.

En el caso de que se instalen capacitores en paralelo en una misma fase, - además de prevenirse la corriente de cortocircuito, debe considerarse otra corriente a través del capacitor con falla, debida a la descarga de las unidades en paralelo. Esta corriente aunque se amortigua en unas pocas milésimas de segundo, suele ser muy intensa y de frecuencia elevada, no pudiendo ser interrumpida por fusibles tipo expulsión.

La manera de evitar consecuencias graves por esta corriente consiste en no sobrepasar en los capacitores instalados en paralelo, una capacidad de almacenamiento de energía eléctrica de 10000 W/seg. En la práctica se considera recomendable no sobrepasar de 3000 KVAR la potencia instalada cuando se usan fusibles tipo expulsión. Para potencias mayores deben usarse fusibles de potencia limitadores de corriente.

c.- Economía del dispositivo de desconexión y conexión. - Cuando se trata de líneas de menos de 46KV, la conexión del neutro no tiene relevancia en cuanto al dispositivo de conexión-desconexión; si los bancos son de gran potencia o se conectan a líneas de más de 46KV, los voltajes de recuperación presentados en los contactos del dispositivo serán más altos al operar con el neutro flotante y el costo del dispositivo será mayor por consiguiente.

Para voltajes de línea de más de 100KV, el costo del dispositivo de conexión y desconexión hace imprescindible la conexión del neutro a tierra.

d.- Calibración de los relevadores de protección del sistema. - En el momento de un cortocircuito, la conexión del neutro a tierra proporciona un camino alternativo para la corriente y puede afectar al sistema de protec-

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ción por relevadores. Sin embargo, en la práctica, raras ocasiones ha significado esto la necesidad de calibrar nuevamente los relevadores.

e. - Interferencia por armónicos - La conexión del neutro a tierra constituye un paso para las corrientes armónicas múltiples de 3 y puede causar interferencia en líneas telefónicas cercanas; sin embargo, este fenómeno no es significativo para influir en la decisión de la conexión del neutro.

*Características del equipo accesorio. -

Como en el caso de los bancos instalados en baja tensión, la corriente nominal del equipo accesorio debe ser de 135% la corriente nominal del banco. La corriente nominal mínima de los fusibles depende de la conexión efectuada con los capacitores, pero debe ser siempre mayor que 150% la corriente nominal de los capacitores.

El voltaje nominal de este equipo, será el mismo que el voltaje de la línea -- donde van a operar los capacitores.

En alta tensión, los capacitores tienen resistencias internas de descarga y -- no suelen llevar fusibles.

En los bancos fijos debe haber cuchillas desconectoras que permitan la desenergización para mantenimiento sin afectar el resto de la instalación; si se trata de bancos desconectables, las cuchillas deben desenergizar tanto el -- banco como el interruptor con que se opera.

Si los bancos se operan con desconectores sin capacidad interrumpiva, deben instalarse fusibles capaces de interrumpir la corriente de corto; los fusibles suelen asociarse con las cuchillas instalándose cuchillas cortacircuitos fusibles.

El alambrado debe diseñarse de forma que facilite el mantenimiento y ga--

rantice la continuidad.

En alta tensión, los bancos se instalan generalmente en intemperie, de no ser así, debe vigilarse cuidadosamente su ventilación.

2) Aislamiento del bastidor. -

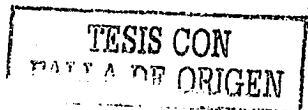
En alta tensión los capacitores suelen montarse sobre bastidores de acero o aluminio sobre los que se soporta además el equipo accesorio; estos bastidores se colocan a nivel del piso si cuentan con una barda protectora a su alrededor o bien elevados a alturas de seguridad reglamentaria según el voltaje manejado.

En el caso de que el alambrado de los bancos incluya equipo como barras colectoras, etc., si se aumenta la posibilidad de un cortocircuito entre fase y bastidor; por esta razón es común aislar el bastidor de tierra.

Si los bancos son de gran potencia reactiva, su tamaño hace más factible un contacto entre fase y bastidor por lo que se acostumbra instalar cada fase en un bastidor aislado de los demás y de tierra.

A pesar de estas medidas, es indispensable instalar las protecciones adecuadas (interruptores o fusibles); en caso de bastidores aislados de tierra se requieren cuchillas de puesta a tierra que permitan la descarga de las partes vivas del banco antes de dar mantenimiento.

En los bancos de pequeña potencia, tipo poste, suele conectarse el bastidor a tierra sin importar la conexión del neutro. Este hecho adquiere más significancia cuando el banco se opera con desconectores automáticos; en este caso el circuito de control del desconector queda unido al bastidor y si este no está aterrizado, durante la conexión y desconexión pueden aparecer sobre voltajes sobre el control automático (cuyas líneas están ligadas a tierra) que



pueden dañarlo. Lo mismo sucede con los desconectores de bancos instalados en líneas de 23 o 34.5 KV.

En aquellos bancos cuyos bastidores estén aislados de tierra no debe instalarse ningún equipo cuyo circuito de control o circuito secundario pueda anular el aislamiento. Para facilitar esto pueden usarse transformadores de potencia para alimentar los circuitos de control de los equipos que vayan montados sobre el bastidor.

3) Bancos fijos y desconectables. -

Cuando la potencia reactiva demandada por la carga es poco variable y se pretende elevar los niveles de voltaje en las líneas reduciendo las pérdidas y aumentando la capacidad de carga de transformadores y generadores, es conveniente instalar bancos fijos; estos se conectan a través de cuchillas-desconectoras o cortacircuitos fusibles.

Si la carga es muy variable para corregir el factor de potencia y reducir pérdidas eléctricas, es conveniente instalar bancos con secciones planeadas para entrar y salir de operación frecuentemente. Se operan con desconectores diseñados para manejar cargas capacitivas puras.

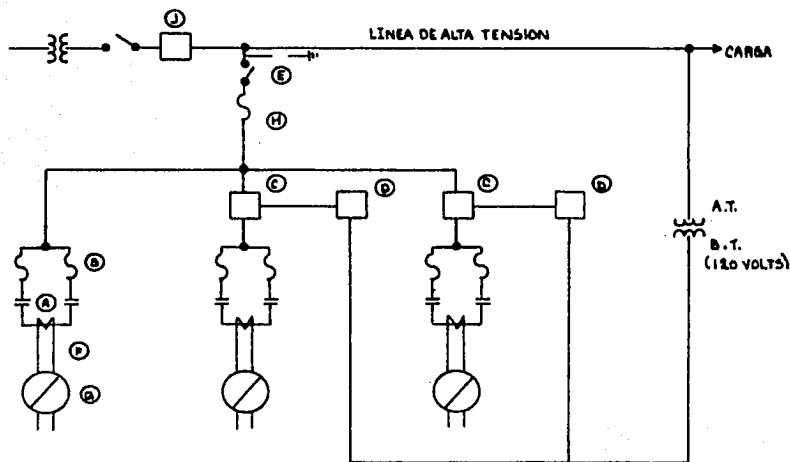
En la práctica es común la necesidad de instalar bancos con ambos tipos de secciones. El alambrado para un banco de este tipo se muestra en la figura anexa.

- A - Capacitores de potencia
- B - Fusibles individuales
- C - Desconector
- D - Control automático sensible a voltaje

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- E - Pararrayos autovalvulares
- F - Transformador de corriente
- G - Relevador de corriente para protección por desbalanceo
- H - Fusibles de protección de grupo
- J - Interruptor general



Banco de capacitores en alta tensión dividido en una sección fija y dos secciones desconectables operadas automáticamente.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

F. - LOCALIZACION OPTIMA DE CAPACITORES EN DERIVACION. -

Dada la variabilidad de las cargas, la localización óptima de los bancos puede considerarse bajo dos puntos de vista, en base a efectos de carga máxima o a efectos de carga media anual.

La práctica ha demostrado, que considerando todos los aspectos anteriores, se maximiza el aprovechamiento de los bancos, instalando una gran parte de ellos en los alimentadores de distribución de manera permanente. Dicha conexión permite reducir al mínimo las pérdidas anuales en el alimentador; -- el único problema que queda por resolver, es que tan cerca del centro de carga debe hacerse la conexión.

Para conseguir una instalación óptima, debe efectuarse un análisis por tramos de línea para cuantificar las corrientes demandadas por las cargas. Por ser dichas cargas variables, se considera un factor de potencia medio de 0.8 y un factor de carga del alimentador de 0.6.

El procedimiento consiste en encontrar dada la potencia de los bancos disponibles, cual será la localización óptima de modo que reduzca en cada tramo de línea el valor absoluto de la corriente inductiva media anual al mínimo.

Para obtener las pérdidas mínimas debería compensarse en cada tramo la componente inductiva de la corriente con una corriente capacitiva; prácticamente hablando esto no es posible, por lo que deben manejarse pérdidas medias anuales. Debe cuidarse que los bancos estén distribuidos de forma que se eviten sobrecompensaciones; si la corriente capacitiva es mayor que la inductiva que requiere compensar, se aumentan las pérdidas del tramo.

La localización de bancos de capacitores a diferentes distancias siendo las cargas variables, permite además optimizar la elevación del voltaje en la

línea.

Cabe aclarar que este no es el único procedimiento para ubicar capacitores en forma óptima, pero sí es uno de los más sencillos y generales - para aplicarse a las necesidades de cada sistema.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

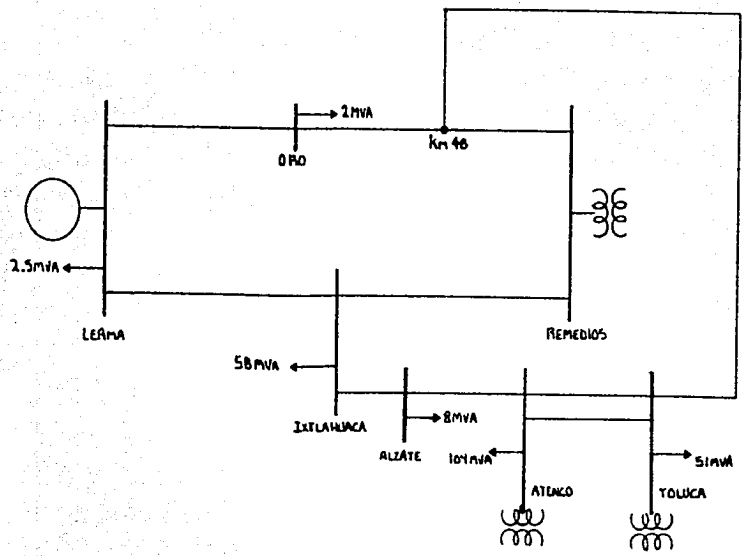
CAPITULO 7

CASO PRACTICO

El caso práctico que a continuación se describe, muestra la resolución de un problema real por medio del uso de bancos de capacitores. Todos los datos presentados fueron obtenidos durante la operación normal de diversas subestaciones de la Compañía de Luz y Fuerza del Centro y corresponden a un problema existente.

