

10
201



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

Corrección del factor de potencia
en una instalación Industrial

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
I N G E N I E R O
M E C A N I C O E L E C T R I C I S T A
P R E S E N T A

José Edi Cano Dámazo
Gustavo Edgardo Montiel Malanco

Director de Tesis:
Ing. Casildo Rodríguez Arniega

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



V N A M

CUAUTITLAN IZCALLI, Edo. de Méx.

1988



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E

INTRODUCCION

PAG.
1

CAPITULO I

PARAMETROS QUE CONTRIBUYEN A AFECTAR LA EFICIENCIA EN UNA INSTALCION ELECTRICA.

1.1. CORRIENTES ACTIVAS Y REACTIVAS.	4
1.2. POTENCIA REAL, REACTIVA Y APARENTE. TRIÁNGULO DE POTENCIAS.	8
1.3. FACTOR DE POTENCIA.	16
1.4. FORMA DE GENERAR POTENCIA REACTIVA.	19
1.5. MINIMIZAR PÉRDIDAS POR EFECTO JOULE .	20
1.6. REGULACIÓN DE VOLTAJE.	22
1.7. OBTENCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA EN UNA INSTALACIÓN INDUSTRIAL.	27

CAPITULO II

CONSIDERACIONES IMPORTANTES AL INSTALAR UN BANCO DE CAPACITORES.

2.1. EL CAPACITOR.	30
2.2. CLASIFICACIÓN.	35
2.3. COMPONENTES DE UN CAPACITOR.	41
2.4. PRUEBAS DE DISEÑO.	49
2.5. PRUEBAS DE RUTINA.	54
2.6. PRUEBAS DE CAMPO.	59

CAPITULO III

METODO DE CAPACITORES.

3.1.	POTENCIA NECESARIA EN CAPACITORES PARA CORREGIR EL FACTOR DE POTENCIA.	64
3.2.	BANCO DE CAPACITORES DE POTENCIA FIJOS O DESCONECTABLES.	70
3.3.	DECISIÓN DE INSTALAR UN BANCO DE CAPACITORES EN BAJA O ALTA TENSIÓN.	72
3.4.	CAPACITORES DE POTENCIA EN BAJA TENSIÓN.	74
3.5.	CAPACITORES DE POTENCIA EN ALTA TENSIÓN.	89
3.6.	CONEXIONES DE LOS BANCOS DE CAPACITORES EN ALTA TENSIÓN.	90
3.7.	CONEXIÓN Y DESCONEXIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES DE POTENCIA.	100
3.8.	PROTECCIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES EN BAJA O ALTA TENSIÓN.	108

CAPITULO IV

MAQUINA SINCRONA.

4.1	GENERALIDADES	124
4.2.	ESTRUCTURA DE LOS MOTORES SÍNCRONOS	125
4.3.	APLICACIONES DE LOS MOTORES SÍNCRONOS.	128
4.4.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS.	128
4.5.	PRINCIPIO DE OPERACIÓN.	129
4.6.	ARRANQUE DE LOS MOTORES SÍNCRONOS.	132
4.7.	FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR SÍNCRONO EN ESTADO PERMANENTE.	135
4.8.	CARGA EN LOS MOTORES SÍNCRONOS.	141
4.9.	CURVA V DE UN MOTOR SÍNCRONO.	145
4.1.0.	TENSIÓN GENERADA POR FASE DEL MOTOR SÍNCRONO.	149

CAPITULO V

METODO DEL MOTOR SINCRONO.

5.1. MEJORA DEL FACTOR DE POTENCIA USANDO MOTOR SINCRONO	160
5.2. CÁLCULO DEL F.P. O LOS KVA NECESARIOS DE UN MOTOR SINCRONO, PARA MEJORAR EL FACTOR DE POTENCIA A UN VALOR PREDETERMINADO.	166
5.3. CONDENSADORES SINCRONOS.	179
5.4. PROTECCIÓN DEL MOTOR SINCRONO.	182

CAPITULO VI

COMPARACION DE COSTOS

6.1. COSTOS DE ENERGÍA ELÉCTRICA.	186
6.2. COSTO DE CAPACITORES.	195
6.3. REDUCCIÓN DEL COSTO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA AL INSTALAR CAPACITORES.	197
CONCLUSIONES	202
BIBLIOGRAFIA	203

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

Es necesario un desarrollo de las fuentes de energía para efectuar un trabajo útil, necesario para un progreso industrial.

La industria hoy en día tiene el problema de un rápido crecimiento en sus instalaciones, para esto se han hecho grandes esfuerzos técnicos para tener un mejor aprovechamiento de los recursos energéticos.

Considerando que los sistemas eléctricos de potencia desde la generación hasta el consumo requieren mantener el suministro de energía eléctrica en forma continua en cantidad y calidad que es lo que requieren los distintos usuarios. Es por esto que las instalaciones industriales que tienen bajo factor de potencia, que ocasionan un aumento de intensidad de corriente y una caída de voltaje en las líneas de transmisión y distribución y por consiguiente el aumento en la capacidad de las plantas generadoras y un costo excesivo en los conductores, con este motivo se llegó a un acuerdo entre suministrador y consumidor de tener que pagar un sobreprecio por concepto de tener un bajo factor de potencia en su instalación, dicho factor de potencia es fijado por la Compañía Suministradoras, que en este caso esta estipulado el factor de potencia mínimo al 85% atrasado. De ser menor a este se le aplicará la cláusula penal de bajo factor de potencia.

Como en toda industria se tienen aparatos que para funcionar requieren de cierta cantidad de energía magnética, como por ejemplo: transformadores, motores, máquinas

de soldar etc.

Cuando la instalación del usuario es perfecta, -- esto es, que todos los transformadores, motores, se encuentran funcionando al 100% de su carga, en este caso el factor de potencia de la instalación esta entre el 0.8 y 0.9 -- atrasado, pero esta condición no puede mantenerse durante -- todo el día, y mucho menos durante todo un mes, ya que en -- ocasiones los transformadores y motores estarán funcionan-- do a media carga o en vacío.

Como hemos dicho el consumidor procurará mante--- ner un factor de potencia tan aproximado al 100% como sea -- posible, pero en caso de que su factor de potencia durante cualquier mes tenga un promedio menor del 85% atrasado, el suministrador tendrá derecho a cobrar al consumidor la cantidad correspondiente que resulte de multiplicar el monto -- del recibo por 0.85 y dividir el producto entre el factor -- de potencia medido atrasado, en por ciento observado duran-- te el mes.

En muchos dispositivos eléctricos uno de los pa--- rámetros que más interesa es el de la potencia. Por ejem-- plo, es importante conocer la potencia suministrada por un alternador, la potencia consumida por un motor eléctrico, -- la potencia emitida por una emisora de radio o de televisión, etc.

La potencia "P" puede tomar valores positivos o -- negativos, según el intervalo o el tiempo que se considere. Una potencia P positiva significa una transferencia de e---

nergía de la fuente a la red, mientras que una potencia P negativa, corresponde a una transferencia de energía de la red a la fuente.

En las aplicaciones industriales se suele trabajar con cargas inductivas, por lo que la intensidad se retrasa respecto de la tensión aplicada. La potencia activa P entregada a la carga es una medida de trabajo útil por unidad de tiempo que puede realizar la carga. Esta potencia P se transmite normalmente a través de líneas y transformadores.

Actualmente para corregir el bajo factor de potencia existen dos métodos: por medio de capacitores o por medio de motor síncrono. El método de capacitores es el más económico comparado con el método del motor síncrono, así como también es más fácil de emplear en instalaciones ya existentes, los capacitores son dispositivos estáticos, por tal motivo son de fácil mantenimiento y por ello, que generalmente se emplean más a nivel industrial.

El método del motor síncrono tiene ciertas ventajas en las grandes instalaciones nuevas o en proceso de expansión, proporcionan un trabajo mecánico y al mismo tiempo pueden actuar como una carga capacitiva en caso de operar sobreexcitadamente, aunque puede emplearse como ayuda para mejorar el factor de potencia no es una forma de compensación fácil de controlar.

C A P I T U L O I

PARAMETROS QUE CONTRIBUYEN A AFECTAR LA EFICIENCIA EN UNA INSTALACION ELECTRICA.

1.1. CORRIENTES ACTIVAS Y REACTIVAS.

Una partícula oscila cuando se mueve periódica--- mente con respecto a la posición de equilibrio. Por defi--- nición, decimos que una partícula que se mueve a lo largo - del eje de la "X" tiene un movimiento armónico simple o al--- terno, cuando su desplazamiento "X" respecto al origen del sistema de coordenadas está dado en función del tiempo, por la relación:

$$X(t) = A \text{ Sen } (wt + \phi)$$

La cantidad $wt + \phi$, se denomina fase, y por ello ϕ es la fase inicial; esto es, su valor cuando $t=0$, A es la amplitud del movimiento armónico simple o alterno, este movimiento esta expresado senoidalmente aunque tambien pue--- de expresarse cosenoidalmente. La función seno o coseno -- varía entre -1 y +1 es decir entre -A y +A.

Por lo tanto tomando la corriente y el voltaje - como una oscilación alterna, se dice que la tensión y la intensidad de corriente son funciones senoidales del tiem--- po y se representan gráficamente con la misma escala de tiem--- po, apareciendo un desplazamiento relativo entre ambas mag--- nitudes, que solo es nulo en el caso de tratarse de un ele--- mento resistivo puro. Dicho desplazamiento es el ángulo de fase y nunca es superior a 90° o $\pi/2$ radianes. Al hablar

de ángulo de fase se considera el que forma la intensidad de corriente con la tensión, por lo tanto para el voltaje y la intensidad de corriente quedan las siguientes expresiones:

$$V(t) = V_m \text{ Sen } \omega t$$

$$I(t) = I_m \text{ Sen } (\omega t \pm \infty)$$

Por otra parte se sabe que las corrientes generadas, en la práctica son corrientes alternas trifásicas, dichas corrientes se obtienen por medio de un alternador, que es una máquina generadora que tiene 3 espiras dispuestas -- con un ángulo de 120° entre sí y un campo magnético giratorio.

En redes eléctricas de corriente alterna, hay --- dos tipos de cargas, cargas óhmicas o resistivas y cargas - reactivas.

Las cargas resistivas toman corrientes que se encuentran en fase con el voltaje aplicado, y la energía eléctrica que consumen se transforma en trabajo mecánico, en calor o en cualquier otra forma de energía. Este tipo de corriente se conoce como corriente activa, observar fig. I-1.

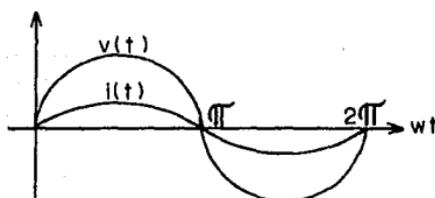


Fig. I-1 representación gráfica de la corriente activa.

Las cargas reactivas ideales toman corrientes que se encuentran defasadas 90° con respecto al voltaje aplicado, la energía eléctrica no se consume en ellas, se almacena en forma de campo eléctrico o magnético durante un corto tiempo o periodo y se devuelve a la red en un tiempo -- idéntico al que tardó en almacenarse, esto se repite periódicamente. Las corrientes de este tipo se conocen como corrientes reactivas.

Las cargas reactivas pueden ser inductivas o capacitivas. Las cargas inductivas como son: líneas de transmisión y distribución, transformadores, lámparas fluorescentes, motores eléctricos, equipo de soldar, hornos de inducción, bobinas de reactancia, etc. tienen la particularidad de atrasar la corriente con respecto a la tensión, si la carga fuera 100% inductiva, el atraso de la corriente sería de 90° geométricos, figura I-2.

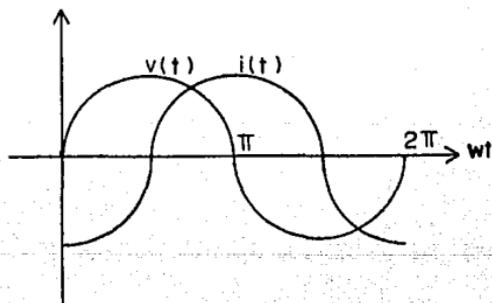


Fig. I-2 representación gráfica de una corriente reactiva inductiva

Las cargas capacitivas como motores síncronos y capacitores, tienen la propiedad de adelantar la corriente con respecto de la tensión, el adelanto también puede ser de 90° geométricos si la carga fuera 100% capacitiva, figura I-3.

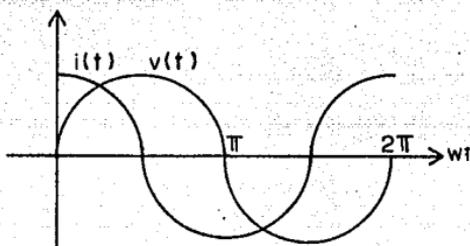


Fig. I-3 representación gráfica de una corriente reactiva capacitiva

Una vez que se conocen los tres tipos de cargas por conectar y la posición que guarda en cada caso el vector corriente con respecto al vector tensión, que es el que se toma como eje o plano de referencia. Hay que tener presente que en todo circuito o instalación eléctrica real, es imposible tener el 100% de un solo tipo de carga.

Solamente en cargas como lámparas incandescentes y aparatos de calefacción la carga reactiva es nula y se --

le considera puramente resistiva, y su corriente es considerada solo corriente activa.

Por lo demás, todo cálculo se hace tomando en cuenta en que pueden presentarse las siguientes combinaciones.

- a) Cargas resistivas e inductivas.
- b) Cargas resistivas y capacitivas.
- c) Cargas inductivas y capacitivas.
- d) Cargas resistivas, inductivas y capacitivas.

De las combinaciones anteriores, el ángulo entre los vectores tensión y corriente, o ángulo de defasamiento podría ser mayor o menor de 45° ($\cos 45^{\circ} = 0.7071$) adelantado o atrasado según sea el tipo de carga prevaleciente, sin embargo, generalmente es atrasado y cercano su valor a la unidad, pues no es permitido tener un factor de potencia menor de 0.85 (ángulo de defasamiento no mayor de 31°).

1.2. POTENCIA REAL, REACTIVA Y APARENTE. TRIANGULO DE POTENCIAS.

Potencia activa o real: es necesario plantear el parámetro de la potencia que es el más importante, por esto mismo se necesita saber que potencia suministran los alternadores y que potencia es consumida por las cargas.

Para explicar correctamente el cálculo de la potencia activa, se consideran 4 casos importantes en cuya instalación se encuentran elementos pasivos.

a) Teniendo solamente un elemento inductivo en nuestra --
 instalación y aplicándole una tensión de la forma -----
 $V(t) = V_m \text{ Sen } (\omega t)$ y una intensidad de corriente de -----
 $I(t) = I_m \text{ Sen } (\omega t - \pi/2)$, figura I-4.

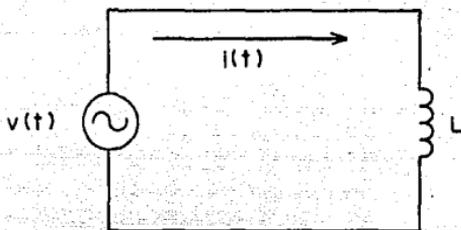


Fig I- 4

Se sabe que la potencia instantánea se obtiene de
 realizar el producto de la tensión por la intensidad

$$P(t) = V(t) I(t)$$

Por lo tanto el valor de la potencia instantánea
 esta representada por la siguiente expresión.

$$P(t) = V(t) I(t) = V_m I_m (\text{Sen } \omega t) (\text{Sen } \omega t - \pi/2)$$

Como:

$$\text{Sen}(\omega t - \pi/2) = -\text{Cos } \omega t \quad \text{y}$$

$$\text{Sen} x \text{ Cos } x = 1/2 \text{ Sen } 2x$$

Por lo tanto

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

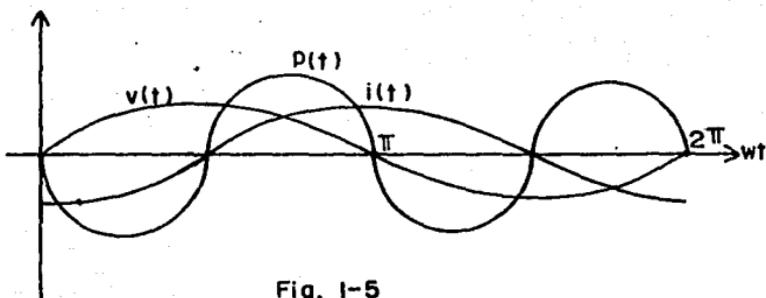


Fig. 1-5

b) Teniendo solamente elementos capacitivos en nuestra ---
 instalación, y aplicando la tensión $V(t) = v_m \text{Sen } \omega t$ y una -
 corriente de $I(t) = I_m \text{Sen } (\omega t + \pi/2)$, la potencia instantá-
 nea queda representada por la siguiente expresión, Fig. I-6.

$$P(t) = 1/2 V_m I_m \text{ Sen } 2\omega t$$

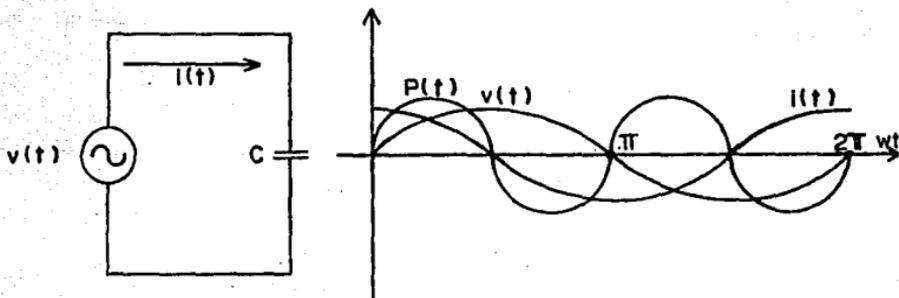


Fig. 1-6

c) Teniendo solamente elementos resistivos, y aplicando — una tensión $V(t) = V_m \text{ Sen } \omega t$ y una corriente $I(t) = I_m \text{ Sen } \omega t$ la potencia instantánea queda representada por:

$$P(t) = V_m I_m (\text{Sen } \omega t) (\text{Sen } \omega t)$$

$$P(t) = V_m I_m \text{ Sen}^2 \omega t$$

Como: $\text{Sen}^2 \omega t = 1/2 (1 - \text{Cos } 2\omega t)$

Por lo tanto:

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

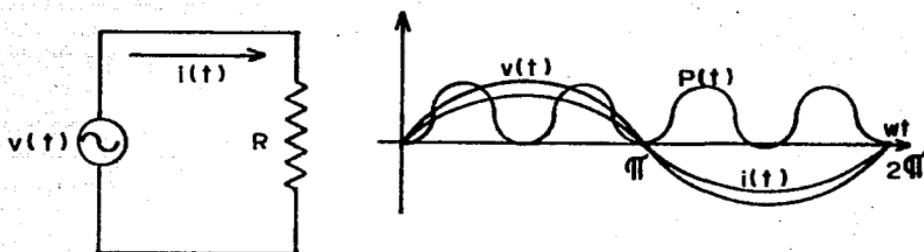


Fig. 1-7

d) Por lo tanto tomando el caso general, considerando los tres elementos pasivos: inductivo, capacitivo y resistivo. Y aplicando una tensión $V(t) = V_m \text{ Sen } \omega t$ y una corriente — $I(t) = I_m (\text{Sen } \omega t + \theta)$, donde θ es el ángulo de fase positivo o negativo.

$$P(t) = V(t)I(t) = V_m I_m (\text{Sen } \omega t)(\text{Sen } \omega t + \theta)$$

Trigonometricamente:

$$\text{Sen}(wt + \theta) = \text{Sen } wt \text{ Cos } \theta + \text{Sen } \theta \text{ Cos } wt$$

Substituyendo

$$P(t) = V_m I_m \text{ Sen } wt (\text{Sen } wt \text{ Cos } \theta + \text{Sen } \theta \text{ Cos } wt)$$

Desarrollando:

$$P(t) = V_m I_m \text{ Sen}^2 wt \text{ Cos } \theta + V_m I_m \text{ Sen } wt \text{ Cos } wt \text{ Sen } \theta$$

Trigonometricamente:

$$\text{Sen } wt \text{ Cos } wt = 1/2 \text{ Sen } 2wt$$

$$\text{Sen}^2 wt = \frac{1 - \text{Cos } 2wt}{2}$$

Substituyendo en la ecuación anterior:

$$P(t) = \frac{V_m I_m}{2} \text{ Cos } \theta (1 - \text{Cos } 2wt) + \frac{V_m I_m}{2} \text{ Sen } \theta \text{ Sen } 2wt$$

Esta expresión nos muestra matemáticamente la potencia instantánea con todas sus componentes.

El término:

$$\frac{V_m I_m}{2} \text{ Cos } \theta (1 - \text{Cos } 2wt)$$

Es la potencia instantánea que tiene su valor máximo en $V_m I_m \text{ Cos } \theta$ y un mínimo en cero, por lo tanto si queremos encontrar el valor medio de esta expresión, encontraremos la potencia real o activa que es la que suministra energía para desarrollar el trabajo físico.

$$P(t) = \frac{V_m I_m}{2} \text{ Cos } \theta$$

Tomando en cuenta los valores eficaces del voltaje y la corriente:

$$V = \frac{V_1}{2} \quad ; \quad I = \frac{I_m}{2}$$

Tenemos:

$$P = VI \cos \theta$$

La unidad de potencia activa en el sistema MKS es el vatio (W); como múltiplos se emplea el kilovatio -----
 1 KW = 1000 W. El $\cos \theta$, es el factor de potencia en una -
 instalación industrial.

La expresión siguiente tiene un valor máximo de $\frac{V_m I_m}{2} \text{ Sen} \theta$ y un mínimo de $-\frac{V_m I_m}{2} \text{ Sen} \theta$ cuyo valor medio es cero.

A dicho valor máximo $\frac{V_m I_m}{2} \text{ Sen} \theta$ se le conoce como potencia reactiva.

$$Q = \frac{V_m I_m}{2} \text{ Sen} \theta$$

Tomando los valores eficaces de corriente y voltaje nos queda la expresión

$$Q = VI \text{ Sen} \theta$$

La potencia aparente "S" es el producto del ---
 voltaje y la corriente, para un sistema monofásico, fig. I-8.

$$S = VI$$

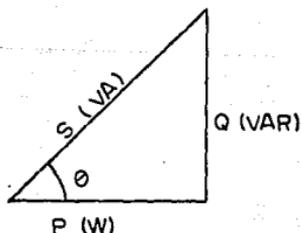


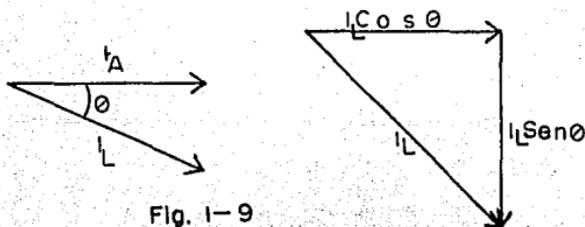
Fig. I-8

Triángulo de potencias:

Las expresiones anteriores que nos representan la potencia real, aparente y reactiva, se pueden representar geoméricamente mediante un triángulo llamado triángulo de potencias.

Como se había dicho existen 3 tipos de cargas: -- inductivas, capacitivas y resistivas, en las inductivas se defasa la corriente 90° en retraso con respecto a el voltaje, en las capacitivas la corriente esta defasada 90° en adelante con respecto a el voltaje y en las resistivas el voltaje y la corriente estan en fase.

Al coseno del ángulo θ , que se forma entre la corriente activa I_a con la corriente I_L (corriente total) se llama factor de potencia, debido a que relaciona la potencia real consumida $P = VI \cos \theta$ y la potencia aparente que llega a la instalación, figura I-9.



Pasando del triángulo de corrientes al triángulo de potencias para una carga nos queda (la carga inductiva), observar figura I-10.

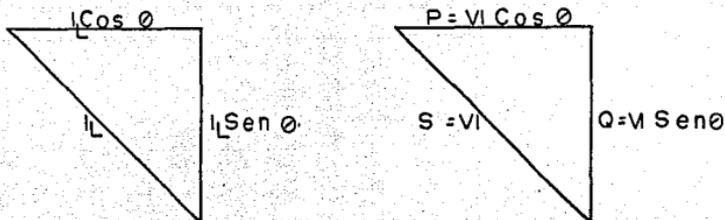


Fig. I-10

Teniendo en cuenta el triángulo de corrientes para un sistema capacitivo, observar figura I-11.

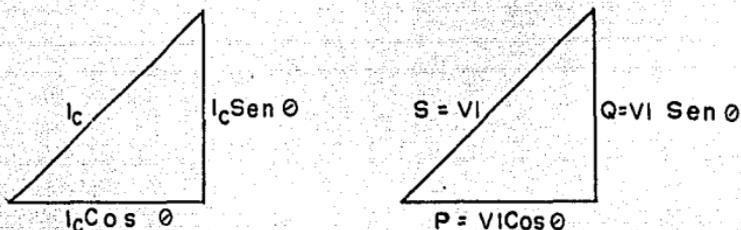


Fig. I-11

Habiendo expresado las potencias a travez de un triángulo de potencias, aplicando el teorema de Pitágoras a dicho triángulo nos queda:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Al relacionar las potencias reactiva y activa -- siguiendo el modelo geométrico, la potencia total puede -- encontrarse por medio de la relación de el triángulo de potencias como sigue:

$$\begin{aligned} (KVAR)^2 + (KW)^2 &= KVA^2 \\ \sqrt{(KVAR)^2 + (KW)^2} &= KVA \end{aligned}$$

Con el valor anterior podemos tener también:

$$\sqrt{(KVA)^2 - (KW)^2} = KVAR$$

o bien:

$$\sqrt{(KVA)^2 - (KVAR)^2} = KW$$

1.3. FACTOR DE POTENCIA.

El factor de potencia relaciona la potencia real consumida y la potencia que llega a la planta.

$$\cos \theta = \frac{KW}{KVA} \quad \text{o} \quad \text{F.P.} = \frac{KW}{KVA}$$

Un bajo factor de potencia indica una mala eficiencia eléctrica la cual es siempre costosa ya que el consumo de potencia activa es menor que el producto volts por amperes (potencia aparente). El circuito ve la potencia aparente consumida, pero la carga eléctrica usa solo la potencia activa. El voltaje del sistema permanece constante, -- entonces, si los voltamperes (potencia aparente) exceden a los watts (potencia activa), es una instalación que está requiriendo corriente extra de las líneas de alimentación -- siendo la causa del aumento de la potencia aparente sobre -- la potencia activa.

Veamos algunas razones de porqué un bajo factor de potencia resulta costoso:

1.- Un bajo factor de potencia aumenta a la Compañía Suministradora el costo de suministrar la potencia activa, porque más corriente tiene que ser transmitida y este costo más alto se le cobra directamente al consumidor industrial por medio --

de la cláusula de bajo factor de potencia, incluida en las tarifas.

2.- Un bajo factor de potencia también causa sobrecarga en los generadores, transformadores y líneas de distribución -- dentro de la misma planta industrial: caídas de voltaje y -- pérdidas de potencia se tornan mayores de lo que deberían -- ser. Todo esto representa pérdidas y desgaste en equipo -- industrial.

3.- Un bajo factor de potencia reduce la capacidad de carga del sistema eléctrico de la planta.

Como el producto Volts-amperes (KVA) excede a la potencia activa (KW), se presenta una componente de potencia reactiva (KVAR). Esto se debe a que la corriente de operación consiste de dos partes. Una parte se transforma -- en trabajo productivo y la otra que sirve para crear campos magnéticos necesarios para la operación, que en caso de no tomarse medidas de corrección estos campos magnéticos pueden ser excesivos, creandose pérdidas por calentamiento. Esta corriente reactiva tiene que ser suministrada ya sea por -- la Compañía de Energía Eléctrica, o por el generador de la planta en adición a la corriente que si contribuye a efec-- tutar trabajo productivo. De esta manera se obliga a la -- fuente de suministro de energía eléctrica a trabajar más de lo necesario.

Por otra parte en las plantas mismas, un bajo --- factor de potencia causa caídas excesivas de voltaje y ---- potencia, debido a que tanto los conductores de alimentación como el equipo de distribución son en la mayoría de los casos muy pequeños para llevar ambas corrientes; la reactiva

y la activa. Si el sistema de alambrado de la planta es -- suficiente para la carga existente se puede aumentar su capacidad para tomar más carga, mejorando el factor de potencia y así eliminar la corriente reactiva al máximo.

En una instalación industrial en la que existe bajo factor de potencia los generadores tienen que proporcionar la corriente reactiva requerida por los aparatos de inducción, siendo este el motivo de que su capacidad productiva se vea grandemente reducida, así mismo la capacidad nominal de los transformadores se ve mermada en los kilowatts de potencia disponible, además de provocar una deficiencia en la relación de voltaje. Los alimentadores no pueden ser aprovechados en toda su capacidad o bien se haría necesario el empleo de un equipo mayor para suplir esta corriente, -- aumentando desde luego el capital invertido por las compañías de energía eléctrica y por consiguiente las tarifas -- por servicio eléctrico aplicadas al consumidor de acuerdo a su factor de potencia.

1.4. FORMA DE GENERAR POTENCIA REACTIVA.

a) Motores síncronos.

Algunas veces se usan motores síncronos en vez de motores de inducción por su habilidad en mantener un factor de potencia favorable. Estos motores pueden llenar -- muchas funciones de los motores de inducción y si operan -- a baja carga, no necesitan equipo para corrección del factor de potencia. El costo de un motor síncrono es bastante considerable y a esto agreguese el costo de los controles y excitadores de corriente directa. Por último el costo por mantenimiento de este equipo es considerable.

b) Capacitores.

Para uso general de plantas industriales, el medio más práctico para mejorar el factor de potencia es el uso de capacitores. Las mismas Compañías suministradoras -- los usan. El uso de capacitores representa una positiva economía, tanto en su instalación como en su mantenimiento. Carecen de partes móviles que puedan deteriorarse o representar un riesgo para el empleado.

La corrección del factor de potencia por medio -- de capacitores es un método muy flexible, ya que estos se -- pueden conectar en cualquier lugar y en cualquier cantidad necesaria, se encuentran a la venta en tamaños que se ajustan a cualquier capacidad de motor y se pueden acondicionar en los puntos de la línea donde más se necesitan.