El sistema de 85KV Lerma-Toluca, de la Cfa. de Luz y Fuerza alimenta a través de la subestación Ixtlahuaca, a la subestación Jilotepec de la Comisión Federal de Electricidad. A pesar de los ajustes necesarios en la planta generadora de Lerma, el voltaje en la subestación Jilotepec sufre constantes bajas que afectan a los consumidores. La influencia de la potencia reactiva en este problema es determinante como veremos a continuación.

La figura muestra todo el sistema de 85 KV de la zona Lerma-Toluca, con sus cargas máximas indicadas, a fin de considerar el caso más crítico. La condición normal de operación es con las líneas Cuauhtémoc (Toluca-Km 48) y Alzate (Alzate-Atenco) abiertas; esto se hace para mantener un balance de la carga en 2 zonas alimentadas por fuentes separadas y así reducir el



SISTEMA DE 5 KV ZONA LERMA-TOLUCA

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

REPORTE DIARIO TRANSMISION 840723

HORA	MVA	MVA	MW	MVA	MW	MVAR
		IXTLAHUACA			ORO 2	
1	20.9	- 15.8	13.8	- 0.2	0.2	0.0
2	21.6	- 16.9	13.5	- 0.2	0.2	0.0
3	21.7	- 17.2	13.3	- 0.2	0.2	0.0
4	21.8	- 16.8	13.9	- 0.2	0.2	0.0
5	23.5	- 19.4	13.3	- 0.2	0.2	0.0
6	24.3	- 21.7	11.0	- 0.2	0.2	0.0
7	24.3	- 20.4	15.3	- 0.2	0.2	0.0
8	25.4	- 21.5	13.7	- 0.2	0.2	0.0
9	25.2	- 21.7	13.0	- 0.2	0.2	0.0
10	25.2	- 21.0	14.1	- 0.2	0.2	0.0
11	25.3	- 21.9	12.8	- 0.2	0.2	0.0
12	24.9	- 21.5	12.7	- 0.2	0.2	0.0
13	24.5	- 20.4	13.7	- 0.2	0.2	0.0
14	25.4	- 20.5	15.1	- 0.2	0.2	0.0
15	24.8	- 20.9	13.5	- 0.2	0.2	0.0
16	24.9	- 21.0	13.5	- 0.2	0.2	0.0
17	25.7	- 21.5	14.2	- 0.2	0.2	0.0
18	25.8	- 20.4	15.9	- 0.2	0.2	0.0
19	28.7	- 23.0	17.3	- 0.2	0.2	0.0
20	31.3	- 28.1	13.9	- 0.2	0.2	0.0
21	31.2	- 27.4	15.0	- 0.2	0.2	0.0
22	33.8	- 28.3	18.5	- 0.2	0.2	0.0
23	33.9	- 27.1	20.4	- 0.2	0.2	0.0
24	32.4	- 24.4	21.4	- 0.2	0.0	

NOTA:- Sistema LER-TOL cerrado en TOL y ATE con líneas Cuauhtémoc y Alzate.

riesgo de colapso total por sobrecarga en el caso de pérdida de una fuente.

La línea Cuauhtémoc es larga y puede funcionar como capacitor aumentando el voltaje.

En estas condiciones, la potencia reactiva disponible en la zona es:

Planta Generadora Lerma	31	MVAR
Bancos de Transformadores Toluca (18)	30	"
Bancos de Transformadores Atenco (28)	70	"
Bancos de capacitores distribuidos	40	"

Mientras que la potencia reactiva requerida es:

Lerma	1.5	MVAR
Oro	1.0	"
Ixtilahuaca	35.0	"
Alzate	4.8	"
Atenco	62.4	"
Toluca	30.0	"

La diferencia es favorable en 36MVAR lo que indica que la zona cuenta con exceso de reactivos. El reporte diario de transmisión (anexo) de la línea Ixtilahuaca, muestra claramente la potencia entrando al bus de Remedios; es importante hacer notar que ese día las líneas Cuauhtémoc y Alzate estaban cerradas por licencia en la línea El Oro 2 hasta el Km 48.

Este exceso de reactivos en el sistema Lerma-Toluca, no permite problemas de bajo voltaje; esto lo podemos comprobar analizando los valores en las barras de 85 KV el día 25 de mayo de 1984.

HR	LER	ALZ	TOL	ORO	ATE
1	92	86	85	85	85

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

HR	LER	ALZ	TOL	ORO	ATE
2	93	86	85	85	85
3	92	86	85	85	85
4	92	85	86	85	86
5	91	85	86	85	86
6	91	85	86	85	85
7	99	86	85	88	85
8	99	84	86	90	86
9	99	81	85	90	85
10	92	88	88	89	85
11	99	85	85	89	84
12	99	85	84	90	84
13	99	84	86	89	85
14	99	86	86	90	85
15	97	81	86	90	85
16	97	81	86	90	85
17	97	86	87	90	87
18	98	86	87	90	87
19	98	87	87	89	87
20	98	88	85	90	85
21	100	87	87	90	85
22	92	88	87	85	86
23	71	87	86	85	86
24	71	87	86	80	87

Los voltajes son altos especialmente en la barra de Lerma donde se encuentra la fuente de reactivos y en general debido al exceso de Mvar inductivos sobrantes en la zona.

Hasta aquí analizamos lo que sucede con el sistema hasta la subestación -- Ixtlahuaca, ahora estudiaremos lo que pasa entre esta subestación y la subestación Jilotepec en la cual se presenta el bajo voltaje.

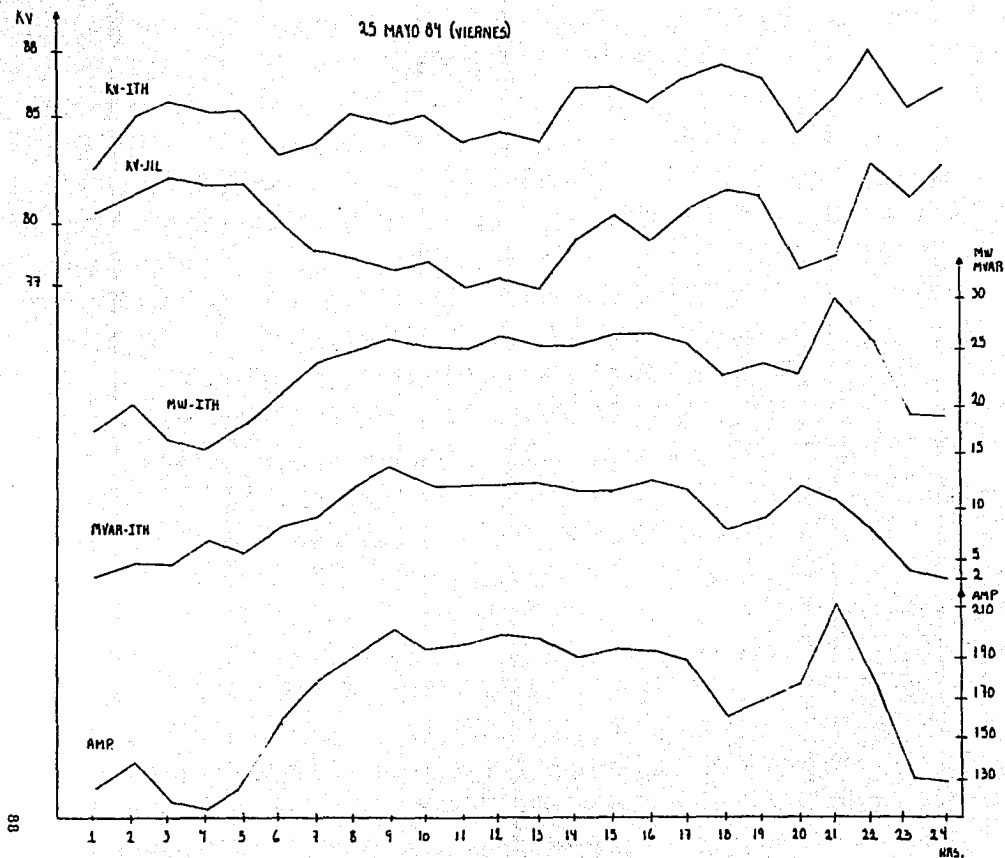
La tabla y las gráficas anexas muestran la potencia real, reactiva y aparente y las corrientes y el voltaje para ambas subestaciones durante los días 25 y 26 de mayo de 1984. Es fácil observar que las elevaciones en la potencia reactiva acompañan a las caídas de voltaje (sobre todo entre las 5AM y las 9 AM y entre las 20 PM y 24PM).

La línea que une Jilotepec con Ixtlahuaca es una línea radial y las caídas de

HORA	25 MAYO 1984 (VIERNES)						26 MAYO 1984 (SABADO)						28 MAYO 1984 (LUNES)					
	ITH					JIL	ITH					JIL	ITH					JIL
	MW	MVAR	MVA	AMP	KV	KV	MW	MVAR	MVA	AMP	KV	KV	MW	MVAR	MVA	AMP	KV	KV
1	14	5	19.6	135	83.8	80.8	19	3	19.2	132	84.5	80.8	16	3	10.6	72	84.8	81.6
2	21	6	21.8	148	85.0	81.5	19	3	19.2	130	85.4	82.0	16	3	16.3	112	83.8	80.8
3	18	6	18.9	127	86.0	82.3	19	3	19.2	130	85.3	81.8	16	3	16.3	112	84.2	81.0
4	17	8	18.1	126	85.5	82.0	19	3	19.2	131	84.8	81.5	15	4	15.5	107	83.9	80.7
5	19	7	20.2	136	85.5	81.0	20	4	20.3	138	84.7	81.2	18	5	18.7	129	83.5	79.9
6	22	9	23.7	164	85.4	80.2	22	6	22.8	158	83.6	80.0	20	5	20.6	143	83.4	79.8
7	25	10	26.9	185	83.9	78.8	25	8	26.2	183	83.0	78.2	26	10	27.8	189	84.8	80.5
8	26	13	29.0	196	85.3	78.3	26	12	28.6	205	80.4	74.0	28	13	30.8	209	85.2	79.2
9	27	15	30.8	209	84.8	77.8	26	12	28.6	200	82.6	75.6	29	12	29.5	202	84.5	79.4
10	26	13	29	197	85.0	78.0	26	12	28.6	200	82.6	75.6	29	13	29.9	200	86.4	80.0
11	26	13	28.9	200	83.8	76.8	27	13	29.0	200	83.8	76.6	29	13	29.9	202	85.4	78.1
12	27	13	29.9	205	84.2	77.2	26	13	28.6	196	84.4	77.5	29	13	29.9	203	85.0	77.8
13	26	13	29.0	200	83.8	76.7	25	12	27.7	187	85.8	79.2	27	13	25.5	171	83.8	78.9
14	26	12	28.6	197	86.3	79.0	21	9	22.8	151	87.5	81.0	24	11	26.4	171	87.2	79.5
15	26	12	29.6	197	86.3	79.2	24	9	25.6	168	88.0	81.7	29	11	29.2	195	86.4	78.4
16	27	13	29	196	85.5	78.9	23	8	24.4	165	85.5	80.2	27	12	29.5	199	85.8	78.4
17	26	12	28.6	190	86.8	80.1	22	8	19.9	130	88.5	82.8	27	12	29.5	197	87.4	80.2
18	23	8	24.4	161	87.3	81.3	12	7	23.0	159	86.2	81.5	25	12	29.5	195	87.4	80.7
19	24	9	25.6	170	86.8	81.0	25	7	25.9	172	86.4	81.0	27	9	28.4	191	83.8	79.7
20	23	12	25.9	178	84.0	77.3	30	9	31.3	210	86.0	79.1	32	9	33.2	225	85.0	78.6
21	30	11	31.9	215	85.7	77.8	27	8	28.9	193	86.5	81.3	30	9	31.3	212	85.5	79.0
22	26	8	27.2	178	88.0	82.4	19	3	19.2	127	87.4	83.8	23	4	23.3	158	85.2	79.4
23	19	4	19.1	134	85.0	80.9	18	2	18.1	120	87.0	83.8	23	4	23.3	157	85.8	81.8
24	19	3	19.2	129	85.7	81.4	17	1	17.0	112	87.8	85.0	20	3	20.2	135	86.5	82.8