Las pérdidas en los capacitores son despreciables -- y si quedaran conectados a la línea después de desco--

nectar los motores su consumo de energía sería insignifi-
cante. Se pueden obtener tanto para instalaciones interio-
res como para uso a la intemperie y para cualquier nivel --
de voltaje. Su vida útil varía entre los 10 y 20 años; ---
dependiendo de las condiciones de operación.

1.5. MINIMIZAR PERDIDAS POR EFECTO JOULE.

Cuando existen corrientes muy grandes en una ---
instalación eléctrica, se produce un calentamiento en dicha
instalación, esta energía calorífica se disipa en el medio
ambiente y es conocida como pérdida por efecto Joule.

Al corregir el factor de potencia, ya sea por ---
el método de motor síncrono o por medio de capacitores, se
obtienen beneficios, como es la reducción de las pérdidas
por efecto Joule.

En efecto, las pérdidas por calor producidas en -
las instalaciones provienen tanto de las corrientes acti---
vas como de las corrientes magnetizantes o reactivas.

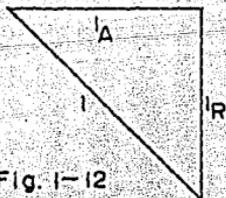


Fig. I-12

De la fig. I-12 las corrientes activa y reactiva --
se suman teóricamente para dar la corriente total o aparen-
te en la instalación, tal como se mediría en un amperímetro.
De esto se deduce que ambas corrientes contribuyen a las --

pérdidas por efecto Joule.

Cuantitativamente las pérdidas son precisamente en los conductores de la instalación, por lo que la resistencia influye directamente en ella. Llamando P a estas pérdidas y R a la resistencia total de la instalación.

$$P = RI_A^2 + RI_R^2$$

Donde:

$$I^2 = I_A^2 + I_R^2$$

Substituyendo:

$$P = RI^2$$

Si llamamos P_1 a las pérdidas con un factor de potencia igual a $\cos \theta_1$ y P_2 a las pérdidas con un factor de potencia mejorado con alguno de los métodos de corrección igual a $\cos \theta_2$, además se supone que ni la potencia activa ni la tensión varían apreciablemente, entonces:

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

Esta relación nos muestra las corrientes tomadas antes y después de aplicar el método de corrección.

La siguiente expresión nos muestra la disminución por efecto Joule.

$$\%P = 100 \left[\frac{P_1 - P_2}{P_1} \right]$$

Donde:

$\%P$ = Disminución de pérdidas por efecto Joule en tanto por ciento.

Teniendo en cuenta que:

$$P_1 = RI_1^2$$

$$P_2 = RI_2^2$$

Substituyendo tenemos que:

$$\%P = 100 \left(1 - \frac{RI_2^2}{RI_1^2} \right)$$

Finalmente tenemos:

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

Expresión final que nos da la reducción de pérdidas por efecto Joule en tanto por ciento al mejorar el factor de potencia.

1.6. REGULACION DE VOLTAJE.

Consideremos un caso muy sencillo en una línea de transmisión, cuya capacitancia puede considerarse despreciable, representando cualesquiera de las fases mediante un circuito equivalente, el cual se muestra enseguida.

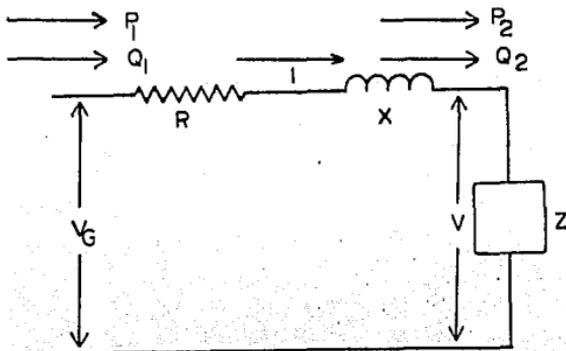


Fig. 1-13

Este circuito también nos puede representar un transformador despreciando la corriente de excitación, hacia una instalación industrial con carga Z .

Vamos a llamar V_G a la tensión de operación del generador, que es prácticamente constante, V a la tensión que llega a la carga, I a la corriente que circula por cada fase de la línea, la resistencia y reactancia están representada por R y X respectivamente, siendo esta última de carácter inductivo en el caso de líneas operando con una carga superior a su carga crítica.

La figura I-14 nos muestra una representación vectorial de las caídas de tensión en la línea y en la carga.

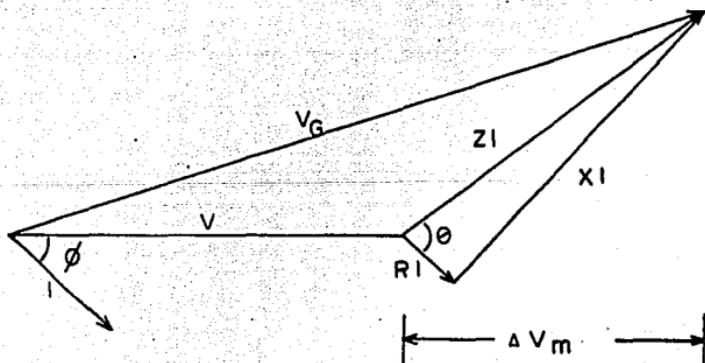


Fig. I-14

La caída de tensión en la línea es la suma de RI y XI , y depende de la corriente que circula por la misma, dependiendo esta de la potencia solicitada por la carga "Z". De la figura, el diagrama vectorial va a variar según varíe la demanda de potencia en KW de la carga (en el caso de la potencia reactiva la demanda en las instalaciones industriales suele experimentar variaciones menores que la de la potencia activa). Por lo tanto, al aumentar la demanda de potencia activa, aumentará la corriente I , existiendo una caída de tensión total en la línea, como V_G es constante (en módulo), esto implica una disminución de V (en módulo), siempre que los ángulos θ y ϕ se mantengan constantes.

La variación del módulo de la tensión producida por la variación de carga, debe limitarse a valores muy pequeños para no afectar el funcionamiento de los aparatos eléctricos alimentados por el sistema. Una forma económica y eficaz de lograr esta regulación, consiste en controlar el ángulo θ o el ángulo ϕ por medio de cualquier método de corrección del factor de potencia, ya sea en las líneas de distribución o en los centros de consumo, resultando así dos procedimientos posibles de regulación de tensión.

a) Compensación de la línea.

Disminuyendo el ángulo θ , siendo la relación $\tan\theta = X/R$, la caída de tensión total en la línea disminuye y por lo consiguiente aumenta la tensión total V .

b) Compensación en la carga.

Disminuyendo el ángulo ϕ o sea aumentar el $\cos \phi$, los vectores V_G y V tienden a formar un triángulo isósceles y como V_G es más o menos constante, V aumenta. Más aún, como la corriente disminuye, la caída de tensión es menor, por lo tanto la tensión V también permanece más o menos constante.

En la práctica las magnitudes de V_G y V son más grandes que la caída de tensión en las líneas, por lo que podemos considerar que la caída $[V_G - V]$ de la regulación de tensión se puede sustituir por un valor aproximado.

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

Definiendo

$$\mu = \frac{\Delta V}{V} \quad \text{Caída de tensión relativa}$$

$$KW = \sqrt{3} KV I \cos \phi$$

Sustituyendo:

$$\mu = \frac{R}{10^3 \sqrt{3} (KV)^2} KW + \frac{X}{10^3 \sqrt{3} (KV)^2} KW \tan \phi$$

En la práctica se debe procurar que μ no sobrepase un valor prefijado que es regularmente bastante pequeño, y manteniéndose la tensión V casi constante.

Sabemos que, la máxima potencia transportable por una línea específica, teniendo en cuenta a μ , se obtendrá cuando se anule el segundo término de la expresión anterior, es decir, que debemos anular las componentes reactivas de --

la línea, reduciendo el ángulo ϕ tanto como sea posible. --
Entonces la potencia máxima esta dada por:

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

Igualando esta expresión con la anterior se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{R}{10^3 \sqrt{3}} \frac{KW_{\max}}{(KV)^2} &= \\ &= \frac{R}{10^3 \sqrt{3}} \frac{KW}{(KV)^2} + \frac{X}{10^3 \sqrt{3}} \frac{KW \tan \phi}{(KV)^2} \end{aligned}$$

Despejando KW_{\max}

$$KW_{\max} = KW \left(1 + \tan \phi \frac{X}{R} \right)$$

Pero como $\frac{X}{R} = \tan \theta$ tenemos:

$$KW = \frac{KW_{\max}}{1 + \tan \theta \tan \phi}$$

Esta expresión es aproximada, considerando ΔV --
igual a $|V_g - V|$, pero el resultado es aceptable siempre
y cuando se opere con valores inferiores a 0.95 y valores --
de μ del orden del 5%, si no se recurre a la fórmula más --
exacta que tambien se deduce de $\Delta V = |V_g - V|$.

La expresión encontrada anteriormente nos permiti-
te encontrar o conocer la potencia activa que es posible --
transportar sin llegar a producir caída de tensión que so-
brepase al porcentaje de μ , ya que KW_{\max} depende de μ ,
en función del factor $\tan \theta$ y el factor de potencia a que --
se efectúa la transmisión.

1.7. OBTENCION DEL FACTOR DE POTENCIA EN UNA INSTALACION INDUSTRIAL.

Cuando se requiere determinar el factor de potencia en una instalación industrial existen varios métodos, de los cuales mencionaremos los más importantes:

A) A través del consumo global de energía.

Cuando la carga alimentada no está sujeta a grandes variaciones durante el tiempo de trabajo, se puede medir el factor de potencia medio, que se define por la siguiente expresión.

$$\cos \theta = \frac{KWh}{\sqrt{(KWh)^2 + (KVARh)^2}}$$

Siendo:

KWh = Kilowatts-hora consumidos durante el mes.

KVARh = Kilovars-hora consumidos durante el mes.

Dichas magnitudes KWh y KVARh, suelen estar especificadas en los recibos mensuales de la Compañía Suministradora. Algunas veces los recibos traen directamente el $\cos \theta$ medio, es decir el factor de potencia medio durante el mes.

Si durante las horas de trabajo se presentan variaciones de la carga, y si las cargas principalmente son de equipos de distinta naturaleza, resulta más conveniente medir el factor de potencia a plena carga y posteriormente determinar los KVAR capacitivos necesarios, bajo estas mismas condiciones.

B) Con un indicador del factor de potencia.

En este caso en particular se mide el factor de potencia en una forma directa, midiendo simultaneamente los KW consumidos a plena carga. Ya teniendo el factor de potencia y los KW consumidos se procede a determinar los KVAR capacitivos necesarios.

C) Con un vatímetro, un voltímetro y un amperímetro.

Por medio de un vatímetro se mide la potencia consumida o sea la potencia activa a plena carga. En estas mismas condiciones también se mide el voltaje entre fases y el amperaje por fases. Ya con estas lecturas obtenidas, se procede a hacer el cálculo de la potencia aparente en KVA a plena carga con la expresión siguiente:

$$KVA = \sqrt{3} (KV) I$$

y finalmente se calcula el factor de potencia de la instalación por medio de la siguiente fórmula:

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

D) Método de los dos vatímetros.

Con este método, es necesario conectar ambos instrumentos como se muestra en la figura I-15, para así proceder a tomar las lecturas de los dos vatímetros en KW_1 y KW_2 respectivamente, en condiciones de plena carga.

Teniendo ambas lecturas se procede a calcular la relación siguiente:

$$K = \frac{KW_1}{KW_2}$$

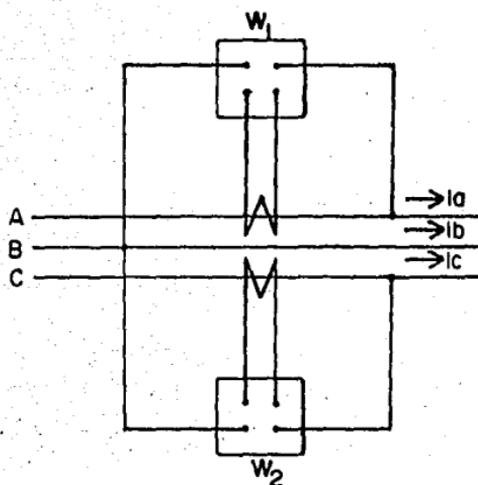


Fig. 1-15

Dicha relación puede resultar positiva o negativa, según sean los signos de las magnitudes KW_1 y KW_2 .

Una vez obtenida esta relación, se procede a calcular el factor de potencia por medio de la expresión.

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

Hay que tener en cuenta que la potencia activa total de la instalación industrial es la suma de las dos lecturas que se obtuvieron, $KW = KW_1 + KW_2$.

C A P I T U L O I I

CONSIDERACIONES IMPORTANTES AL INSTALAR UN BANCO DE CAPACITORES DE POTENCIA.

1.1. EL CAPACITOR.

Es un dispositivo eléctrico estático que sirve para almacenar y liberar energía eléctrica en función al valor instantáneo de la tensión aplicada.

En su forma más simple, un capacitor consiste en un par de láminas metálicas separadas entre sí. El espacio entre las láminas tiene importancia porque contribuye al almacenamiento de la carga eléctrica en las placas. Este espacio está ocupado por un aislante o dieléctrico como: el aire, vidrio, cerámica, papel impregnante o plástico.

La cantidad de energía almacenada por un capacitor está en función de la habilidad del mismo para retener y de la tensión aplicada. Esto se puede expresar en la siguiente forma:

$$Q = CV \quad \text{-----} \quad \text{II-1}$$

Donde:

Q = Carga eléctrica almacenada

C = Capacitancia

V = Tensión aplicada

$$C = \frac{K \cdot A}{d} \quad \text{-----} \quad \text{II-2}$$

Donde:

d = Distancia entre placas

A = Área de las placas

K = Constante dieléctrica

Esta última ecuación nos indica que la carga almacenada en un capacitor es directamente proporcional a las características del dieléctrico y al área entre las placas del mismo, e inversamente proporcional a la separación de las placas.

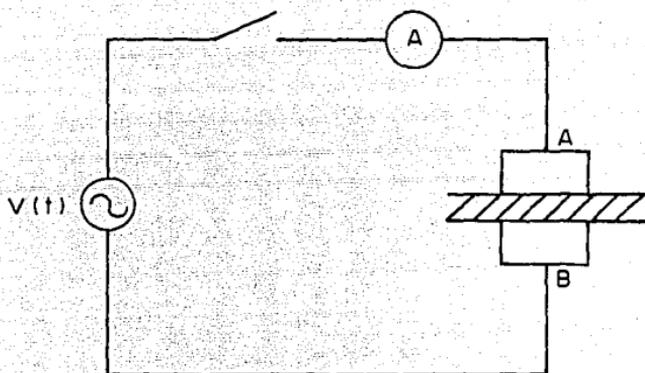


Fig. 2-1

En la fig anterior 2-1 antes de cerrar el switch, el circuito esta en equilibrio y las placas separadas por el dieléctrico son neutras eléctricamente; pero al cerrar el circuito se rompe el equilibrio debido a la diferencia de potencial de la batería o generador conectado a las pla-

cas. Esta diferencia de potencial se provoca por un exceso de electrones en la terminal negativa y un déficit en la terminal positiva, formandose una corriente de electrones hacia las placas; como las placas están juntas la carga positiva de una de ellas ejerce una fuerza de atracción sobre los electrones de la otra placa, pero como el dieléctrico es un material aislante, no permite el paso directo de la corriente de una placa a la otra. Este bloqueo provoca un movimiento de electrones libres o cargas negativas que van primero hacia una placa, luego hacia la otra, marchando por el resto del circuito y no a través del dieléctrico.