VARIABLES ELÉCTRICAS MEDIDAS EN LA SUBESTACION IXTLAHUACA (ITH)
Y VOLTAJE CORRESPONDIENTE A LA SUBESTACION JILOTEPEC (JIL).

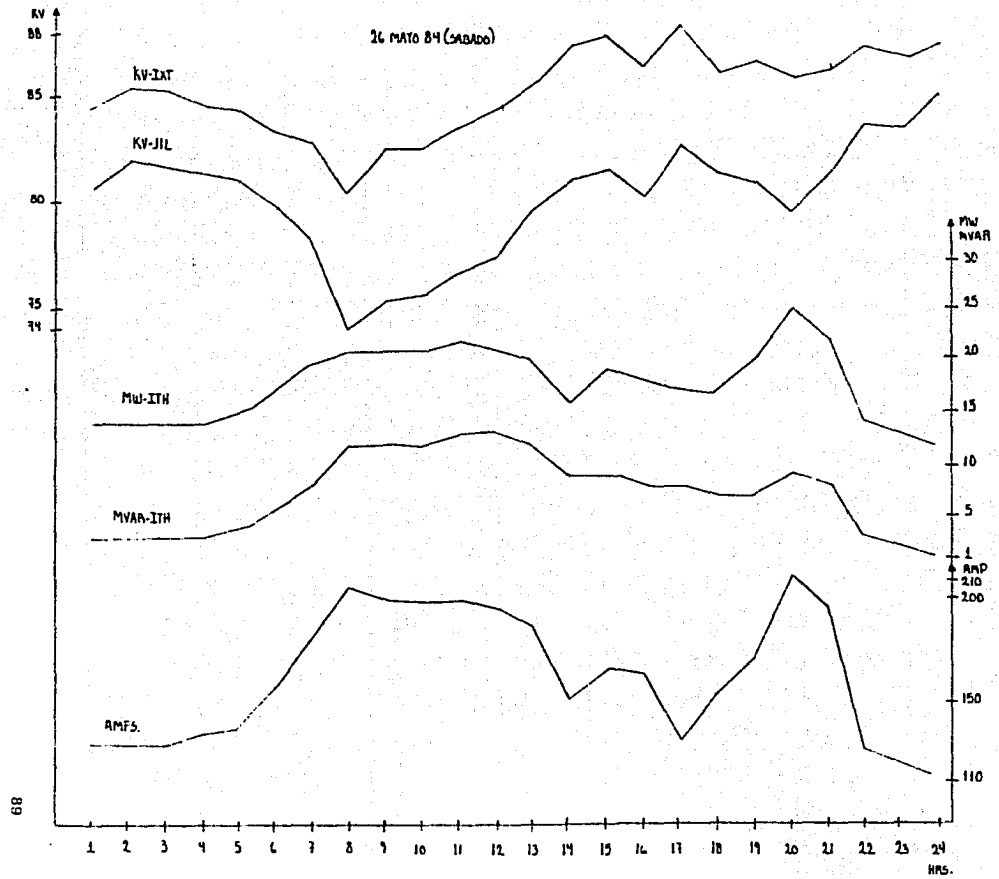
25 MAYO 84 (VIERNES)



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

88

TESIS CON
PALLA DE ORIGEN



voltaje al aumentar los reactivos se deben a que, si bien en un sistema interconectado, el aumento de MVAR inductivos usados para mantener el balance de reactivos, mejora el voltaje, en las líneas radiales aumenta la caída de potencial al aumentar la corriente (especialmente si el factor de potencia está atrasado como se observa en las gráficas).

Los siguientes cálculos demuestran como sucede este fenómeno; se -- escogieron como puntos característicos las 8, 13 y 20 horas del 25 de mayo.

Características de la línea Ixtlahuaca Jilotepec:

ACSR 477 MCM

4m 4m

Longitud 73.8 Km de tablas: R = 9.8 XI = j 35.6

Xc se desprecia por tratarse de una línea corta, por lo tanto:

$$Z = 9.8 + j 35.6 = 36.9 \angle 74.6^\circ$$

Tomando como referencia el bus de Ixtlahuaca:

8:00

$$\begin{aligned} V_g &= 85.3 \angle 0^\circ \text{ KV} \\ I &= 196 \angle 26.6^\circ \text{ amp} \\ IZ &= 7.23 \angle 48^\circ \text{ KV} \\ V_r &= 76.5 \angle -4^\circ \text{ KV} \\ S_r &= 24 + j 9.9 \text{ MVA} \\ q &= \text{pérdida reactiva en la línea} = 3.1 \text{ MVAR} \end{aligned}$$

13:00

$$\begin{aligned} V_g &= 83.8 \angle 0^\circ \text{ KV} \\ I &= 200 \angle 26.6^\circ \text{ amp} \\ IZ &= 7.38 \angle 48^\circ \text{ KV} \\ V_r &= 75.86 \angle -7^\circ \text{ KV} \\ S_r &= 24 + j 8.7 \text{ MVA} \\ q &= 4.3 \text{ MVAR} \end{aligned}$$

20:00

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$\begin{aligned}
 V_g &= 84 \angle 0^\circ \text{ KV} \\
 I &= 178 \angle -27.5^\circ \text{ amp} \\
 IZ &= 6.8 \angle 47^\circ \text{ KV} \\
 V_r &= 76.7 \angle -6^\circ \text{ KV} \\
 S_r &= 22 + j8.5 \text{ MVA} \\
 q &= 3.5 \text{ MVAR}
 \end{aligned}$$

Podemos observar que la caída de voltaje debida a la corriente reactiva es considerable; el problema se puede solucionar suministrando los reactivos directamente a la carga, reduciendo drásticamente su envío desde la planta generadora de Lerma. Esto se consigue instalando un banco de capacitores por ejemplo de 13.5 MVAR que es un valor recomendable para nuestro caso. Conectando el banco en la barra de Jilotepec, ocasionaremos un cambio en el balance de reactivos:

$$Q_{\text{Jilotepec}} = Q_{\text{banco}} - Q_{\text{carga}} - q_{\text{pérdidas}}$$

$$8:00 \quad Q_{\text{Jilotepec}} = 13.5 - 9.9 - 3.1 = 0.5 \text{ MVAR}$$

$$13:00 \quad Q_{\text{Jilotepec}} = 13.5 - 8.7 - 4.3 = 0.5 \text{ MVAR}$$

$$20:00 \quad Q_{\text{Jilotepec}} = 13.5 - 8.5 - 3.5 = 1.5 \text{ MVAR}$$

Estos valores de potencia reactiva fluirán en dirección Jilotepec-Ixtlahuaca y darán una potencia aparente en las barras de Ixtlahuaca de:

$$8:00 \quad S = 26 - j0.5 \text{ MVA}$$

$$13:00 \quad S = 26 - j0.5 \quad "$$

$$20:00 \quad S = 23 - j1.5 \quad "$$

Con estos valores calculamos nuevamente la caída de tensión en la línea:

8:00

$$V_g = 85.3 \angle 0^\circ \text{ KV}$$

I = 175.9 1.1° amp

IZ = 6.49 75.7° KV

Vr = 83.16 -7.5° KV

13:00

Vg = 83.8 0° KV

I = 179 1.1° amp

IZ = 6.6 75.7° KV

Vr = 81.7 -7.8° KV

20:00

Vg = 84 0° KV

I = 158 3.7° amp

IZ = 5.8 78.3° KV

Vr = 82.4 -6° KV

Es claro que de esta manera la regulación de voltaje mejora considerablemente.

Del caso antes descrito podemos concluir que:

°En un sistema de distribución interconectado podemos mantener los niveles de voltaje necesarios mediante el flujo de reactivos, no así en las líneas radiales en las que el aumento de corriente inductiva agudiza la caída de potencial.

°En el caso del sistema Lerma-Toluca, el voltaje de la subestación Jilotepec no puede mejorarse aumentando los reactivos provenientes de la planta de Lerma, ya que para lograr un aumento pequeño de voltaje en dicha subestación, necesitamos valores muy altos de voltaje en las barras de Lerma e Ixtlahuaca afectando también al ORO y causando serios deterioros a los aislamientos del equipo en estas subestaciones.

°Definitivamente, la mejor solución para la regulación de voltaje es la instalación de un banco de capacitores. Esto permite suspender la sobreexcitación

ción de las máquinas de la planta de Lerma hasta niveles de voltaje no dañinos al equipo; el punto adecuado de excitación de las máquinas debe calcularse haciendo un estudio de los reactivos en los nodos Lerma-Oro-Ixtlahuaca.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO 8

OPERACION DE BANCOS DE CAPACITORES.

A. - CONEXION Y DESCONEXION. -

La energización o desenergización de los bancos de capacitores puede producir sobrevoltajes y sobrecorrientes transitorios de gran intensidad - debido al adelanto de la corriente capacitiva y a la energía almacenada en los bancos. Los equipos de conexión y desconexión deben ser capaces de operar bajo estas condiciones para proteger los bancos, a los equipos adyacentes o incluso a sí mismos. Mientras más alto sea el voltaje del banco, más críticas serán estas perturbaciones.

El equipo de conexión-desconexión debe elegirse revisando los siguientes factores:

- Voltaje nominal adecuado al voltaje de línea.
- Garantía del equipo para operar con carga capacitiva pura. - Conociendo la máxima potencia reactiva operable con el equipo para los diferentes voltajes de operación. Es necesario que el equipo sea especial para conectar y desconectar capacitores, ya que la carga de estos puede ocasionar fuertes diferencias de potencial entre los contactos fijo y móvil del equipo de desconexión. Esto puede originar rearqueos que produzcan fuertes sobrevol

tajes en los capacitores y en el punto de la red donde se está efectuando la desconexión.

- Corriente nominal. - Los equipos de conexión-desconexión deben tener una corriente nominal de al menos 35% mayor que la corriente nominal por fase del banco que se va a operar. Con esto se tiene un margen de tolerancia en caso de sobrevoltajes de hasta 10%. Estos márgenes pueden ser mayores en baja tensión.

- Corriente instantánea de conexión. - En el momento de la conexión de un banco de capacitores a la red, se producen picos de corriente de hasta 10 veces o más la corriente nominal del banco. Estos picos dependen de la potencia reactiva del banco y de la impedancia del sistema en el punto donde se efectúa la conexión.

Estas corrientes instantáneas son más severas cuando se energizan bancos conectados en paralelo; las descargas de un banco sobre otro originan corrientes de alta frecuencia y con magnitud de 100 a 200 veces la corriente nominal del banco, pudiendo destruir en unas pocas operaciones el equipo de conexión y aún dañando los capacitores.

Aunque los fabricantes proporcionan el dato de la capacidad del equipo para operar con cargas en paralelo y aisladas, lo más práctico en la realidad es calcular la corriente de conexión y asegurarse de que esta no exceda los límites de corriente instantánea garantizados por el proveedor del equipo.

La corriente de conexión depende además del tamaño de los bancos en paralelo, de la inductancia del cableado interpuesto entre ambos bancos; aumentando artificialmente esta inductancia puede reducirse fácilmente la corriente instantánea de conexión.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- Capacidad interruptiva. - Cuando la operación de los capacitores se hace con interruptores, estos deben tener la capacidad suficiente para interrumpir la corriente de cortocircuito del sistema en el punto de instalación del banco. Debe cuidarse, en su caso, de no exceder las limitaciones impuestas por el producto corriente-frecuencia para los interruptores.

B. - EQUIPO DE CONEXION Y DESCONEXION PARA BAJA TENSION. -

En el caso de los bancos instalados en baja tensión, el equipo de conexión-desconexión es estándar con la única precaución de que su corriente nominal sea mayor que la del banco en un margen seguro.

Si los bancos son fijos, pueden usarse interruptores de cuchillas con fusibles que permitan la operación esporádica del banco ofreciendo también protección en caso de cortocircuito. Estas cuchillas deben tener una corriente nominal de por lo menos 165% la corriente nominal del banco.

Cuando los bancos son de secciones desconectables, pueden operarse con contactores magnéticos cuya corriente nominal sea por lo menos 150% de la corriente nominal del banco. La protección de cortocircuito es independiente en este caso y puede proveerse, por ejemplo, con un interruptor de cuchillas con fusibles que permitirá además aislar el contactor del sistema cuando sea necesario.

Los bancos desconectables pueden operarse con cualquier tipo de interruptor de potencia para bajo voltaje cuya corriente nominal sea como mínimo 35% mayor que la corriente nominal del banco. En el caso específico de los interruptores termomagnéticos de caja moldeada, la corriente nominal debe exceder como mínimo en 85% a la corriente nominal del banco. Este mar

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

gen debe mantenerse cuando se usan contactores o interruptores instalados dentro de gabinetes de control.

Quando los bancos están operando en paralelo la conexión y desconexión puede efectuarse de dos formas: a) con equipo estándar con capacidad para soportar la corriente instantánea que se presenta en cada caso o bien en serie con inductancias capaces de amortiguar las corrientes de conexión. b) con contactores especiales que limitan la corriente de conexión intercalando una resistencia en el circuito en el momento de la conexión.

C.- EQUIPO DE CONEXION Y DESCONEXION EN ALTA TENSION. -

La corriente de estos equipos debe ser mínimo 35% mayor que la corriente nominal del banco. Si los bancos son fijos y están instalados en líneas de hasta 25KV se pueden usar cuchillas desconectoras o cuchillas cortacircuitos fusibles capaces de resistir o interrumpir respectivamente una corriente igual o mayor a la de cortocircuito en el punto de instalación de los capacitores.

Quando los bancos son desconectables, se operan con interruptores o desconectores que interrumpen el arco por medios diversos:

- Cámaras de aceite. - Es el método más económico. Para líneas de hasta 14.4 KV pueden usarse desconectores monofásicos de bajo costo. Para líneas de hasta 34.5 KV y bancos pequeños pueden usarse desconectores trifásicos también económicos; para voltajes de línea mayores a 34.5KV y de hasta 345 KV pueden usarse interruptores trifásicos.
- Cámaras de vacío. - Los desconectores que usan este método son apropiados para operar bancos medianos que operen en líneas de hasta 34.5KV. Nor-

malmente estos desconectores operan libres de rearqueos.

- Aire comprimido. - Los interruptores que operan con este método se usan hasta voltajes de línea de 345 KV; tienen una capacidad interruptiva muy eficaz y libre de rearqueos.

- Aire ionizado. - Los interruptores con cámaras de aire ionizado no operan libres de rearqueos pero en cambio no provocan sobrevoltajes muy violentos. Son usados en líneas de hasta 13.8 KV.

- Hexafluoruro de azufre. - Los interruptores con cámaras de este medio son muy apropiados para la operación de bancos de capacitores de potencia y están prácticamente libres de rearqueos. Se usan en líneas de hasta 345 KV.

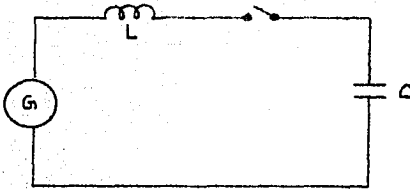
D. - ENERGIZACION DE UN BANCO AISLADO. -

Al energizar los bancos de capacitores, estos toman corrientes transitorias de magnitudes bastante elevadas; si en el momento de cerrar el circuito el banco está descargado, hace bajar momentáneamente a cero el voltaje de la línea en el punto donde está instalado y esto lo ve el sistema como un cortocircuito (aparente); si por el contrario, el banco estaba cargado, puede ocurrir que en el momento de la conexión la polaridad del voltaje de los capacitores se oponga a la del voltaje de la línea, provocando corrientes de conexión muy violentas.

La siguiente figura muestra esquemáticamente la conexión de un banco de capacitores aislado:

L= inductancia de la línea, los transformadores y del generador.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



La corriente máxima de conexión se presenta cuando se cierra el circuito en un momento en que la línea se encuentra a voltaje de cresta:

$$I_{\max} = \sqrt{2} I_{\text{nominal}} (1 + (KV_{\text{Acc}}/KV_{\text{Rbanco}})^{1/2})$$

Suponiendo que el banco está inicialmente descargado. Si no fuera así, las corrientes producidas podrían ser del doble o mayores; en la práctica, los picos de corriente originados en la conexión de los bancos toman valores de 5 a 15 veces la corriente nominal del banco.

El efecto de dichas corrientes sobre el equipo de conexión-desconexión, depende de la frecuencia con que se opere el banco; si las operaciones no son muy frecuentes, puede prescindirse de condiciones especiales para el mantenimiento, selección e incluso diseño del equipo.

Las gráficas anexas, muestran que picos de corriente máximos pueden producirse de acuerdo al voltaje de la línea, la potencia de los bancos y la corriente de cortocircuito trifásica del sistema en el punto de instalación de los capacitores.

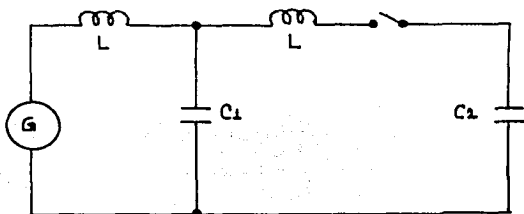
Los picos de corriente máximos comprenden la suma del valor de cresta de la corriente nominal del banco más el valor de cresta de la corriente transitoria de conexión.

En el caso en que los capacitores esten descargados en el momento de la conexión, puede provocarse un sobrevoltaje transitorio de máximo hasta 2 veces el voltaje de cresta del sistema. Si los capacitores están cargados al mismo voltaje que el sistema, no habrá sobrevoltaje siempre y cuando las polaridades no sean opuestas; en caso contrario, el sobrevoltaje transitorio puede ser 3 veces el voltaje de línea.

En la práctica se observan sobrevoltajes de 1.8 el voltaje de cresta en bancos descargados inicialmente y de 2.7 el voltaje de cresta en bancos cargados.

E. - ENERGIZACION DE BANCOS EN PARALELO. -

Cuando un banco entra en operación con otros que se encuentran en paralelo, pueden producirse sobrecorrientes instantáneas extraordinariamente altas. Analicemos el siguiente esquema:



Las inductancias corresponden a los cables o barras entre los capacitores y a la de la línea que viene de los generadores. Por ser esta última mucho mayor que la primera, el cortocircuito aparente provocado por la conexión

del segundo banco será alimentado en su totalidad prácticamente, por la -
energía almacenada en el banco C1. El banco C2 toma su pico máximo de -
corriente cuando se energiza encontrándose la red a su voltaje de cresta:

$$I_{max} = \sqrt{2} V_{nominal} (C_t/L)^{1/2}$$

donde:

$$C_t = \frac{C1C2}{C1 + C2} \quad V_{nominal} = V_{nominal} \text{ del banco}$$

Siempre que los capacitores del banco C2 estén inicialmente descargados.

En bancos conectados en estrella la expresión anterior presupone -
los neutros conectados a tierra (o bien unidos entre sí si se trata de capa-
citores de secciones desconectables).

En la práctica se ha observado que los picos de corriente originados en la -
conexión de bancos en paralelo alcanzan de 20 a 250 veces la corriente no -
nominal de los capacitores, aunque se amortigua hasta valores insignificantes
en menos de 0.016 seg (1 período).