La carga total de un capacitor es la cantidad total de electricidad que ha fluido en el circuito hacia las placas del mismo, dicho en la siguiente relación.

$$Q = It \quad \text{----- II-3}$$

Donde:

- Q = Carga en Coulombios
- I = Corriente de carga en amperes
- t = Tiempo de carga en segundos

Por otra parte, según vimos la relación en la ecuación II-1 la carga es proporcional al voltaje o sea $Q = CV$, si igualamos estas ecuaciones tenemos que $It = CV$, de donde se obtiene:

$$C = \frac{It}{V} \quad \text{----- II-4}$$

Lo que quiere decir que la capacitancia en un circuito es directamente proporcional a la corriente en amperes que fluye en el circuito en un lapso de tiempo, e

inversamente proporcional a la tensión aplicada en volts.-- En esta forma la unidad de la capacitancia es el faradio, -- resultando esta una unidad demasiado grande, por esta razón se emplea el microfaradio que es igual a una millonésima de faradio.

Refiriendose a lo que hemos dicho anteriormente -- del capacitor, recordemos que éste carga cuando el voltaje aumenta de cero hacia su máximo en cualquier sentido y descarga cuando la onda de voltaje disminuye de su máximo a -- cero. Así el capacitor carga y descarga dos veces en cada ciclo, siendo la carga total, la cantidad máxima de electricidad que es forzada a entrar en él. La figura 2-2 ---- representa la carga y descarga del capacitor en un ciclo.

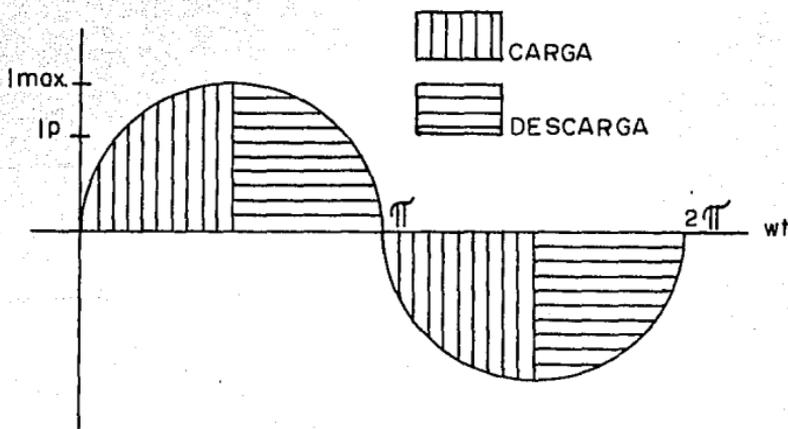


Fig. 2-2

Si volvemos a la ecuación II-3, considerando la corriente de carga como un valor promedio tenemos:

$$Q = I_p t \quad \text{----- II-5}$$

Por otra parte, según se pudo apreciar en la figura de carga y descarga del capacitor tenemos:

$$T = 1/4 \text{ de ciclo} = 1/4 f \quad \text{----- II-6}$$

Y si en la ecuación II-1 sustituimos nuevamente II-3 pero damos a V su valor máximo, podemos igualar -----

$CV = I_p t$, pero:

$$I_p = \frac{2}{\pi} I_{\max} \quad \text{----- II-7}$$

Sustituyendo tenemos que:

$$CV_{\max} = \frac{2}{\pi 4f} I_{\max} = \frac{I_{\max}}{\pi 2f}$$

De donde:

$$V_{\max} = \frac{I_{\max}}{2\pi fC} \quad \text{----- II-8}$$

Teniendo en cuenta un sistema puramente capacitivo, el factor de proporcionalidad entre el voltaje y la corriente es la reactancia capacitiva, esto es:

$$V_{\max} = X_c I \quad \text{----- II-9}$$

Sustituyendo en la ecuación II-8, tenemos:

$$X_c I = \frac{I_{\max}}{2\pi fC}$$

En donde:

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} \quad \text{----- II-10}$$

Los capacitores corrigen un bajo factor de potencia debido a que la corriente adelantada, que se encuentra en un circuito capacitivo, se opone a la corriente atrasada de un circuito inductivo, si ambos circuitos se combinan en uno solo, los efectos de la capacitancia tienden a cancelar los efectos de la inductancia. Un capacitor correctamente escogido proporciona una cancelación perfecta. Debe de evitarse que exista mucha o poca capacitancia, pues de lo contrario no existiría suficiente corrección al retraso o existiría un ángulo de defasamiento adelantado, que produciría el mismo efecto indeseable de un defasamiento retrasado.

2.2. CLASIFICACION

En las ecuaciones anteriores, vimos que al hablar de capacitores intervienen factores tales como el voltaje, y la frecuencia, factores que además de otros no menos importantes, determinan en forma directa la clasificación a los capacitores por su capacidad, por su voltaje de operación y por el tipo de enfriamiento que los mismos requieren.

a) Por su capacidad.

Los capacitores deben estar diseñados para trabajar en servicio continuo a la potencia reactiva nominal, a condición de que les sea aplicada la tensión y la frecuencia nominales.

Los capacitores deben entregar al circuito una potencia reactiva no menor a la nominal y no mayor de un 115% de ésta, a tensión y frecuencia nominales, cuando el capacitor se encuentre a una temperatura de 25°C.

Los capacitores deben operar satisfactoriamente - hasta 135% de su potencia nominal. Esta potencia máxima debe incluir además de la nominal, la suma de las siguientes potencias.

- 1.- Potencia reactiva debida a exceso de tensión, a la frecuencia nominal.
- 2.- Potencia reactiva debida a tensiones, a otras frecuencias o armónicas sobrepuestas a la frecuencia fundamental.
- 3.- Potencia reactiva en exceso, debido a las tolerancias de manufactura.

El límite de 135% sobre la potencia reactiva nominal, puede ser excedido si las condiciones descritas, se presentan con sus tolerancias máximas simultáneamente.

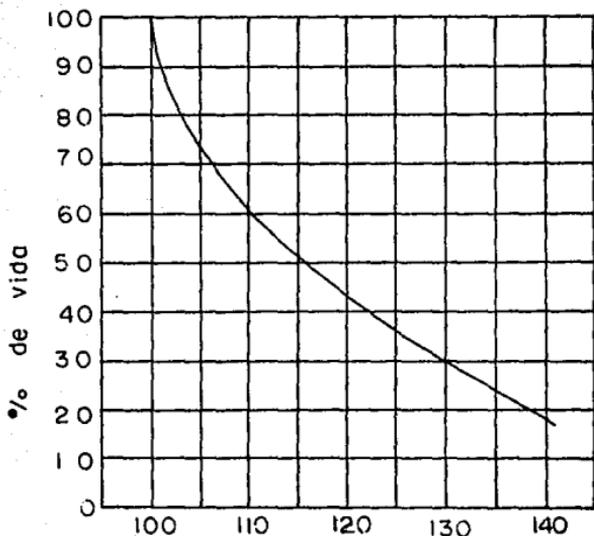
Con el propósito de tener una solución lo más favorable posible, los fabricantes de capacitores han estudiado de antemano los diseños de acuerdo a las necesidades, y han establecido capacitores estándares que combinados entre sí, proporcionan los KVAR necesarios en cada caso. Estas capacidades varían desde 1.6 hasta 300 KVAR.

b) Por su voltaje de operación.

También en este concepto se han establecido va---

lores estándares en función de el número de valores en el voltaje de operación. La tensión nominal de un capacitor unitario puede ser igual o menor que la tensión nominal del capacitor complemento, dependiendo de la forma de conexión de los mismos. Los capacitores deben ser adecuados para conectarse a un circuito, ya sea entre fases o entre fase a neutro o a circuitos con neutro sólido a tierra, que corresponden a sus límites de tensión.

Todos los capacitores se pueden operar con un exceso de voltaje hasta de un 100% de la tensión nominal, cuando la temperatura no exceda de los 70°C. Sin embargo, la aplicación de un sobrevoltaje ocasiona un calentamiento interno mayor, lo que trae como consecuencia, un aumento de la tensión del papel dieléctrico acortando la vida del capacitor.



% Sobrevoltaje Aplicado

Debe tomarse en cuenta que durante las maniobras de conexión y desconexión y pérdida repentina de carga, la tensión de un sistema puede elevarse momentáneamente por encima del valor de la tensión máxima de trabajo. Se considera que un capacitor soporta estas condiciones transitorias si cumple con las pruebas dieléctricas establecidas. Las tensiones transitorias también se pueden presentar por descargas atmosféricas. En este caso los capacitores deben soportar la aplicación de un impulso como se indica en tablas posteriormente.

Los capacitores se diseñan para operar en baja tensión, es decir, de 216 a 600 volts, y su aplicación más común es en todo tipo de industrias, ya que al instalarse en estas tensiones se facilita su manejo. También se diseñan para operar en alta tensión, es decir, desde los 2400 hasta 23000 volts. Estos capacitores se aplican en donde se requiere resolver problemas en el lado de alta tensión, regular voltaje en la línea de distribución o simplemente aliviar líneas en estas tensiones.

En la siguiente tabla se mencionan algunos voltajes de operación.

BAJA TENSION	ALTA TENSION	ALTA TENSION
tres fases	tres fases	monofásicos
230	2 400	2 400
240	4 160	2 770
460	6 900	3 600
480	9 960	4 160

---	11 560	4 800
---	12 470	6 640
---	13 280	6 900
---	14 400	9 960
----	23 000	11 560
-----	-----	12 470
-----	-----	13 280
-----	-----	13 800
-----	-----	14 400
-----	-----	19 920
-----	-----	23 000

TABLA: Voltaje de operación en capacitores.

c) Por el tipo de enfriamiento.

Por aire. Las características nominales de capacitores enfriados por aire, están basadas en una temperatura máxima del recipiente la cual debe aparecer anotada en la placa.

Los capacitores deben ser acomodados de tal manera que proporcionen una buena circulación de aire alrededor de cada unidad, y la ventilación del equipo debe ser tal que no se exceda la temperatura específica del recipiente. Esta temperatura debe ser verificada frecuentemente por el usuario.

En el caso de enfriamiento por aire forzado, la cantidad de aire por minuto debe estar de acuerdo con la especificación del fabricante. La operación de los ventiladores deben verificarse regularmente y la temperatura de la entrada del aire no debe ser mayor a 40°C.

Debido a que estos capacitores pueden operar por periodos cortos dentro de un rango más o menos seguro, después de una falla en el sistema del flujo de enfriamiento, se recomienda que el arreglo sea diseñado para operar con alarma en el caso de operar esta.

Si los capacitores son expuestos a las radiaciones del sol o de cualquier superficie con alta temperatura, puede ser necesario proteger a los capacitores de dicha radiación. La necesidad de tal protección depende de la temperatura ambiente, la intensidad de la radiación y la cantidad de enfriamiento.

Enfriamiento por agua. Las características nominales de los capacitores enfriados por agua, están basados en la máxima temperatura del agua de entrada, es decir, que no exceda de 30°C , la cantidad de agua de enfriamiento debe ser tal que la temperatura del agua de salida no exceda el valor dado en la placa. La temperatura del agua de salida debe verificarse gradualmente, se debe especificar la cantidad de agua de enfriamiento requerida a diferentes temperaturas de entrada. Se deben colocar indicadores de flujo en cada línea hidráulica para verificar si la cantidad de agua de enfriamiento es suficiente, estos indicadores de flujo de agua y la temperatura, deben ser combinados con un dispositivo de alarma para regular un flujo apropiado de agua en cualquier momento.

Debe verificarse que la presión del agua no exceda el valor indicado en la placa. El agua de enfriamiento debe estar libre de sedimento o de material corrosivo que pueda interferir con el flujo, se debe verificar que el --

flujo sea el adecuado antes de energizar los capacitores y después a intervalos regulares.

d) Por su frecuencia de operación.

Casi todos los capacitores se diseñan para operar a 60 Hz pero pueden ser operados a frecuencias más bajas. - Esto implica una disminución en la potencia reactiva proporcionada que es directamente proporcional a la frecuencia y al cuadrado del voltaje aplicado.

Resulta un aumento en las temperaturas del envase y del dieléctrico de un capacitor, al operarlo en frecuencias más altas que las fijadas. Las pérdidas generadas son en función de los volts-amperes y el factor de disipación del capacitor, estas a su vez aumentan con una frecuencia de operación más alta, por lo tanto, es muy importante que se tomen en cuenta al aplicar un voltaje la frecuencia fundamental más alta o componentes de armónicas de alta frecuencia.

Los rangos de frecuencia que se usan para capacitores van desde los normales de 50 y 60 ciclos por segundo, hasta algunos especiales como son de 180, 400, 800, 1000, 10 000 y 20 000 ciclos por segundo. Estos últimos - capacitores son empleados sobre todo en hornos de inducción, hornos metalúrgicos de arco y grandes motores que entran y salen de operación frecuentemente.

2.3. COMPONENTES DE UN CAPACITOR.

A.- Dieléctrico.

Cuando vimos lo referente a la estructura del ca-

pacitor, pudimos percatarnos que el dieléctrico usado según esa exposición, era el aire; pero en realidad este no es práctico usarlo, generalmente se han usado componentes como el vidrio, cerámicas, aceites, resinas, papel y plásticos, entre los que se ha encontrado como más económico y práctico es el papel.

El papel, junto con el aluminio forman la sección enrollada y aplanada, que es el corazón del capacitor. El papel está hecho para satisfacer las normas más rígidas, y el papel que en estos casos se usa es el tipo Kraft, que es un papel sumamente fino, esta hecho a base de pulpa de pino y abeto, una vez que la pulpa es molida por un máquina especial, es lavada en agua destilada libre de contaminantes. Cuando la pulpa está completamente lavada, queda libre de clorhidratos, sulfatos y otros materiales. La pulpa una vez limpia, se amasa con un líquido rebajante a relación de 60 galones de agua por cada libra de pulpa, esta mezcla es centrifugada para remover cualquier partícula que pueda haber contaminado el rebajante durante el lavado.

La mezcla se bombea sobre un cedazo en movimiento a una relación uniforme. El agua contenida es drenada a través del cedazo por gravedad, permitiendo que en la superficie del cedazo se vayan quedando las fibras de madera, estas fibras se arreglan ellas mismas en forma tal constituyendo en sí, capas de papel de grandes dimensiones físicas. Las fibras después pasan a través de una serie de rodillos para que se compriman y a la vez quitar el agua excedente. Posteriormente los rollos ya formados son calentados para

obtener un producto totalmente seco; despues se somete a un proceso llamado de superprogramación para comprimir el papel obteniendo los espesores deseados.

Este papel es conocido como papel Kraft, tiene -- buenas propiedades eléctricas, es relativamente barato, se consigue en grandes cantidades y es fácil de manejarlo. Dentro del capacitor actúa como espaciador entre las placas de aluminio o electrodos; presenta una porosidad del orden del 50%, por lo que es capaz de retener una proporción considerable de líquido impregnante. En la tabla siguiente se puede apreciar que la fibra de celulosa tiene una constante -- dieléctrica de aproximadamente 6, el aire contenido en los poros del papel reduce aproximadamente este valor a 2.

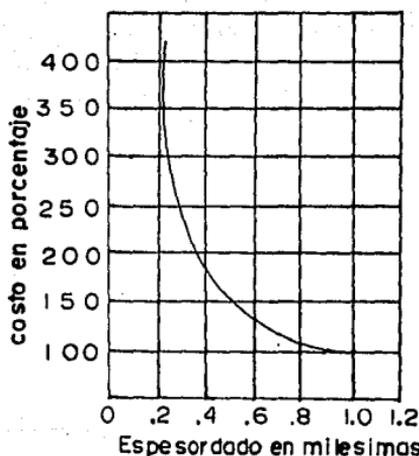
MATERIAL	CONSTANTE DIELECTRICA
Aire	1
Papel	2
Aceite mineral	2.3
Papel impregnado de diaclor	5.6
Fibra de celulosa	6

En esta tabla se indica la constante dieléctrica de varios materiales.

Sin embargo si el aire contenido en estos poros se desplaza por un líquido dieléctrico tal como el diaclor, la constante dieléctrica para el papel llega a un valor de aprximadamente de 5.9. Este valor tan alto de la constante dieléctrica del papel impregnado hace que sea muy útil -- para la construcción económica de los capacitores; otra ---

característica importante de este tipo de papel impregnado es su factor de potencia más bajo que el de otros materiales aislantes.

Las consideraciones que se deben de tomar para la elección del papel deben ser dadas con cuidado, particularmente desde el punto de vista económico. En la gráfica siguiente se muestra la curva relativa al costo del papel, -- esta curva nos indica que para 1.0 milésima de espesor del papel, el costo es del 100%, y un costo más alto para el papel más delgado. De lo anterior resulta que el papel usado en capacitores es generalmente el más económico.



Gráfica representativa del costo del papel.

La densidad del papel dieléctrico se debe considerar en el diseño del capacitor, porque la calidad y el costo de la unidad se ve afectado por ello. Las manufactur--
 ras de papel han establecido como norma que la densidad --
 para este tipo de papel sea de un gramo por centímetro cúbico (1 gr/cm^3), pero si se quieren densidades más bajas --
 se obtienen a un costo extra. La siguiente tabla nos mues--
 tra las características del papel para capacitores:

DENSIDAD	FACTOR DE PERDIDAS A 30° C	CONSTANTE DIELECTRICA	COSTO
1.0	0.130%	2.3	100%
0.9	0.120%	2.0	115%
0.8	0.100%	1.8	128%

Características del papel.

El espesor de cada hoja de papel usado es de ---
 0.00066'' (0.016764 mm), y se usa el número de hojas que --
 sea necesario para dar el espesor deseado entre electrodos.-
 Por ejemplo, si usamos cinco hojas se obtendrá un espesor -
 de 0.0033'' (0.8382 mm). El hecho de usar varias capas de
 papel es hacer más flexible cada sección y para obtener un
 mejor aislamiento, puesto que aún el papel más puro tiene -
 partículas conductoras y al poner varias capas, las proba-
 bilidades de alinear esas partículas conductoras son muy -
 remotas. Pues las especificaciones para este papel perm--
 iten un máximo de una partícula conductor por pie cuadrado -
 de papel.

B.- Componente conductora.

En los primeros ensayos de capacitores se usaron hojas de papel de estaño laminado para formar las placas conductoras, pero avances técnicos sobre este concepto, -- han logrado substituir este material por el aluminio como un material ideal para este propósito, el aluminio tiene -- resistividad más baja que el estaño o el plomo; es decir -- tiene aproximadamente una quinta parte de la resistividad -- del estaño y una décima parte del plomo, por lo que resulta con mucho menos pérdidas.

El aluminio que se usa en los capacitores es en forma de laminillas con espesor de 0.00025" (0.00635 mm) y 99.4% de pureza. Debe estar libre de aceites, suciedades y otros agentes contaminantes; este aluminio se conoce como super dry foil (aluminio super seco).

La manufactura de las secciones o bobinas de papel y aluminio se llevan a cabo bajo condiciones atmosféricas controladas; temperatura, humedad y pureza. Estas condiciones son esenciales para asegurar un producto de buena calidad. Este mismo material se usa en las terminales de sección pero con espesor mayor o sea de 0.003" X 0.05" (0.0762 X 1.27 mm), y se usan cuatro de estas terminales -- por sección:

C.- Líquido impregnante.

El diacolor es el líquido dieléctrico usado para la impregnación del papel, es un producto conocido como -- difenil clorado. Esta sustancia es un derivado del benceno (C_6H_6), y es usado por su alta resistencia a la oxidación, se obtiene por medio de la sustitución de algunos ato

mos de hidrógeno por átomos de cloro, la constante del difenil clorinol varía con el porcentaje de clorinación.

El difenil clorado tiene un punto bajo de congelación de -50 a -60°C , tiene una alta constante dieléctrica de 5.9 dependiendo del grado de alogenación. Debe tener un alto grado de pureza, por lo que el difenil clorinol es pasado unas 300 veces através de una malla llena de tierra la cual sirve como filtro en el cual se remueven las partículas. La resistencia eléctrica es muy alta, lo cual es muy importante en un dieléctrico. En la figura 2-3 se muestra una molécula de difenil clorado.

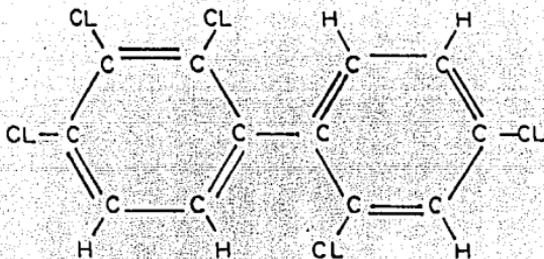


Fig. 2-3

El diaclor es la materia básica de los capacitores por su característica de inflamabilidad, esto quiere decir que no se propaga ningún fuego por falla del capacitor.

D.- Aislamiento general.

Cuando las secciones son colocadas en el interior del bote, deben contenerse en un medio aislante para prevenir averías eléctricas entre las partes vivas y la tierra del bote. Esto se consigue encimando varias hojas de papel Kraft hasta lograr el espesor deseado, en la misma forma -- que cuando se hizo para formar el dieléctrico en los rollos. El conjunto de secciones se envuelven en varias capas de papel Kraft de 0.010'' (0.254 mm), logrando de esta manera -- una máxima seguridad eléctrica entre estos elementos.

E.- Bote y terminales de porcelana.

El conjunto de secciones individuales se encierran en botes de lámina negra o de acero inoxidable para -- proteger las partes internas del capacitor de la contaminación, sirve para dar rigidez al capacitor, facilitar la instalación y servir como sellador hermético ya que también -- contiene el líquido dieléctrico; estas son las funciones -- del bote.

La tapa del bote en algunos diseños es atornillada para formar la unidad, en otros diseños va soldada sobre la parte superior y contiene dos o tres boquillas terminales de porcelana, soldadas a un collarín a base de estaño, y este a su vez a la tapa. Con este método se obtiene hermetismo perfecto.

F.- Resistencia de descarga.

En paralelo con las terminales del capacitor, se conecta una resistencia de carbón de un valor tal que re--

duce el valor de carga residual a 50 volts en cinco minutos, contando a partir de la desconexión del aparato de la línea. La composición química de esta resistencia debe ser tal --- que no ataque ni sea atacada por el dióxido de cloro.

2.4. PRUEBAS DE DISEÑO.

a) Prueba de tensión en corriente continua.

Esta prueba se efectúa en el área del embobinado a cada una de las bobinas ya terminadas y se lleva a cabo --- con el fin de comprobar que el dieléctrico usado en la bobina es el adecuado; para esta prueba se debe contar con --- una fuente de corriente directa, un voltímetro, un amperímetro, un cronómetro y protección por sobrecorriente.

La tensión se aplica a través de las terminales de la bobina en forma gradual para evitar variaciones bruscas, pero lo más rápido posible, hasta alcanzar el valor de ---- 6.25 veces la tensión nominal, manteniendo este valor durante 10 segundos. Después de este tiempo se disminuye la tensión rápidamente también en forma gradual.

Si durante la prueba se presenta descarga disruptiva la ruptura del dieléctrico, se considera que la bobina no ha pasado la prueba. Si la falla del dieléctrico no es evidente, se debe comprobar el buen estado del capacitor --- por medio de la medición de la potencia reactiva.

b) Prueba de tensión de impulso.

Esta prueba se efectúa con objeto de comprobar --- que el aislamiento usado entre las bobinas que forman el ---

capacitor y el recipiente, esten en perfectas condiciones. Para esta prueba se requiere de un generador de impulsos, - un osciloscopio con cámara fotográfica y un voltímetro de - esfera. Esta prueba debe tomar en cuenta la altura sobre - el nivel del mar a la cual va a trabajar el capacitor, ya que la boquilla es un aislamiento externo que se vé afectado por esta condición.

Cuando la prueba se efectúa a las diferentes altitudes que el capacitor va a trabajar, se permite probar - por separado la boquilla aplicando ciertos factores de corrección por condiciones atmosférica, y durante la prueba - del aislamiento interno del capacitor se permite aumentar - la distancia de fuga del aislamiento externo en el caso de que ocurra una descarga disruptiva.

Se aplican cinco impulsos consecutivos de polaridad positiva y cinco de polaridad negativa, con una onda de 1.2 X 50 microsegundos y teniendo un valor de cresta de acuerdo con los valores de la tabla siguiente.

Tensión nominal del capacitor.		Tensión alterna aplicada entre terminales y recipiente.		Tensión de impulso en KV valor de cresta.	Clase de aislamiento.
		Int.	Ext.		
0	-300	3000	10 000	30	0.6
300	-1200	5000	10 000	30	1.6
1201	-5000		26 000	75	8.7
5001	-15000		34 000	95	15.0
11560	-15000		40 000	125	18.0
11560	-25000		50 000	125	25.0

La tabla anterior nos indica los valores de sobre tensión y de tensión de impulso aplicado entre terminales - y recipiente.

La aplicación del impulso debe hacerse entre las terminales conectadas entre sí, y el recipiente del capacitor

Si durante la aplicación de las dos series de -- cinco impulsos, no ocurre ninguna descarga se considera -- que el capacitor pasa satisfactoriamente la prueba. Si -- durante la aplicación de las dos series de cinco, ocurren dos o mas descargas disruptivas, se considera que el capacitor no paso la prueba. Si durante la aplicación de las -- dos series de impulsos ocurre solo una descarga, en una c -- ambas series, se deben aplicar diez impulsos adicionales de la misma polaridad que la de la serie en donde ocurrió la falla. Si al aplicar los impulsos adicionales ocurre una - o más descargas disruptivas, se considera que el capacitor no paso la prueba.

c) Prueba de estabilidad térmica.

Para efectuar esta prueba deben tomarse de un lote de capacitores, cuando menos tres de ellos, los tres deben ser tales que sus pérdidas y capacitancias sean del mismo orden, medidas a tensión y frecuencia nominales y a una temperatura interna mínima de 100°C.

Debe montarse el capacitor bajo prueba en un recinto cerrado, en medio de los dos capacitores testigos. La distancia entre unidades deben ser la mínima recomendada, - para que se obtenga las temperaturas internas máximas.

Debe mantenerse el aire en el interior del recinto de prueba, a circulación natural a una temperatura media de 46°C. La temperatura interior de las paredes del recinto de prueba debe estar dentro de más o menos 5°C, con la relación a la temperatura ambiente del recinto mismo.

La temperatura ambiente debe medirse por medio de un termopar fijo sobre la superficie del recipiente de un capacitor desenergizado idéntico al de prueba, colocado también en el interior del recinto de prueba. El termopar se debe fijar en posición tal, que los efectos de la radiación de los demás capacitores energizados sean mínimos.

Los tres capacitores de muestra se deben energizar por medio de una tensión de prueba determinada como sigue:

$$V_p = 1.1V_n \frac{W_f}{W_r}$$

Donde:

- V_p = Tensión de prueba
- V_n = Tensión nominal
- W_f = Pérdida máxima en Watts
- W_r = Pérdida real en Watts del capacitor bajo prueba

La pérdida W_f se debe calcular usando una tensión aplicada de 110% V_n y el producto máximo de capacitancia y factor de potencia, medido a tensión y frecuencia y a una temperatura interna o del recipiente igual a 100°C o mayor.

La tensión de prueba se debe mantener constante - dentro del más o menos 2% durante las últimas 24 horas de la prueba.

La temperatura del capacitor bajo prueba se debe medir por medio de termopares fijos sobre la tapa y caras laterales con exactitud de más o menos 1°C como máximo.

Se debe considerar el capacitor bajo prueba como térmicamente estable, si la temperatura máxima del recipiente del capacitor, llega y permanece en un valor constante, con una variación máxima por un periodo de 24 horas.

d) Prueba de radio interferencia.

No existe normatizado aún todavía el equipo a usarse en esta prueba por lo que actualmente se realiza por medio de una fuente de voltaje.

Los capacitores se deben probar con una tensión aplicada de 115% de su tensión nominal V_n y a frecuencia nominal.

Las unidades de una sola terminal aislada, en los que se usa el recipiente como segunda terminal, se debe probar con el recipiente conectado a prueba.

Las unidades que tengan dos o más terminales aisladas del recipiente se deben probar con éste conectado a tierra y con sus terminales conectados entre sí, la tensión de prueba se aplica entre las terminales conectadas entre sí y el recipiente del capacitor.

El capacitor bajo prueba debe estar aproximadamente a la misma temperatura ambiente del recinto de prueba.

ba. Las boquillas de porcelana del capacitor deben estar secas y totalmente limpias. El capacitor bajo prueba debe estar montado en su posición normal respetando las distancias críticas.

El resultado será el valor en microvolts de tensión de radio-interferencia medida.

e) Prueba de decremento de tensión.

El capacitor bajo prueba se debe energizar a tensión alterna nominal o a una tensión de corriente directa de 1.41 veces el valor eficaz de la tensión alterna.

Un voltímetro debe conectarse al capacitor antes de energizarlo, tanto para registrar el valor de la tensión como su decremento despues de que se haya desenergizado. -- Por medio del cronómetro se debe medir el tiempo que tarda en reducir la tensión a 50 volts o menos, a partir del instante de haber desenergizado la unidad.

2.5. PRUEBAS DE RUTINA.

A diferencia de las pruebas de diseño, éstas son menos rígicas, más sin embargo ninguna de ellas debemos -- pasar por alto, ya que la calidad del producto depende en gran parte de que se hagan las pruebas dentro del proceso de fabricación.

a) Determinación de la potencia reactiva.

El objeto es comprobar que los capacitores suministren la potencia reactiva nominal indicada, por medio de la medición de la capacitancia, para lo cual se debe de contar con los siguientes equipos de control y medición:

- A. Fuente de alimentación con control de tensión
- B. Transformador elevador
- C. Transformador de corriente
- D. Transformador de potencial.
- E. Amperímetro
- F. Voltímetro
- G. Banco de inductancias variables
- H. Puente de capacitancias con clase de aislamiento adecuada para el capacitor que se prueba y precisión de más o menos del 2%.