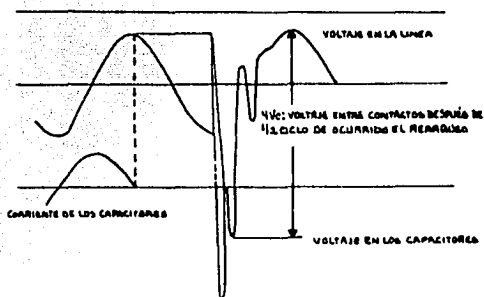
La frecuencia de estas corrientes es: $f = 1 / (2\pi \sqrt{LC_t})$

F. - DESENERGIZACION DE UN BANCO DE CAPACITORES. -

Prácticamente para cualquier equipo de desconexión es relativamente -
fácil la apertura inicial de un circuito capacitivo, en uno de los primeros ce -
ros de corriente ocurridos después de haberse iniciado el arco entre sus con -
tactos. Esto se debe a que los capacitores mantienen el voltaje a que se en - -
contraba la línea en el momento de su desconexión y por tanto no existe dife -
rencia de potencial entre los contactos inmediatamente después de interrump -
pirse el circuito.

Sin embargo, medio ciclo después de haberse producido la interrupción del arco, el voltaje entre los contactos alcanza un valor de 2 veces el voltaje de cresta V_c , de la onda fundamental. Si en ese momento los contactos del equipo se encuentran suficientemente separados entre sí para soportar la diferencia de potencial sin que se restablezca el arco, se habrá logrado la desconexión sin problema.

Estas diferencias de voltaje tan altas pueden presentarse debido al desfase de 90° entre la corriente y el voltaje, típico de circuitos capacitivos. Si el equipo de desconexión no es lo suficientemente rápido para asegurar una rigidez dieléctrica que soporte el voltaje mencionado, puede ocasionarse un rearqueo. Si esto sucediera y por estar la línea y los capacitores a voltaje de cresta y con diferente polaridad, el voltaje de los capacitores tenderá a cambiar bruscamente para adaptarse a la polaridad en la línea; sin embargo, no sólo se alcanza el voltaje de la línea, sino que se sobrepasa en una magnitud igual al voltaje inicial, ocasionándose un sobrevoltaje de 3 veces el voltaje de cresta en el punto de desconexión.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Dicho sobrevoltaje va asociado a una corriente de alta frecuencia que puede volver a interrumpirse en uno de sus primeros ceros, quedando cargados los capacitores a un voltaje de 3 veces el voltaje de cresta; medio ciclo más tarde, la diferencia de voltaje entre polos del equipo de desconexión puede alcanzar un valor de 4 veces el voltaje de cresta y ocasionar un segundo rearqueo con sobrevoltajes todavía mayores si la separación entre contactos no es la adecuada para impedirlo.

Todo lo anterior se refiere a un banco conectado en estrella con neutro a tierra. En líneas de más de 46KV debe consultarse con el fabricante del equipo la posibilidad de operar con bancos conectados en estrella con neutro flotante.

G. - OPERACION DE CAPACITORES CON EL NEUTRO AISLADO. -

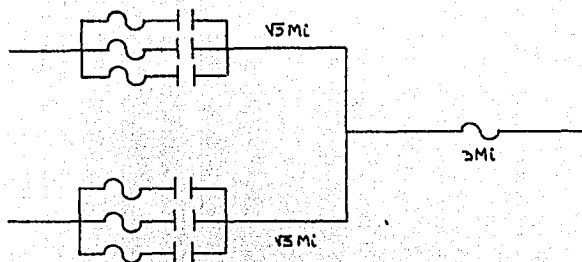
Particularizando lo explicado anteriormente al caso de las subestaciones de distribución, hallamos que es práctica común conectar los bancos de capacitores en estrella con el neutro flotante y protegidos con fusibles individuales de pequeña capacidad de ruptura.

Con el neutro aislado, al ocurrir un cortocircuito en un elemento, su fusible debe interrumpir la suma vectorial de las corrientes totales de las otras 2-fases, multiplicadas cada una por 3. Habiendo M unidades por fase, la corriente a interrumpir será $3Mi$ fase como máximo para cada fusible.

Por razones de sobrecorrientes transitorias o posible ruptura del tanque del capacitor, la corriente que circula por el fusible en el momento del corto no debe ser menor a 10 veces la corriente nominal del fusible:

$$3Mi > 10i \quad 3M > 10 \quad M > 3.33$$

Esto indica que por concepto de corriente de cortocircuito, el número mínimo de unidades a instalar en paralelo debe ser 4.



Si el neutro del banco estuviera conectado a tierra al igual que el del sistema que lo alimenta, el fusible tendría que interrumpir la plena corriente de cortocircuito de una fase a tierra; puede darse el caso de que ni siquiera existan fusibles individuales capaces de interrumpir magnitudes semejantes y se corre el riesgo de que se rompa el tanque del capacitor o se dañen otras --- piezas del equipo. Un disturbio de esta magnitud en el sistema puede ser de --- consideración.

Si el banco se conectara en delta, el fusible individual tendría que interrumpir la corriente de corto entre dos fases, que es muy poco menor que --- la corriente de corto trifásico.

De lo anterior podemos concluir que sólo la operación con neutro flotante --- permite el uso de fusibles de baja capacidad y costo y evita serios disturbios en el sistema. Sin embargo, esta conexión trae varios problemas; el más importante deriva del hecho de que al fallar varios capacitores en la misma fa-

se, el neutro se desplaza y a los restantes capacitores de la fase incompleta se les aplica un voltaje mayor que el normal o el permisible.

El aumento de voltaje en por unidad puede calcularse como sigue:

$$S = \frac{M-P}{P+2M}$$

donde: M - No. normal de capacitores/fase

N - No. de capacitores faltantes/fase

P - Capacitores restantes (M-N)

Suponemos que estando las fases completas, cada unidad recibe exactamente su voltaje nominal.

De acuerdo con lo afirmado anteriormente, el sobrevoltaje máximo según el fabricante es $S=0.1$; para dicho valor de sobrevoltaje el número de capacitores que deben quedar en el grupo incompleto será:

$$P = M (1 - 2s / 1 + s) = M (1 - 0.2 / 1.1) = 0.728M$$

es decir, puede dañarse el 27% de los capacitores sin que el voltaje en los restantes exceda del 10% del voltaje nominal.

Si hacemos una tabla en que se calcule "S" para diferentes números de capacitores por fase y uno con falla, hallamos que por concepto de sobrevoltaje, el número normal de capacitores por fase no puede estar debajo de 4 ya que de otra forma, con una sola unidad fuera, el sobrevoltaje sería mayor al permisible.

Aunque tratamos de particularizar estas afirmaciones para el caso de subestaciones, son perfectamente válidas también para el caso de cualquier instalación industrial.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO 9

PROTECCION Y CONTROL.

A. - PROTECCION. -

En términos generales, puede esperarse que los capacitores de potencia permanezcan de 15 a 20 años en servicio; sin embargo, es normal que en la práctica, unas cuantas unidades fallen en los primeros meses de operación.

En el capítulo anterior, se dijo que los capacitores eran muy susceptibles de fallar debido a su aislamiento, que no puede ser grueso, y a su gran área - expuesta a falla. Si se tiene en cuenta, como ejemplo, que un capacitor de 150KVAR para alta tensión, está fabricado con un dieléctrico de pocas milésimas de milímetro de espesor y unos 200 m² de superficie, es fácil entender que la homogeneidad física y química de los dieléctricos puede variar - de una unidad a otra a pesar del estricto control de calidad. Por tanto, un cierto porcentaje de capacitores falla en sus primeros meses de operación - a pesar de haber resistido todas las pruebas previas.

Generalmente, el fallo de un capacitor de potencia se refiere a un cortocir-

culto en sus placas con un arqueo que descompone el dieléctrico formando cloruro de hidrógeno gaseoso. Este gas, sometido a presión por el calor-emanado del arco eléctrico, puede ocasionar la explosión del tanque del capacitor si no existe un medio para interrumpir el corto en un tiempo pequeño.

Estos posibles fallos, hacen indispensable una protección adecuada en cualquier instalación de capacitores; el objetivo principal de la protección es -- mantener la continuidad del servicio y proteger al personal y al equipo de -- las consecuencias de la falla de un capacitor.

Para determinar la protección más adecuada a usar, debe tomarse en cuenta la conexión de los capacitores:

1. - Delta. - Esta conexión es poco usada por implicar altos costos en cuanto a materiales, capacidad de los fusibles y a los mismos capacitores (a mayor voltaje nominal, su costo se incrementa).
 2. - Estrella con neutro a tierra. - La conexión a tierra puede ser vehiculo -- para llevar terceras armónicas, por lo que los relevadores de protección deben estar provistos de un filtro para evitar operaciones indeseables. Por -- otra parte, los relevadores deben ser sensibles a desbalances del sistema -- entre fase y tierra, lo cual podría resultar en falsas operaciones del sistema de protección.
- Si se elige protección con fusibles, deben hacerse consideraciones especiales sobre todo en cuanto a la magnitud de las corrientes de cortocircuito.
3. - Estrella con neutro flotante. - Es la conexión más usada; limita el flujo de la corriente de falla a 3 veces la corriente nominal, sin importar el valor

de la corriente de falla del sistema. Esto permite que los disturbios del sistema no sean transmitidos al circuito de protección del banco.

En caso de usarse protección con relevadores, esta conexión resulta económica ya que no constituye un camino para terceras armónicas.

1. - TIPOS DE PROTECCIONES. -

Existen básicamente los siguientes tipos de protecciones:

1. - Protección por fusibles. -

a. - Fusibles en grupo. - Usados principalmente en bancos montados en poste donde sólo los fusibles de línea proporcionan protección a uno o más capacitores en cada fase.

b. - Fusibles individuales. - Usados en subestaciones donde cada unidad de capacitor es protegida por fusible teniendo además protección de respaldo para el banco.

2. - Protección con relevadores. -

Usados sobre todo en bancos cuyo mantenimiento es muy esporádico por el peligro de sobrevoltajes de desbalanceo. Necesitan actuar un interruptor ya que por sí mismos no ofrecen protección.

3. - Protección con interruptores. -

Usados principalmente en instalaciones de alta tensión; son operados por relevadores.

4. - Protección con pararrayos. -

Es usada en caso de que los capacitores se conecten a líneas aéreas.

A continuación se describen los diferentes tipos de protección en forma detallada:

1) Protección por fusibles. -

Es la protección más económica y debe elegirse de forma que mantenga la continuidad del servicio y evite que el fallo de un capacitor pueda dañar a otras unidades del mismo banco, al equipo auxiliar cercano o incluso al personal.

En el caso de la protección en grupo, las cuchillas fusibles desconectadoras del tipo indicador, pueden incluso dar una indicación visual de la falla.

Son varios los factores que deben considerarse para seleccionar la protección adecuada por fusibles:

- Voltaje nominal del sistema en que se trabaja.
- Corriente máxima continua normal y corriente de cortocircuito
- Características de operación tiempo-corriente que le permitan aislar el capacitor antes que la caja pueda explotar y eviten la respuesta a condiciones transitorias de corriente.

En general, el voltaje nominal del fusible debe ser igual al voltaje nominal de los capacitores de forma que al fallar una unidad, el voltaje que aparece sobre el fusible pueda ser soportado.

Por otra parte, la corriente nominal del fusible debe ser como mínimo 165% la corriente nominal del capacitor a proteger (150% en conexión en delta); esto tiene como fin evitar su accionamiento ante corrientes transitorias durante operaciones de conexión-desconexión o ante niveles admisibles de armónicos.

Por último, la capacidad interruptiva del fusible debe ser superior a la corriente de fallo del capacitor (o capacitores) protegido; en el caso de instalaciones con una sola fila de capacitores en paralelo por fase, dicha corriente

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

depende del tipo de conexión.

Como se explicó en el capítulo anterior, para conexiones en delta o estrella con neutro a tierra las corrientes de fallo tienen valores elevados, no así en conexiones en estrella con neutro flotante.

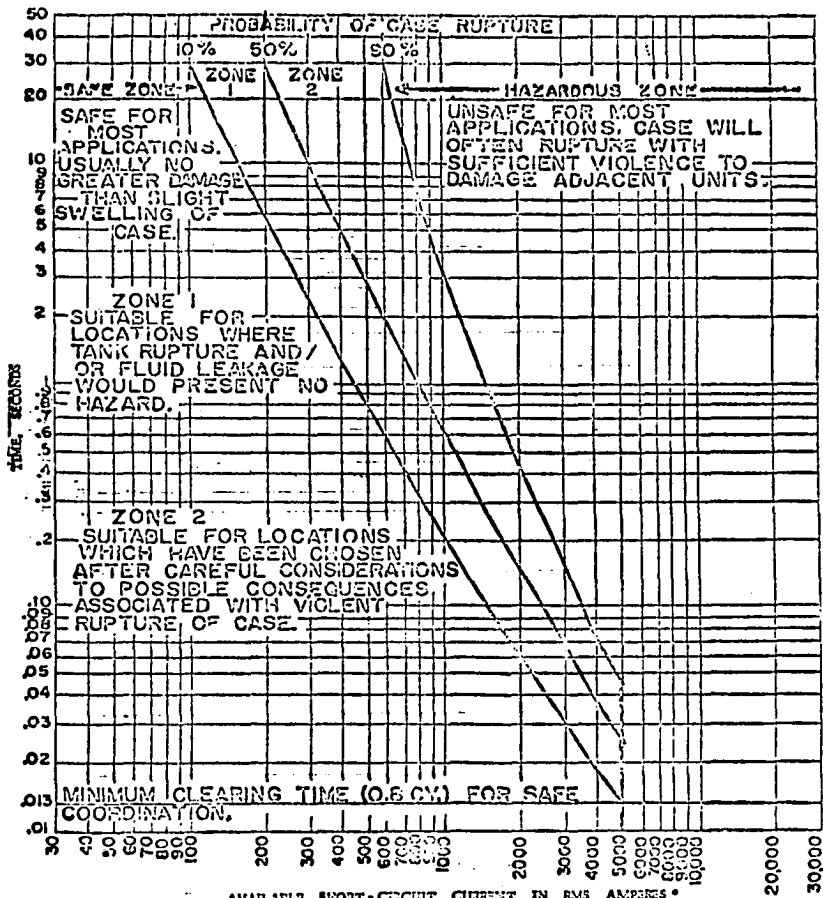
Si se trata de bancos cuyas fases están formadas por varias filas de capacitores conectados en serie, la corriente de fallo de un capacitor que sale de operación en alguna fila está limitada por la impedancia de las filas restantes y no varía significativamente con el tipo de conexión usada.

En cuanto a las características de operación tiempo-corriente, es muy importante coordinar las características de fusión de los fusibles con la probabilidad de ruptura del tanque de los capacitores. Este hecho limita el rango del fusible y por tanto el rango de carga en KVAR del banco que va a ser protegido. Los fusibles más usados son tipo K (rápido) y tipo T (lento); lo más importante es que el fusible opere a no más de 300 seg con la corriente de falla más pequeña para cada caso particular.

NEMA ha establecido curvas de características tiempo-corriente para las unidades de capacitores más comunes en el mercado, en las que se indican los porcentajes de probabilidad de explosión de los tanques de acuerdo con la "zona" escogida para protección con fusibles. Dichas gráficas se muestran anexas.

De las curvas de fusión completa del fusible elegido, puede deducirse el tiempo que tardará el fusible en interrumpir la corriente de fallo. La combinación de la corriente de fallo y el tiempo de apertura del fusible determina un punto en las curvas de posibilidad de ruptura del tanque, que debe quedar situado en la zona de seguridad de dichas curvas, de no ser así, debe elegir

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



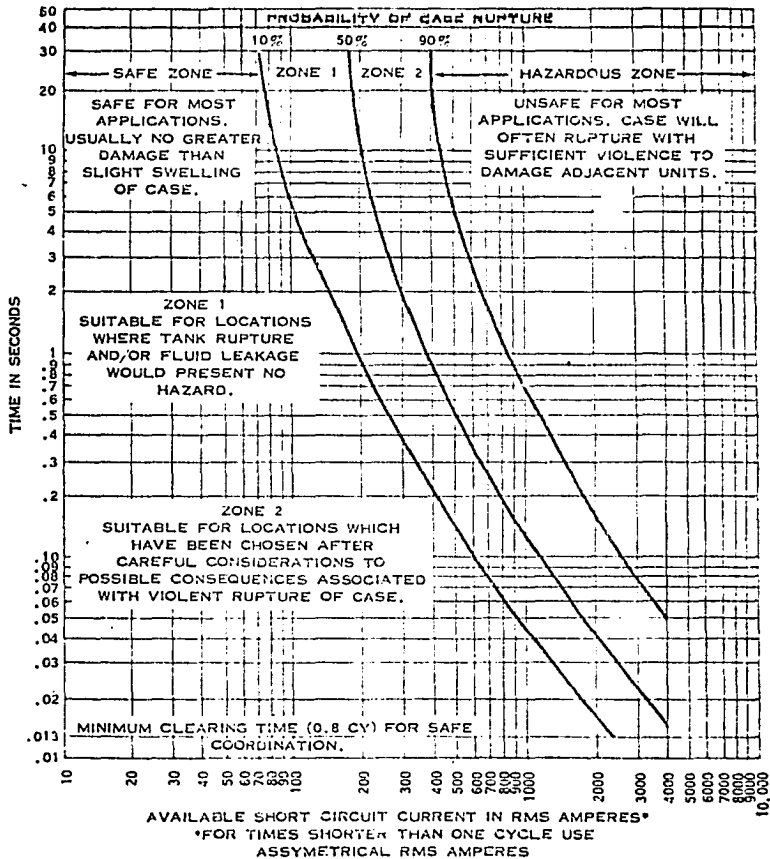
AVAILABLE SHORT-CIRCUIT CURRENT IN RMS AMPERES *

* For times shorter than 1 cycle use asymmetrical rms amperes.

CURRENT-VERSUS-TIME FOR A CAPACITOR UNIT TO RUPTURE DUE TO GAS PRESSURE
DUE TO INTERNAL HEATING FOR 200-THOUSAND UNITS

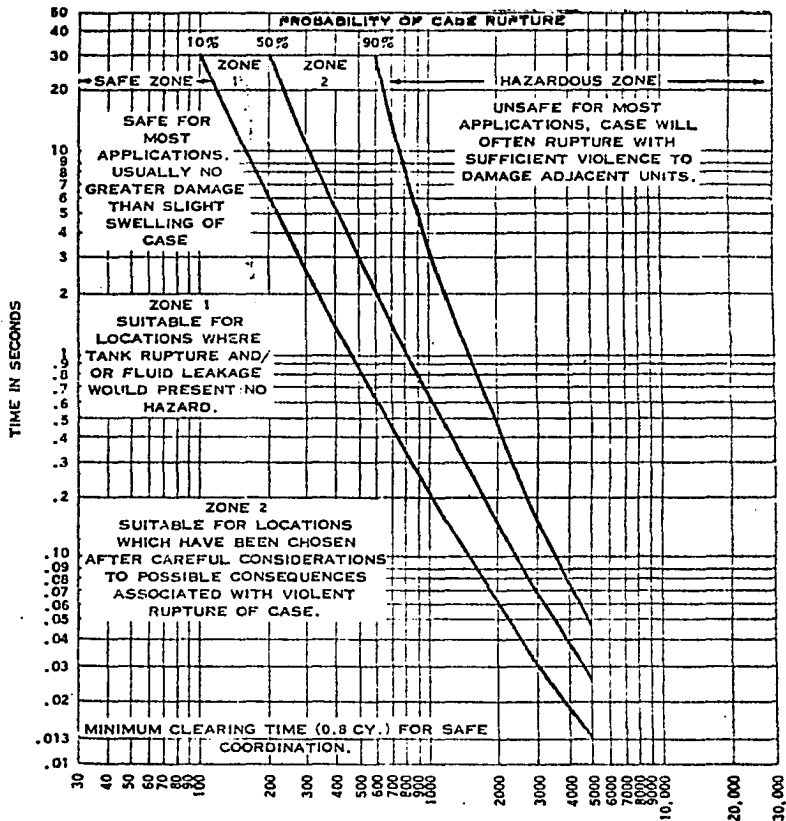
TESIS CON FALLA DE ORIGEN

CURRENT-VERSUS-TIME FOR A CAPACITOR UNIT TO RUPTURE DUE TO GAS PRESSURE CAUSED BY INTERNAL ARCING FOR 25 KVAR UNITS



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

CURRENT-VERSUS-TIME FOR A CAPACITOR UNIT TO RUPTURE DUE TO GAS PRESSURE CAUSED BY INTERNAL ARCING FOR 50 KVAR UNITS



AVAILABLE SHORT CIRCUIT CURRENT IN RMS AMPERES*
*FOR TIMES SHORTER THAN ONE CYCLE USE
ASYMMETRICAL RMS AMPERES

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

se un fusible más sensible, cuyo comportamiento quede dentro de la zona segura.

Si la corriente de fallo de un capacitor de potencia de alta tensión es mayor que 4000 amperes asimétricos para capacitores de 25 a 50 KVAR, -- mayor de 5000 amperes para capacitores de 50 a 100 KVAR, o mayor que 8000 amperes para capacitores de 150 a 200 KVAR, no pueden usarse fusibles tipo expulsión para su protección, ya que existe el peligro inminente de que se produzca la ruptura violenta del tanque del capacitor antes de que actúe el fusible. En este caso, los capacitores deben protegerse con fusibles de potencia limitadores de corriente.