El circuito de la fig. 2-4 es el que se ocupa para --
dicha prueba.

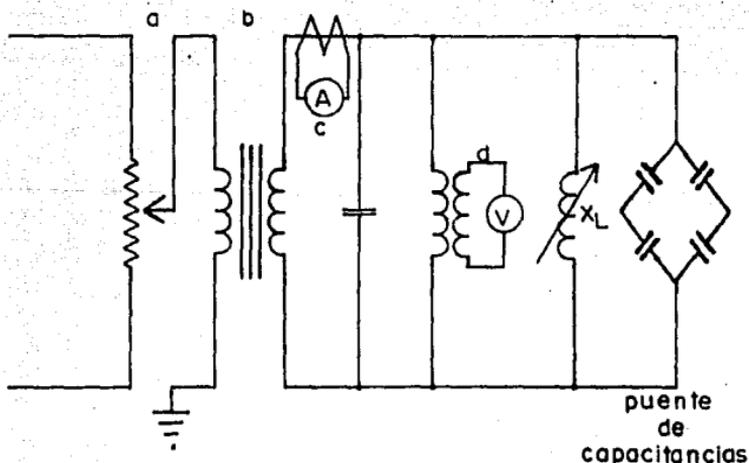


Fig. 2 - 4

Una vez que se ha determinado la capacitancia, se calcula el valor de la potencia reactiva, por medio de la siguiente fórmula.

$$\text{KVAR} = 2\pi f C_n V_n \times 10^{-3}$$

Donde:

f = Frecuencia en ciclos por segundo

C_n = Capacitancia obtenida en microfaradios

V_n = Tensión nominal en kilovolts.

Cuando se trata de calcular la potencia reactiva en capacitores polifásicos se debe usar el promedio de las capacitancias individuales.

b) Pruebas de dispositivo de descarga.

Esta prueba se realiza con objeto de comprobar la eficacia del dispositivo de descarga de los capacitores. Este dispositivo consiste en una alta resistencia a la cual se le mide su valor por medio de una prueba de corriente directa, el tiempo de descarga se calcula de la siguiente manera.

$$t = 2.3 \times 10^{-6} CR (\log_{10} V_n - 1.5) \text{ seg}$$

Donde:

C = Capacitancia en microfaradios.

R = Resistencia en ohms

V_n = Tensión nominal del capacitor.

En esta fórmula se toma en cuenta el posible aumento permisible de 10% en el valor de la tensión nominal, que efectivamente se aplique al capacitor. El resultado es

el tiempo máximo de descarga obtenido.

Generalmente se determinan llevando a cabo una tensión de corriente directa igual a 1.4 veces la tensión nominal del capacitor, ya que dicha tensión, la carga del capacitor es semejante a la que soportaría si se abriese el interruptor de su circuito, cuando la tensión alterna estuviera cerca de cero o en el valor de cresta.

La medición a esta tensión es necesaria en virtud de que muchos dispositivos de descarga de este tipo tienen características no lineales y en consecuencia, tienen un valor de resistencia a tensiones altas, diferentes al que tiene a tensión baja.

c) Prueba de sobretensión.

Esta prueba se efectúa con objeto de comprobar que tanto el dieléctrico como el aislamiento, están en buenas condiciones. Esta prueba se puede realizar tanto con corriente alterna, como con corriente continua.

Para corriente alterna se requieren los siguientes aparatos y equipo entre las terminales del capacitor.

- A) Fuente de alimentación con control de tensión
- B) Transformador elevador
- C) Transformador de corriente
- D) Transformador de potencial
- E) Amperímetro
- F) Voltímetro
- G) Banco de inductancias variables
- H) Cronómetro
- I) Protección por sobrecorriente.

Cuando la prueba es con corriente continua son los mismos aparatos pero además se requiere de una protección - contra sobrecorriente.

Se aplica entre terminales del capacitor una tensión alterna igual al doble de la tensión nominal, con una frecuencia entre 20 y 70 Hz, durante 10 segundos. La tensión se debe aplicar en forma gradual y de tal manera que no se presenten armónicas.

Cuando se usa una tensión con corriente continua (unicamente cuando los dispositivos de descarga no son de - alta reactancia inductiva), debe aplicarse una tensión de - valor igual a 4.3 veces el valor de la tensión alterna nominal.

Si durante la prueba se presentan descargas disruptivas ocasionando la ruptura del dieléctrico, se considera que el capacitor no ha pasado la prueba. Si la falla del - dieléctrico no es evidente se debe comprobar el buen estado del capacitor por medio de la potencia reactiva.

d) Determinación de pérdidas totales.

Se efectúa con el objeto de determinar el valor de las pérdidas en un capacitor, para esta prueba se requiere del siguiente material y equipo.

- A) Fuente de alimentación con control de tensión
- B) Transformador elevador.
- C) Transformador de corriente
- D) Transformador de potencial
- E) Amperímetro
- F) Voltímetro

- G) Banco de inductancias variables.
- H) Fuente de capacitancias con clase de aislamiento adecuado para el capacitor que se prueba y precisión de más o menos del 2%.

Las pérdidas se expresan en función de la tangente del ángulo de pérdidas dieléctricas ($\tan \delta$) o el factor de potencia del dieléctrico ($\cos \phi$). En la medición de -- pérdidas deben incluirse las del dispositivo de descarga.

El ángulo de pérdidas dieléctricas se determina -- por medio del puente de capacitancias u otro medio capaz -- de dar resultados equivalentes. Las mediciones se deben -- efectuar preferentemente a frecuencia y tensión nominal.

El resultado es el valor obtenido para $\tan \delta$, el cual también se expresa en función de $\cos \phi$ sabiendo que -- $(\delta + \phi) = 90^\circ$.

e) Prueba de hermeticidad.

Esta prueba se efectúa con objeto de comprobar la hermeticidad de los recipientes, para lo cual se someten los capacitores a un horno a temperatura de 90°C , durante una -- hora en posición invertida.

Por medio de una inspección visual se registrará si hubo o no fugas de líquido impregnante.

2.6. PRUEBAS DE CAMPO.

Las pruebas de campo en capacitores unitarios deben incluir pruebas de potencial aplicado (tanto entre -- terminales como de terminales al recipiente), pruebas de --

capacitancia o de corriente, pruebas de resistencia de aislamiento, medición de factor de potencia o pérdidas y prueba para determinar el sello para evitar fugas de líquido.

Estas pruebas se pueden dividir en dos clases como sigue:

- a) Pruebas para verificar las condiciones de capacitores nuevos, antes de ponerse en servicio.

Estas pruebas se pueden llevar a cabo usando tensiones que sobrepasen el 75% de las tensiones aplicadas en las pruebas de fabricación, tal como se mencionó en las pruebas de rutina.

Al efectuar la prueba a baja frecuencia, se recomienda que los capacitores se energicen a una tensión que no exceda la tensión nominal, y posteriormente se aumenta hasta un 75% del valor de la tensión de prueba de diseño.

La duración total de esta prueba, incluyendo el tiempo necesario para la carga del capacitor no debe exceder de un minuto, con el fin de evitar la posibilidad de dañar las resistencias de descarga.

La tensión de prueba entre terminales en corto -- circuito y el recipiente, deben ser como se indica a continuación.

TENSION NOMINAL DEL CAPACITOR UNITARIO VOLTS CA	CLASE DE AISLAMIENTO EN KV	TENSION DE PRUEBA EN EL CAMPO DE TERMINALES A RECIPIENTE EN VOLTS CD
0 - 300	0.6	15000
301 - 1200	1.2	15000

1201 -500C	8.7	28500
5001 -15000	15.0	39000
11560-15000	18.0	-----
11560-25000	25.0	-----

En unidades de servicio interno, se debe usar solamente una tensión de 7500 volts.

Los capacitores recién tomados desconectados no se deben descargar poniendo en corto circuito sus terminales, ya que pueden dañarse.

b) Pruebas para verificar las condiciones de un capacitor unitario, después de haber estado en servicio.

Se pueden efectuar en el campo con el fin de cerciorarse de las condiciones de operación de un capacitor. Estas pruebas son necesarias solamente en el capacitor que haya indicado fallas o bien, después de que la unidad haya estado expuesta a condiciones severas. La condición para el servicio, de un capacitor, se puede determinar mediante una o varias de las siguientes pruebas.

A) Se puede comprobar el estado del aisléctrico o de aislamiento mediante la aplicación de una tensión entre terminales o entre terminales y recipiente, cuyo valor no exceda del 75% de las tensiones de prueba.

B) La capacitancia se puede determinar satisfactoriamente midiendo la corriente que circula en el capacitor, cuando se aplica una tensión a frecuencia conocida (preferentemente a tensión y frecuencia nominal) de una senoidal.

Esta prueba sirve para verificar si el capacitor esta en corto circuito o tiene el circuito abierto. Se recomienda ver la potencia reactiva indicada en la placa, --- para determinar los valores nominales de capacitancia.

C) Las mediciones de resistencia de aislamiento entre terminales, se pueden efectuar por medio de un puente adecuado, o se puede calcular esta resistencia de las lecturas de corriente y de tensión de corriente directa. Cuando se incluye interiormente resistencia de descarga, esta resistencia entre terminales practicamente tiene el valor de la resistencia de descarga, la cual es muy baja, comparada con la resistencia de aislamiento del dieléctrico.

D) Se pueden efectuar mediciones de resistencia de aislamiento para determinar el estado del mismo, entre el recipiente y las terminales. La resistencia no debe ser inferior de 1 000 megaohms, excepto en el caso de capacitores con una boquilla y la otra terminal conectada al recipiente que tengan resistores como dispositivos de descarga, que es mucho menor que la resistencia normal de aislamiento.

E) La hermeticidad del recipiente se puede verificar limpiando perfectamente el exterior del capacitor y colocandolo dentro de un horno, donde se debe calentar por lo menos cuatro horas a una temperatura que no debe de exceder a 75°C , con lo cual producirá una presión dentro del recipiente. Se recomienda que durante el calentamiento se coloque horizontalmente el capacitor, sobre un papel limpio, con el fin de que si existe fuga, esta pueda detectarse por la mancha que deje el líquido en el papel.

F) La medición del factor de potencia, es otra forma para determinar el estado del aislamiento entre las terminales de línea y el recipiente, aún cuando no hay ventaja en este método comparado con el anteriormente descrito en el inciso C.

Es de esperarse que las características medibles de los capacitores, herméticamente cerrados y aplicados e instalados adecuadamente, no cambien con el tiempo; en consecuencia las pruebas periódicas no son necesarias. Sin embargo, como las condiciones de operación pudiesen variar dañando los capacitores o reduciendo su vida útil, es muy recomendable que se hagan inspecciones periódicas y se verifique las condiciones de operación del capacitor.

C A P I T U L O I I I

M E T O D O D E C A P A C I T O R E S

3.1. POTENCIA NECESARIA EN CAPACITORES PARA CORREGIR EL FACTOR DE POTENCIA.

En toda instalación industrial la medición del factor de potencia tiene una importancia considerable, ya que cuando se trata de corregirlo se debe realizar una obra ingenieril que sea eficiente, duradera, sencilla en su operación y lo más económico posible.

La medición del factor de potencia se puede obtener por medio de puentes, indicador de factor de potencia, método de los 2 vatímetros aplicado a cargas equilibradas etc.

La potencia en KVAR_c del banco de capacitores, que es necesario instalar para fijar el factor de potencia a un nuevo valor deseado se puede obtener conociendo la potencia activa (KW) que se consume en toda la instalación industrial y el factor de potencia con el cual opera.

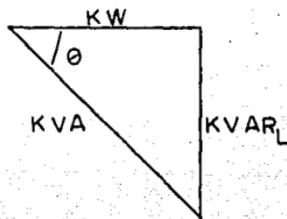


Fig. 3-1

De la figura sig. 3-2 se puede obtener por trigonometría:

$$\tan \theta_1 = \frac{KVAR_L}{KW} \text{ ----- (1)}$$

$$\tan \theta_2 = \frac{KVAR_L - KVAR_C}{KW} \text{ ----- (2)}$$

Donde θ_2 = Es el ángulo al que queremos que trabaje toda la instalación industrial.

$$FP_2 = \cos \theta_2$$

Despejando $KVAR_L$ de (1) y sustituyendo en 2

$$KVAR_L = KW (\tan \theta_1)$$

$$\tan \theta_2 = \frac{(\tan \theta_1)KW - KVAR_C}{KW} \text{ ----- (3)}$$

Despejando los $KVAR_C$ de (3)

$$KVAR_C = KW (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \text{ ----- (4)}$$

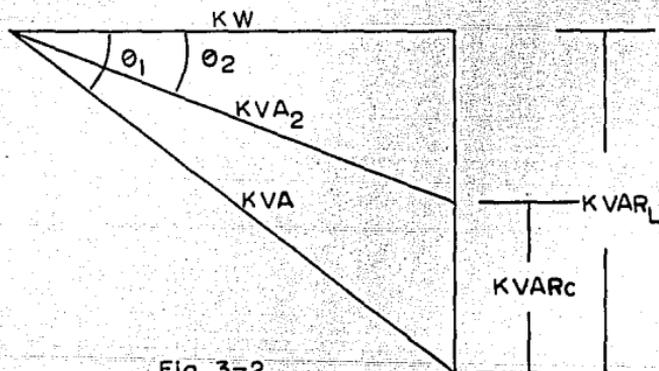
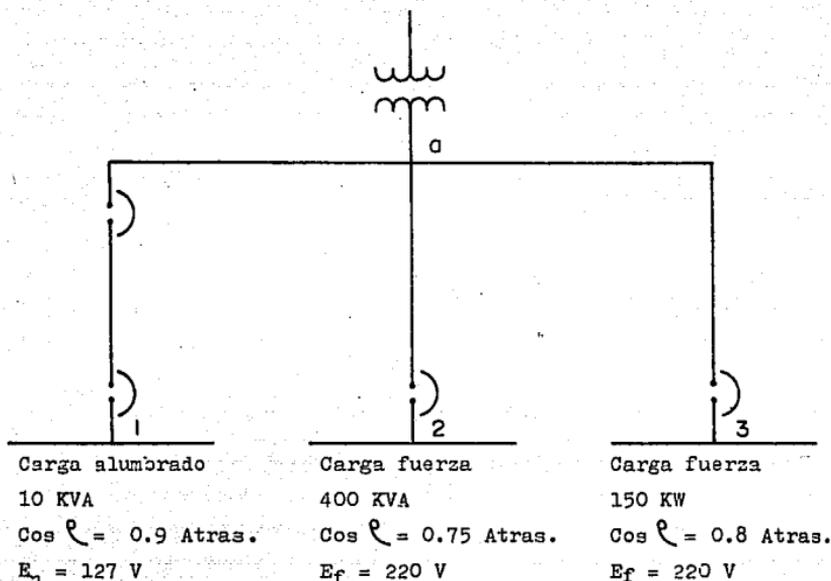


Fig. 3-2



En la disposición mostrada determinar:

- El factor de potencia existente en la instalación medida en el punto a.
- Los KVARc necesarios para mejorar el factor de potencia en los puntos a, 2 y 3 a un valor de 0.9 atrasado.