Los fusibles tipo expulsión tampoco son adecuados para instalaciones cuya capacidad de almacenamiento de energía sobrepase a 10000 Joules. Si se excede de este límite deben usarse fusibles limitadores de corriente y capaces de interrumpir corrientes de alta frecuencia.

a. - Fusibles individuales. -

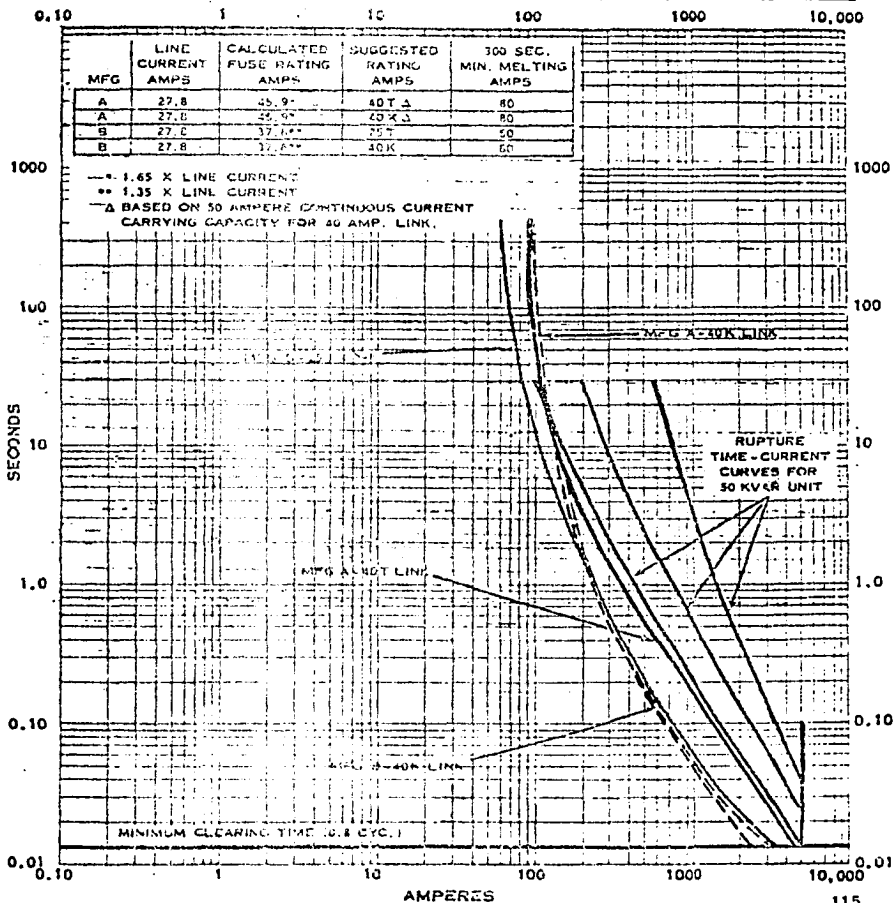
Este tipo de protección individual permite que un capacitor fallado salga de operación sin necesidad de desconectar el banco o toda una fase del mismo; esto garantiza la continuidad del servicio.

Los fusibles usados en protección individual son de pequeña corriente nominal y fáciles de coordinar, en forma segura, con las curvas de probabilidad de ruptura de los tanques de los capacitores; esto evita que una unidad al fallar dañe a otras próximas y permite ubicar fácilmente la falla facilitando el mantenimiento del banco.

La protección individual está limitada a bancos de cierto tamaño, debido al desbalanceo interno de voltaje que se produce en un banco al salir de opera-

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

SUGGESTED FUSING FOR 600 KVAR, 7200/12470 VOLT GRD. WYE OR 12000 VOLT DELTA CAPACITOR BANKS



ción algunas unidades. Como analizamos en el capítulo anterior, el desplazamiento eléctrico del neutro en bancos conectados en estrella con neutro flotante, ocasiona sobrevoltajes en los capacitores de la fase que hayan que dado con mayor impedancia. En el caso de bancos conectados en estrella con neutro a tierra o en delta, cuyas fases estén formadas por varias filas de capacitores en serie, el fallo y desconexión de algunas unidades en cierta fila puede ocasionar una redistribución de la caída de voltaje de dichas filas y poner en peligro a los capacitores restantes, a menos que el banco sea suficientemente grande para que no resulte significativo el desbalanceo de voltaje producido por unas pocas unidades que salgan de operación.

b. - Fusibles para grupo. -

Se usan para agrupamientos de capacitores para fases completas, principalmente en bancos cuyo pequeño tamaño no permite el uso de fusibles individuales. Se usan también como protección de cortocircuito cuando los fusibles individuales del banco no sean capaces de interrumpir las corrientes de cortocircuito del sistema o bien en bancos de gran tamaño cuyo complicado alambrado cuenta con muchas partes vivas que no quedan protegidas por fusibles individuales.

Por otra parte, cuando la corriente de fallo de un capacitor excede a 3000 amperes, los fusibles de grupo deben complementarse con fusibles individuales. Como fusibles de grupo se emplean los mismos tipos usados en protección individual.

2) Protección con relevadores. -

Los sobrevoltajes ocasionados por el fallo y/o desconexión de unidades

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

de los bancos, obligan a usar fusibles, sólo en aquellos casos en que el --
mentenimiento y las salidas intencionales de operación sean muy esporádi
cos. De no ser así, es conveniente utilizar los llamados sistemas de pro--
tección por desbalanceo; estos consisten básicamente en:

- Un desconectador (o juego de desconectores monofásicos) capaz de ope
rar el banco con carga.
- Un transformador o juego de transformadores de corriente o potencial --
que accionen el desconectador al percibir desbalanceos predeterminados --
como críticos.

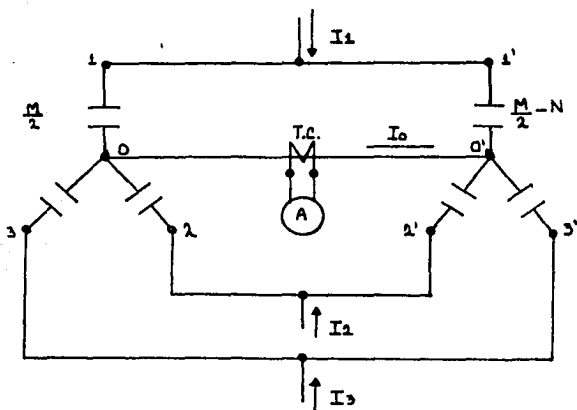
Los arreglos más importantes de protección por desbalanceo pueden--
resumirse en los siguientes grupos:

° Transformador de corriente o de potencial conectado entre los neutros de
un banco alambrado en estrella con neutro flotante, que ha sido dividido en
2 secciones generalmente iguales entre sí; dicho transformador alimenta -
a un relevador de corriente o voltaje que capta la señal de desbalanceo en--
tre ambas secciones del banco.

Se puede considerar que existe un sólo grupo con el doble de unidades en ca
da fase.

Al instalarse el sistema descrito, los fusibles de grupo pueden ser más ro
bustos; de esta forma, la protección de sobrevoltaje queda a cargo del re--
levador y los fusibles se encargan únicamente de proteger la instalación con
tra cortocircuitos múltiples en los capacitores o de proteger contra corto -
circuitos en los conductores de alimentación.

Para comprender mejor lo anterior, consideremos la siguiente figura:



El banco original de M capacitores, ha sido dividido en 2 estrellas de $M/2$ capacitores entre cuyos neutros O y O' se coloca un transformador de corriente que los une. Se en la fase $1'$ fallan N unidades que salen de operación al actuar sus fusibles individuales, el neutro común $O-O'$ sufrirá un desplazamiento eléctrico ocasionando un sobrevoltaje en los capacitores restantes en las fases 1 y $1'$. El desbalanceo entre ambas estrellas produce un flujo de corriente I_0 entre los neutros, que es posible relacionar con el sobrevoltaje S . Conocer la relación entre I_0 y S permite calibrar el relevador de corriente.

Siendo $S=0.1$ el máximo voltaje permisible excesivo y llamando I_n a la corriente nominal de cada fase del banco antes de que fallara ninguna unidad, el relevador debe originar la señal de apertura cuando detecte una corriente $I_0 = 0.15 I_n$, corregida según la relación de transformación de corriente.

°Juego de transformadores de potencial con los primarios conectados entre fases y neutro de un banco alambreado en estrella con neutro flotante, y los secundarios conectados en delta abierta alimentando un relevador de voltaje

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

capaz de detectar el desplazamiento del neutro.

°Transformador de potencial conectado entre tierra y el neutro de un banco alambrado en estrella con neutro flotante instalado en un sistema con neutro a tierra. El transformador alimenta un relevador de voltaje que detecta el desplazamiento del neutro.

°Juego de transformadores de potencial y relevadores de voltaje, conectados en cada fila de capacitores de un banco alambrado en delta o estrella con -- neutro a tierra, cuyas fases están formadas por varias filas de capacitores conectados en serie.

3) Protección con interruptores. -

Constituye otra opción para la protección de bancos de capacitores. Deben ser capaces de interrumpir cualquier cortocircuito entre fases o fase y tierra, así como la corriente de fallo de un capacitor.

En bancos alambrados en estrella con neutro flotante, esta última corriente suele ser mucho más pequeña que las corrientes de cortocircuito de la instalación; en tales casos, deben calibrarse los relevadores de corriente del interruptor, de forma que pueda interrumpir ambas corrientes en un tiempo lo suficientemente corto para que el tanque del capacitor fallado no se rompa.

En instalaciones de alta tensión, el interruptor debe usarse especialmente para la conexión y desconexión del banco. Un interruptor general no puede evitar el peligro de una ruptura violenta del tanque de una unidad, debido a que la corriente de fallo no suele exceder en una proporción adecuada a la corriente total con que opera el interruptor normalmente.

4) Protección con pararrayos. -

Se usa cuando los capacitores se encuentran conectados en líneas aéreas para protegerlos contra descargas atmosféricas o sobrevoltajes transitorios - (sobre todo en líneas de 100KV o más).

Existen rayos cuya energía llega a ser suficiente para cargar los capacitores a un potencia excesivo y hacerlos fallar. Según el voltaje vel tamaño del banco en KVAR, hay bancos que resultan autoprotegidos para descargas eléctricas de hasta 1 coulomb. La protección con pararrayos permite un aislamiento de los capacitores cuyo nivel es inferior al requerido para considerarlos auto protegidos.

B. - CONTROL. -

Cada día aumenta más el número de capacitores de potencia desconectables operados principalmente en forma automática. Esto permite la máxima explotación de los beneficios propios del uso de capacitores, cualquiera que sean las condiciones de la carga.