S O L U C I O N

a) En el punto 3.

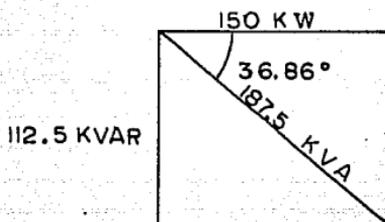
$$KVA = \frac{KW}{\cos \phi} = \frac{150}{0.8} = 187.5$$

$$= 187.5 \text{ KVA}$$

$$KVAR = \sqrt{(KVA)^2 - (KW)^2}$$

$$= \sqrt{(187.5)^2 - (150)^2}$$

$$= 112.5 \text{ KVAR}$$



b) En el punto 2.

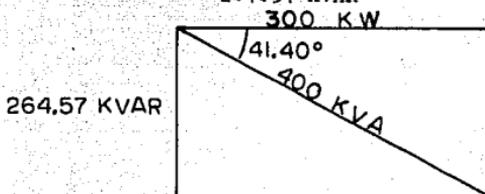
$$KW = KVA (\cos \phi)$$

$$= (400) (0.75) = 300 \text{ KW}$$

$$= 300 \text{ KW}$$

$$KVAR = \sqrt{(400)^2 - (300)^2}$$

$$= 264.57 \text{ KVAR}$$



- b) Encontraremos los KVARc necesarios en el punto a para mejorar el factor de potencia a un valor de 0.9 atrasado.

De la ecuación No. (4):

$$KVARc = KW (\tan \theta_1 - \tan \theta_2)$$

Donde:

$$KW = 459$$

$$\theta_1 = \text{Arc Cos } 0.76 = 40.53^\circ$$

$$\theta_2 = \text{Arc Cos } 0.9 = 25.84^\circ$$

$$\begin{aligned} KVARc &= 459 \text{ KW } (\tan 40.53^\circ - \tan 25.84^\circ) \\ &= 459 \text{ KW } (0.854 - 0.484) \\ &= \underline{169.83 \text{ KVARc}} \end{aligned}$$

Encontraremos los KVARc necesarios en el punto 2 para mejorar el factor de potencia a un valor de 0.9 atrasado.

$$KVARc = KW (\tan \theta_1 - \tan \theta_2)$$

Donde

$$KW = 300$$

$$\theta_1 = \text{Arc Cos } 0.75 = 41.40^\circ$$

$$\theta_2 = \text{Arc Cos } 0.9 = 25.84^\circ$$

$$\begin{aligned} KVARc &= 300 \text{ KW } (\tan 41.40^\circ - \tan 25.84^\circ) \\ &= 300 \text{ KW } (0.881 - 0.484) \\ &= \underline{119.1 \text{ KVARc}} \end{aligned}$$

Encontraremos los KVARc necesarios en el punto 3 para mejorar el factor de potencia a un valor de 0.9 atrasado.

$$\text{KVARc} = \text{KW} (\tan \theta_1 - \tan \theta_2)$$

Donde:

$$\text{KW} = 150$$

$$\theta_1 = \text{Arc Cos } 0.8 = 36.86^\circ$$

$$\theta_2 = \text{Arc Cos } 0.9 = 25.84^\circ$$

$$\begin{aligned} \text{KVARc} &= 150 \text{ KW} (\tan 36.86^\circ - \tan 25.84^\circ) \\ &= 150 \text{ KW} (0.749 - 0.484) \\ &= 39.75 \text{ KVARc} \end{aligned}$$

3.2. BANCO DE CAPACITORES DE POTENCIA FIJOS O DESCONECTABLES.

El factor de potencia de toda instalación industrial suele sufrir variaciones que dependen basicamente de los equipos instalados, por tal motivo es esencial el uso de bancos de capacitores ya sea fijos o desconectables.

Bancos de capacitores fijos.

Es aquel que queda conectado permanentemente a la línea y para los cuales no se preven más que algunas operaciones de conexión y desconexión al año. Normalmente se conectan a través de cuchillas desconectoras o cuchillas cortacircuitos fusibles.

Al instalar un banco de capacitores fijos se busca optimizar la calidad y la economía de la distribución y el consumo de la energía eléctrica, avanzando un poco más -

en las mejoras que pueden lograrse en una instalación industrial.

Los bancos fijos se instalan principalmente bajo las circunstancias siguientes:

- a) Cuando la demanda de potencia reactiva de la carga que se pretende compensar es poco variable.
- b) Cuando se pretende reducir pérdidas producidas por el efecto de Joule. O bien, aumentar la capacidad de carga de transformadores y generadores contándose con una carga global poco variable.
- c) Cuando se trata de elevar los niveles de voltaje en líneas de transmisión y distribución.

Banco de capacitores desconectables.

Cuando las fluctuaciones de carga durante las horas de trabajo sean bastante grandes debe pensarse en la conveniencia de instalar un banco de capacitores desconectables o con secciones desconectables que entren automáticamente en servicio, siguiendo las variaciones de potencia de la instalación industrial.

El objetivo de un banco de capacitores desconectables es el de mantener un factor de potencia próximo al 85 %, (que es el mínimo permitido por la Compañía Suministradora) en cualquier condición de carga.

Ahora cuando los KVARc de carga necesarios son aún más grandes es posible pensar en compensar individual-

mente, es decir instalando capacitores junto a las cargas - y conectar y desconectar cada carga junto con sus capacitores correspondientes. Naturalmente esta solución entraña - problemas de caracter económico ya que la instalación de - dichos capacitores es más cara y además supone una protección más adecuada para la completa seguridad del personal - de la industria.

Los bancos de capacitores desconectables, normalmente se operan por medio de desconectores diseñados especialmente para con cargas capacitivas pures. En algunas ocasiones tambien se operan por medio de interruptores.

Los bancos desconectables se instalan principalmente, bajo las circunstancias siguientes:

- a) Cuando se pretende compensar cargas fuertemente variables, ya sea con la finalidad de corregir el factor de potencia, reducir pérdidas eléctricas o aumentar la capacidad de carga de la instalación industrial o del sistema.
- b) Cuando se trata de mejorar la regulación de voltaje en líneas de transmisión y distribución.

3.3. DECISION DE INSTALAR UN BANCO DE CAPACITORES EN BAJA O ALTA TENSION.

Para tomar una decisión de lo más acertada posible, se deben de tomar los factores en cuenta;

a) Factor económico.

b) Factor técnico.

Factor económico.

Tomando en cuenta el factor económico, un banco de capacitores instalado en el lado de alta tensión, resulta menos costoso con respecto a otro equivalente instalado en el lado de baja tensión.

Para tener una idea bastante aproximada del ahorro económico, el costo es 10 veces mayor en el lado de baja que en el lado de alta, para bancos fijos y 6 veces mayor, tratándose de bancos desconectables.

Cabe mencionar que para voltajes de línea superiores a los 1 000 KV, el aislamiento del banco y especialmente, el equipo de conexión y desconexión, suele encarecer el costo del banco de capacitores, pero aún así, el costo de un banco de capacitores, instalados en alta tensión resulta bastante más económico que un banco de capacitores equivalente instalado en el lado de baja tensión.

Factor técnico.

Este factor se presenta cuando existe la necesidad de instalar el banco de capacitores del lado de baja tensión, como por ejemplo: cuando se desea corregir el factor de potencia para evitar penalizaciones en el recibo de pago por parte de la Compañía Suministradora, en este caso el banco de capacitores debe colocarse después del medidor pues si estuviera antes, la corriente reactiva circularía por el medidor y nos marcaría un consumo extra, ---

ahora si el medidor esta del lado de alta tensión ahí debe colocarse el banco de capacitores.

Cuando se desea aumentar la capacidad de carga de un transformador, los capacitores se instalarán en el lado de baja tensión o sea en el secundario, para así disminuir la corriente inductiva que pasa a través del mismo.

Si el problema fuese evitar pérdidas causadas por efecto Joule, se colocarían los capacitores junto a las cargas principales, evitando así el paso de corrientes inductivas por el cableado. Y si dicho equipo se encuentra instalado en baja tensión el banco de capacitores naturalmente también se instalará en baja tensión.

3.4. CAPACITORES DE POTENCIA EN BAJA TENSION.

En México es de todos conocido que los capacitores en baja tensión encuentran su mayor aplicación en la industria, esto es debido a que si el industrial tiene bajo factor de potencia (abajo del 85%) tiene que pagar cierta penalidad y por tanto se ven en la necesidad de corregir su factor de potencia; normalmente resulta caro instalar estos capacitores, pero tambien es cierto que rápidamente se amortiza su inversión y de ahí en adelante son ahorros que tiene el consumidor.

Los voltaje nominales para capacitores de potencia en baja tensión oscila entre 216 volts a 600 volts y suelen encontrarse en el mercado como unidades trifásicas.

El uso de unidades monofásicas fabricadas pa

ra los mismos voltajes y potencias reactivas nominales ----
que las trifásicas es menos común.

Las cantidades siguientes se consideran como voltajes estandar.

240 o' 280 Volts

460 o' 480 Volts

575 o' 600 Volts

La potencia reactiva para los voltajes estándar -
suele variar según la amplia gama de valores comprendidos -
normalmente entre 1 KVAR y 48 KVAR.

Las unidades trifásicas traen de fábrica una co--
nexión en delta; sin embargo cuando se usan unidades mono--
fásicas también se conectan en delta, instalándose en ban--
cos de tres unidades o un múltiplo de tres.

El motivo de instalar la conexión en delta, es --
el de aprovechar mejor los dieléctricos con los cuales se -
fabrican los capacitores, aplicándoles el máximo voltaje po
sible.

Los capacitores son diseñados para soportar so---
bretensiones de hasta un 10% de su voltaje nominal con el -
fin de prever las posibles variaciones de voltaje en el sig
tema.

Los capacitores de potencia para baja tensión se
conectan siempre en paralelo entre sí, cuando una sola uni
dad trifásica o tres monofásicas no son suficientemente ---
efectivas para obtener la potencia reactiva deseada. El --

banco de capacitores así formado se conecta; a su vez en -- paralelo con la carga que pretende corregir.

A. Alambrado.

El cableado de los equipo de conexión y desconexión, cuchillas desconectadoras, etc. debe diseñarse de -- tal manera que soporte como mínimo el 135% de la corrien-- te nominal del banco de capacitores, con excepción de los - fusibles que en general, deben elegirse con una corriente - nominal mínima del 165% de la corriente del capacitor en -- caso de protección en grupo.

Donde la corriente nominal por fase de dicho ---- banco viene dada por la expresión siguiente:

$$I_{nf} = \frac{Q}{\sqrt{3} V \times 10^{-3}} \quad A$$

Donde: I_{nf} = Corriente nominal por fase en A.

Q = Potencia reactiva total de un banco de capacitores expresada en KVAR.

V = Voltaje nominal.

En baja tensión, los capacitores de potencia sue-- len llevar resistencias de descarga internas que aseguran -- que el voltaje entre bornes baje a menos de 50 volts en -- un minuto despues de haber sido desenergizado el capaci---- tor. Si un capacitor no llevase instaladas estas resisten-- cias internas, es necesario prever la instalación de unas - resistencias externas equivalentes.

En aplicaciones especiales, tales como correc---- ción del factor de potencia de motores para grúas y eleva--

dores, bancos de secciones desconectables que entran y salen rápidamente de operación, operados por algún control -- automático, es posible que haya que volver a energizar un -- capacitor unos segundos después de haber sido desenergiza-- do. En estos casos debe preverse la instalación de resis-- tencias especiales de descarga rápida, que cortocircuiten -- los bornes del capacitor inmediatamente después de que este haya sido desenergizado.

Al instalar bancos fijos, es decir bancos que van a quedar conectados permanentemente a la línea, debe pla-- narse la instalación de cuchillas desconectoras que in-- dependientemente de que tengan o no capacidad para desco-- nectar el banco con carga, permitan que el banco de capaci-- tores pueda quedar desenergizado durante las operaciones -- de mantenimiento, sin que sea necesario paralizar el resto de las instalaciones.

Al instalar bancos desconectables, es decir, ban-- cos que van a entrar y salir de operación con cierta fre-- cuencia operados por medio de un control automático o manual, debe planearse también el instalar cuchillas desconecto-- ras que permitan desenergizar, tanto el banco de capacitoo-- res como el contactor que efectue las operaciones normales de conexión y desconexión.

B. Puesta a tierra del bastidor.

Por su propio diseño los capacitores son capaces de almacenar una gran cantidad de carga eléctrica a vol-- tajes relativamente elevados, aunque la mayor parte de las líneas de campo eléctrico originadas por esta carga comien--

zan y terminan dentro del mismo capacitor, sin embargo no es posible evitar que también se establezca un campo eléctrico hacia el exterior del capacitor y consecuentemente, que su tanque se convierta en una superficie equipotencial de dicho campo. Si el tanque del capacitor se mantiene aislado de tierra, puede quedar cargado a un potencial distinto de cero, creandose el peligro de producirse una descarga eléctrica si se le toca, por este motivo es conveniente conectar a tierra los tanques de los capacitores de potencia, o bien el bastidor en que se vayan instalados dichos capacitores.

C. Compensación individual.

Para obtener una compensación individual se deben de instalar los capacitores junto a cada una de las cargas que consumen potencia reactiva, compensando individualmente su factor de potencia. Independientemente de las condiciones de carga la compensación individual asegura un buen factor de potencia, así como el reducir al máximo las pérdidas por efecto Joule en la instalación eléctrica.

La compensación individual no requiere de un dispositivo especial para conectar y desconectar el banco de capacitores, ya que en muchos casos los capacitores pueden operar con el mismo dispositivo de conexión y desconexión de la carga que van a compensar.

Este método de compensación es muy costoso, ya que al no trabajarse al 100% de la carga instalada, tal como sucede en la práctica, una parte considerable de los capacitores suele estar siempre fuera de operación. En la

mayoría de los casos, esto significa una inversión en ca---
pacitores bastante más alta de la que hubiera sido necesaa---
rio efectuar para corregir el factor de potencia de la ins---
talación completa en una forma global.

D. Compensación en grupo.

Con la compensación en forma global se corrige --
el factor de potencia en una instalación eléctrica comple--
ta, con un costo muy por debajo del que se obtendría con --
una compensación individual. Claro que con la compensación
en grupo no se minimizan las pérdidas por efecto Joule.

Si lo que se pretende es aumentar la capacidad --
de carga activa de los transformadores o mejorar los nive--
les de voltaje, esta compensación suele ser también la me--
jor solución.

Si las fluctuaciones de carga no son tan variables
basta con instalar un banco de capacitores fijos, que en --
condiciones de plena carga corrija el factor de potencia --
global a un valor ligeramente más alto que el mínimo admi--
tido por la Compañía Suministradora.

Para cargas variables, resultará conveniente el -
instalar un banco de capacitores dividido en secciones des-
conectables, que entren y salgan de operación accionadas -
por medio de un control automático.