Básicamente sólo existen 2 categorías de información que pueden determinar el control de los capacitores:

I.- Información basada en mediciones eléctricas de las condiciones del sistema (watts, volts, amperes, vars).

II. - Información basada en mediciones no eléctricas (tiempo y temperatura).

El control basado en estas informaciones puede ser manual o automático.

Los elementos básicos de un control automático son: un elemento sensible ala magnitud física o variable de control y un juego de contactos capaces de obedecer al dispositivo sensible para operar el desconectador.

I. - Cuando la situación requiere mediciones eléctricas, el elemento sensor puede ser electromagnético, sólido o térmico; sea cual fuere el medio de -- medición la salida es un contacto de relevador que energiza la bobina de un -- contactor en aceite.

El control de KVAR se usa generalmente para circuitos de 4 hilos en estrella y el control de Kilowatts es aplicado generalmente para circuitos de 3 hilos -- en delta.

Hablando sin particularizar, los controles de VARS o AMPERES deben situar se en un punto donde exista una carga apreciable, mientras que un control de tensión puede estar aplicado en cualquier punto.

El control de amperes es más económico que el de VARS, pero es sensible a la corriente total más que a la reactiva. Sin embargo, el control de amperes tiene utilidad en aplicaciones de línea de amarre, ya que no es sensible a la dirección del flujo de la corriente.

A. - Controles de Voltaje. - Son los más comunes en la operación automática de bancos de capacitores. El elemento sensible es un voltímetro que puede -- abrir y cerrar los contactos que inician la operación del desconectador del -- banco. Operan en base a 120 volts y pueden usarse en lugares donde el volta je descienda al menos 4 volts en condiciones de plena carga.

El control debe calibrarse a un voltaje mínimo para que origine la conexión de los capacitores y a un voltaje máximo para que ocasione la desconexión de las unidades. La diferencia entre los voltajes límites se conoce como ancho de -- banda y debe elegirse siempre de forma que sea mayor que la elevación de -- voltaje que produce cualquier sección del banco al entrar en operación; esto -- evita operaciones repetitivas fuera de control ("bombeo del control").

Los controles de voltaje calibrados en forma estándar, no pueden ser usados en líneas reguladas de voltaje constante, ya que en estas zonas, durante los periodos de plena carga, el voltaje suele mantenerse más alto, lo que podría ocasionar que los capacitores salieran de operación cuando más se les necesita.

B. - Controles de corriente. - Se usan principalmente en líneas reguladas, donde los controles de voltaje no operan satisfactoriamente. El transformador de corriente que alimenta al elemento sensible de estos controles, se instala entre capacitores y carga para que pueda recibir la señal de corriente total demandada por la carga y acciones los capacitores en periodos pico. Si el control se instalara entre capacitores y generador, al entrar el banco en operación disminuiría la corriente detectada por el control y volverían a salir de operación los capacitores produciéndose oscilación.

C. - Control de voltaje compensado con corriente. - En estos controles se tiene un elemento sensible para cada magnitud. Mientras la corriente de las líneas se mantiene inferior a cierto valor predeterminado, el control se comporta como control de voltaje simple. Si la corriente en las líneas sobrepasa el límite, la calibración del elemento sensible a voltaje cambia por medio de un relevador y hace entrar en operación a los capacitores.

Esta situación prevalece mientras la corriente exceda el límite establecido a no ser que el voltaje de las líneas suba a un valor suficiente como para volver a cambiar la calibración del elemento sensible a voltaje, restableciendo las condiciones iniciales.

Este método de control permite usar los capacitores cuando más se les necesita, ya que aún en condiciones de baja carga pueden operar para restablecer

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

el voltaje en las líneas en caso de que se presente alguna perturbación que lo disminuya. Estos controles pueden usarse cerca de líneas reguladas y - eliminar la necesidad de reguladores.

D. - Controles de Kilovars. - Son controles de uso poco extendido debido a su alto costo y se aplican para limitar el suministro de potencia reactiva de los generadores, a un valor convenientemente pequeño. De esta forma, se reducen las pérdidas por efecto Joule y las caídas de voltaje en las líneas y - se permite la máxima capacidad de generación y transmisión.

Su elemento sensible es un medidor de potencia reactiva que origina la conexión de los capacitores cuando los reactivos proporcionados por el generador sobrepasan el límite prefijado.

II. - Los controles que involucran mediciones no eléctricas son básicamente - dos: de tiempo y de temperatura.

El switch de tiempo o reloj es el dispositivo más económico y fue el más usado durante un gran período. Se usan en líneas cuyas necesidades de potencia reactiva se presentan como función bien definida de las horas del día.

Su desventaja es que si la carga de la línea se reduce debido a alguna perturbación puede ser necesario sacar de operación los capacitores en forma manual para impedir sobrevoltajes. Además, en caso de producirse un apagón prolongado, debe recalibrarse la secuencia de operación de los relojes de - todos los controles instalados.

* Aplicaciones combinadas -

El control del voltaje tiene dos variantes generales: una que combina tiempo o temperatura con variaciones de tensión como un medio de refinamiento de control y otra que utiliza la tensión estrictamente como un rango adicio

nal en condiciones anormales o de emergencia.

La primera variante involucra mantener un nivel de tensión mayor durante ciertas horas o temperaturas; la segunda implica la entrada de los capacitores por medio del reloj, termostato o relevador de potencial, a menos que la tensión sea anormal.

RETRASO DE TIEMPO.-

En la operación de los diferentes controles para capacitores de potencia, existen normalmente retardos entre la detección de la señal de operación y la orden de operación en sí. Esto se hace con la doble finalidad de que el control no actúe excitado por algún fenómeno transitorio y de hacer posible la coordinación con algún otro sistema de protección o control.

Este tipo de ajuste en los controles es muy usado cuando se usan elementos térmicos, sobre todo en instalaciones de aire acondicionado. La carga que representa el equipo de aire acondicionado no varía tan rápidamente como la temperatura del aire, por lo cual debe evitarse el contacto prematuro. Esto es, la temperatura de disparo puede ajustarse lo suficientemente baja para evitar un disparo durante el enfriamiento normal de la noche y el ajuste de cerrar puede ser suficientemente alto para acomodar el calentamiento de la mañana.

+Controles de pasos múltiples.-

Se aplican al control de bancos de capacitores de secciones desconectables tanto en alta como en baja tensión.

En alta tensión se trata de grandes bancos cuya potencia reactiva debe ser suministrada en forma secuencial, de forma que no sobrepase las necesida

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

des de la carga.

En baja tensión, suele tratarse de bancos destinados a mantener el factor de potencia de una instalación industrial.

El elemento sensible de estos controles suele ser un voltímetro, un amperímetro o un medidor de potencia reactiva. Cada control opera los contactos o desconectores individuales de cierto número de secciones.

En la práctica el número máximo de secciones de un banco es de 8 a 10 - para evitar bombeos de control.

CONCLUSIONES

Cada día es más imperiosa la necesidad de llegar a un equilibrio justo entre las exigencias técnicas, constantemente en progreso y las limitaciones económicas, impuestas por la situación que vive el mundo en general y México en particular.

En el caso de la industria Eléctrica, de cuya eficacia y continuidad de servicio dependen prácticamente todas las otras industrias y servicios tan importantes como los de salud, comunicaciones y transportes, la búsqueda e implementación de recursos que optimicen la distribución de la energía con niveles de voltaje adecuados que garanticen la correcta operación del equipo eléctrico, es un factor que recibe especial atención.

Los capacitores de potencia han demostrado ser, en la práctica, un recurso económico y sumamente efectivo en el control de reactivos y la regulación del voltaje de los sistemas. Detrás de la sencillez de su selección e instalación, ofrecen una versatilidad enorme que los hace capaces de adaptarse a los diferentes problemas y solucionarlos en forma óptima.

Los avances en cuanto a materiales impregnantes, aislamientos, etc., permiten día a día, la fabricación de unidades más compactas y seguras haciendo posible el uso de los capacitores de potencia tanto en los enormes sistemas de generación y distribución de energía, como en pequeñas industrias.

BIBLIOGRAFIA

TEXTOS. -

1. - ELGERD, OLLE L. . - Electric Energy Systems Theory. An Introduction. - Ed. Mc Graw Hill. - New York, U.S.A. 1972
2. - STEVENSON, WILLIAM D. . - Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia. - Ed. Mc Graw Hill. Segunda Edición. - México - 1982.- pags. 190-210
3. - EDMINSTER, JOSEPH. - Teoría de Circuitos Eléctricos . - Ed. Mc Graw Hill. Serie Schaum . - México 1974. - Capítulo 7: Potencia y factor de potencia.
4. - SEARS, FRANCIS W. . - Electricidad y Magnetismo. Fundamentos - de Física. - Ed. Aguilar. Sexta Edición. - México 1980. - pags. 166-179, 182-211
5. - NAVARRO CRESPO, ALFREDO DR. . - Capacitores de Potencia. - Balmecc, S.A. Primera Edición. - México 1978.
6. - GROSS, CHARLES A.. - Análisis de Sistemas de Potencia. - Ed. - Nueva Editorial Interamericana. Primera Edición. - México 1982.- pags. 80-115, 216-232.

ARTICULOS.-

- 1.- VIQUEIRA, JACINTO ING. . - Producción de Potencia Reactiva en-

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

los sistemas eléctricos. - Cfa. de Luz y Fuerza del Centro. -
Noviembre de 1966.

2. - ARGUELLES, FERNANDO ING.. - Determinación de las necesidades de Capacidad reactiva en el Sistema. - Cfa. de Luz y Fuerza del Centro. - México 1966.
3. - SCHMILL, J.V. ING.. - Localización óptima de capacitores en derivación. - Cfa. de Luz y Fuerza del Centro. - México 1966.
4. - HEILIGMANN, VICTOR ING.. - Algunas nociones relativas a la operación de bancos de capacitores con el neutro aislado y a la protección de los mismos. - Cfa. de Luz y Fuerza del Centro México, 1966.
5. - Mc AULIFF, DAN ING.. - Control de capacitores de potencia. - Sangamo Electric Company. - U.S.A 1967
6. - CARBAJAL AGUILAR, FRANCISCO ING.. - Protección de Capacitores. - Balmec S.A.. - México 1966
7. - THACKER, WILLIAM. - Diseño e instalación de bancos de Capacitores. - Sangamo Electric Company. - U.S.A. 1967
8. - THACKER, WILLIAM. - Aplicaciones de capacitores de Potencia. - Sangamo Electric Company. - U.S.A. 1967
9. - CASTAÑEDA Z., JOSE LUIS ING.. - Estudio para resolver el problema de bajo voltaje en barras de 85KV de la subestación - Jilotepec C. F. E.. - Cfa. de Luz y Fuerza del Centro. - México, 1984.