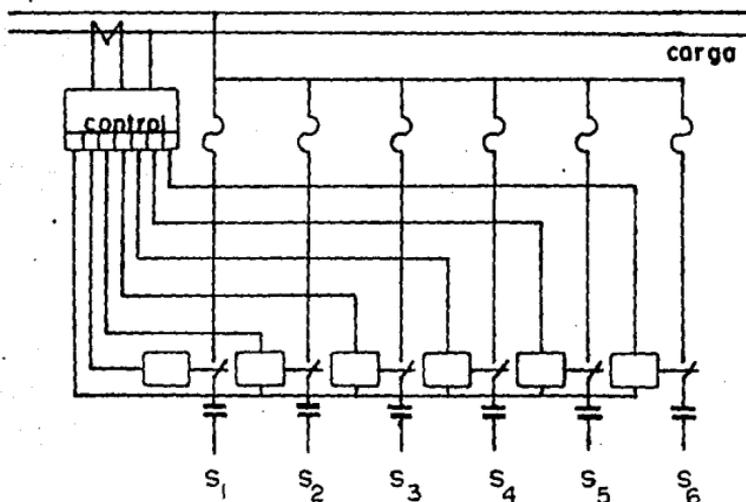
El dispositivo de accionamiento automático sue---
le constar de un control de escalonamiento múltiple, sensi-
ble a KVAR o al mismo factor de potencia y un juego de con-
tadores que, operados por dicho control, sirven para conec

tar desconectar las distintas secciones del planc.

En la práctica suele considerarse entre ocho y diez el número máximo de secciones desconectables instaladas. Esta limitación se establece para impedir que las secciones entren y salgan de operación con variaciones de carga reactiva demasiado pequeñas, lo que ocasionaría un deterioro rápido de los contactores al ser accionados estos con demasiada frecuencia. De la misma forma, debe calibrarse la respuesta del control con un retardo de tiempo conveniente, para impedir que éste reaccione frente a variaciones de potencia reactiva transitorias de corta duración.

La siguiente fig. 3-3 representa un diagrama unifilar de conexión eléctrica de un banco de capacitores de baja tensión, dividido en secciones desconectables operados automáticamente.

Fig. 3-3



C. Compensación mixta.

En el caso de instalaciones industriales que cuenten con grandes motores u otro equipo de gran consumo de potencia reactiva, puede ser conveniente el adoptar una solución mixta, consistente en compensar individualmente los aparatos de gran consumo de potencia reactiva e instalar --- para el resto de la carga un solo banco fijo o dividido en secciones desconectables. De esta forma se disminuyen en parte, las pérdidas por efecto Joule y puede evitarse parte o incluso la totalidad, del mecanismo de desconexión automática.

D. Compensación de motores de inducción.

La demanda de potencia reactiva de un motor de inducción varía con las condiciones de carga, disminuyendo apreciablemente en condiciones de baja carga.

Por consiguiente, cuando se compensa individualmente este tipo de motores, el capacitor o banco de capacitores instalado no debe ajustarse a las condiciones de plena carga, ya que esto podría originar un exceso de potencia reactiva cuando se opere el motor en condiciones de baja carga o marcha en vacío.

Por otra parte, el tamaño del banco de capacitores también resulta limitado por el fenómeno de autoexcitación del motor, que puede originarse en el momento de la desconexión. Cuando se desconecta un motor de inducción al que se han instalado capacitores de potencia, la tensión entre bornes no baja rápidamente a cero, como sucede cuando se desconecta un motor sin capacitores. Esto es de-

bido a que la corriente de descarga de los capacitores ---- mantiene un cierto campo magnético en las bobinas del motor, induciendo una tensión de autoexcitación mientras el motor sigue girando por inercia. Si los capacitores están excedidos en potencia reactiva, esta tensión puede alcanzar valores considerablemente más altos que la tensión nominal del motor poniendo en peligro tanto el aislamiento del motor, - como a los capacitores mismos.

Para evitar estos problemas debe procurarse que la potencia del banco de capacitores no exceda las necesidades de potencia reactiva del motor para marcha en vacío.

Corrigiendo el factor de potencia en vacío a un - valor aproximado al 100%, puede obtenerse un factor de potencia a plena carga del orden del 95% sin que se exceda en ningún momento la demanda de potencia reactiva del motor.

Bajo el punto de vista seguridad industrial, también debe tenerse en cuenta la existencia de las tensiones de autoexcitación y tomarse las medidas oportunas para evitar accidentes, ya que el personal puede creer que no existe tensión una vez que ha sido desconectado el motor.

Cuando se pretende compensar individualmente un - motor trifásico de inducción, cuya operación se efectúa --- por medio de un contactor tripolar, la conexión del capacitor o banco de capacitores puede efectuarse de la forma - como se indica en la figura 3-4.

Con este tipo de conexión los capacitores pueden quedar protegidos con los mismos fusibles del motor.

Además, es posible prescindir de las resistencias de descarga, ya que los capacitores pueden descargarse --- a través del devanado del motor.

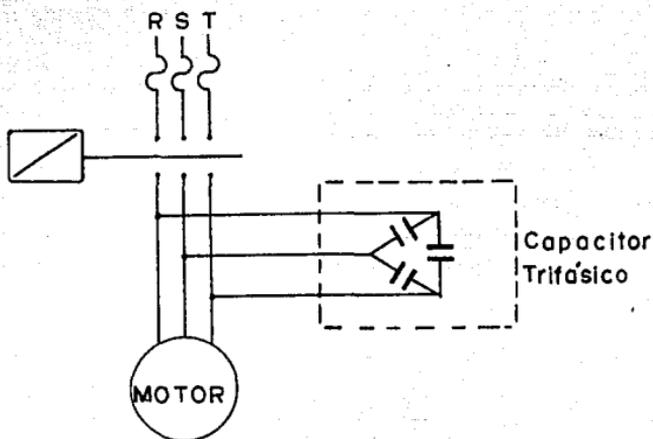


Fig. 3-4

Consideraciones importantes al instalar un banco de capacitores para compensar un motor de inducción.

Si el motor se encuentra protegido con elementos térmicos es importante tener la precaución de cambiarlos, - ajustándolos a la nueva corriente que toma el motor de los capacitores, la cual será considerablemente más baja que la

del motor solo.

Si se usan arrancadores estrella delta puede --- ocurrir que al cambiar de conexión en el arrancador la pérdida de sincronismo entre la tensión residual de los capacitores y la tensión de la red, produzca una fuerte autoexcitación del motor en el momento de reestablacerse el contacto, originandose sobretensiones excesivas que puedan dañar las bobinas del motor.

Para evitar este problema, existen en el mercado arrancadores especiales para operar motores con capacitores. Sin embargo, es frecuente que en la práctica haya - que instalar capacitores en motores con arrancadores normales.

Esto se puede hacer sin dificultades, si se observan las reglas siguientes:

- 1.- En motores de potencia nominal inferior a 7.5 HP el problema no es grave y puede efectuarse la conexión como se indica en la figura 3-5.

En este caso, cada fase del capacitor o capacitores instalados queda en vacío en el momento del cambio de conexión, manteniendo un cierto potencial en las bobinas del motor. Sin embargo, la autoexcitación provocada no es peligrosa mientras la potencia nominal del motor no sobrepase el límite mencionado.

Al desconectarse el motor, las fases de los capacitores vuelven a quedar en vacío y en serie con los arrollamientos del motor. Esto hace que sea necesario instalar resistencias de descarga.

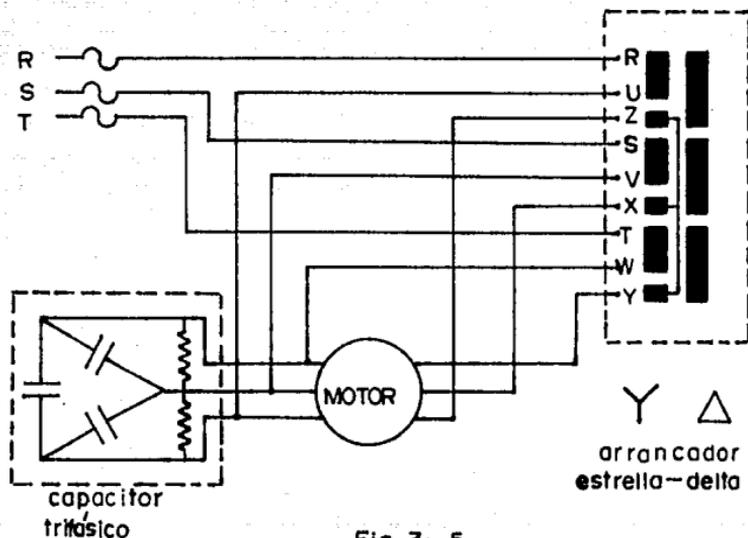
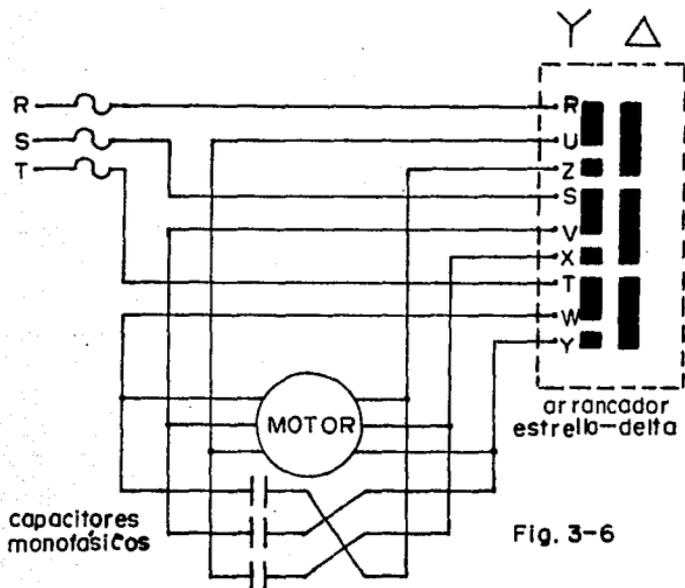


Fig. 3-5

- 2.- En motores cuya potencia nominal este comprendida entre 7.5 y 25 HP, pueden instalarse capacitores monofásicos. En este caso, cada capacitor queda conectado permanentemente en paralelo con el arrollamiento del

del motor. De esta forma, puede producirse una descarga rápida a través de dicho arrollamiento. Por la misma razón, puede prescindirse de las resistencias de descarga. -- Observar la figura 3-6 siguiente.



- 3.- En motores de potencia nominal superior a -- 25 HP los capacitores deben conectarse 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.

Cuando se instalan capacitores en motores de equipos de elevación como; grúas, funiculares, ascensores, etc., se utiliza -- una conexión análoga a la de este último caso.

Una característica común de estos equipos es el de contar con un freno de electroimán que actúa cuando el motor queda desenergizado, donde el electroimán va conectado en paralelo con los bornes del motor. Si no se usará un contactor adicional para los capacitores, éstos provocarían una tensión residual sobre el electroimán que impediría su actuación.

Como estos equipos suelen operarse de una forma intermitente, con intervalos de tiempo muy cortos para entrar y salir de operación, es preciso instalar unas resistencias especiales de descarga rápida.

E. Compensación de transformadores.

Cuando se quiere corregir el factor de potencia de un transformador por medio de capacitores instalados en el lado de baja tensión, debe procurarse que la potencia reactiva de los capacitores no sea mayor que el 10% de la potencia nominal del transformador. De esta forma se evitan problemas de resonancia y se reducen las pérdidas de energía en el transformado cuando éste funcione en vacío.

En la tabla siguiente se da una orientación sobre

el orden en magnitud de la potencia reactiva que debe instalarse en capacitores en función de la potencia nominal del transformador y el voltaje de línea.

Cuando se efectue este tipo de instalación, el banco de capacitores debe conectarse a la red a través de fusibles.

Es preciso usar resistencias de descarga ya que la apertura de un fusible evitaría la descarga a través del transformador.

TABLA QUE INDICA LA POTENCIA REACTIVA NECESARIA EN CAPACITORES PARA COMPENSAR TRANSFORMADORES. POTENCIA REACTIVA EN KVAR.			
POTENCIA DEL TRANSFORMADOR	VOLTAJE DE LA LINEA EN KV		
KVA.	5/13	15/23	25/34
25	2.0	2.5	3
50	3.5	5.0	6
75	5.0	6.0	7
100	6.0	8.0	10
160	10.0	12.5	15
250	15.0	18.0	22
315	18.0	20.0	24
400	20.0	22.5	28
630	28.0	32.5	40

3.5. CAPACITORES DE POTENCIA EN ALTA TENSION.

Se denominan capacitores de potencia de alta ---- tensión aquellos cuyo voltaje oscila entre 2 400 y ----- 19 920 volts tomando cualquiera de los voltajes nominales - entre fase y neutro de las líneas de distribución de hasta 34.5 KV. Y los hay en una gran variedad de diseños diseños, para la aplicación directa a circuitos de distribución y -- transmisión.

Los capacitores de potencia se fabrican en unidades monofásicas de 50, 100, 150, 200, 300 y 400 KVAR, y en unidades trifásicas de 300, siendo las de 100 y 150 KVAR -- las de uso más común.

La instalación de un banco de capacitores debe di señarse de tal modo que las unidades sean facilmente des--- conectables y reemplazables para facilitar el mantenimien-- to y no interrumpir la continuidad de operación del sistema eléctrico al que se encuentre conectado.

Los bancos de capacitores pueden llevar en su --- misma estructura los elementos de montaje necesarios para - transformadores de potencial y elementos de control.

A la fecha se ha estandarizado tanto la mayor --- parte del equipo de los bancos de capacitores, que se en--- cuentran en el mercado bancos completamente armados y alam- brados, listos para ser montados como una unidad, con la -- consiguiente reducción de costos y simplicidad de aplica--- ción; cosa que aunada a las ventajas del capacitor trifásico sobre el monofásico (menor volúmen, peso y costo), viene --

significando una reducción considerable en los problemas -- de operación e instalación de bancos de capacitores en los postes.

Normalmente, los bancos de capacitores de poten-- cial para alta tensión se instalan a la intemperie, pero -- pueden hacerse instalaciones interiores o en gabinetes, to-- mando las medidas adecuadas de ventilación.

En el caso de bancos operados con desconectador - (sin capacidad interruptiva), deben instalarse fusibles de grupo, capaces de interrumpir las corrientes de corto cir-- cuito en el punto de instalación del banco de capacitores. También es común instalar cuchillas corta circuitos fusibles.

3.6. CONEXIONES DE LOS BANCOS DE CAPACITORES EN ALTA TENSION

Los bancos de capacitores en alta tensión se pue-- den instalar conectados en delta, estrella con neutro a tie-- rra o estrella con neutro flotante; siendo la última cone-- xión con mucho la más popular.

La selección de la conexión normalmente está ba-- sada en factores tales como tensión, corriente de falla, -- tamaño del banco, protección del banco, forma de onda y -- condiciones locales del circuito.

En cuanto a la conexión estrella, la decisión de dejar el neutro flotante o conectado a tierra, se basa en -- las consideraciones siguientes:

- 1.- Conexión a tierra del sistema
- 2.- Economía de los fusibles
- 3.- Economía del dispositivo de conexión y desco

nexión.

4.- Calibración de los relevadores de protec-----
ción del sistema.

5.- Interferencias por armónicas.

El punto 1 establece las diferencias en cuanto -- al sistema eléctrico, ya que este puede ser aislado, conectado a tierra en los transformadores de las subestaciones - (directamente o a través de una cierta impedancia), o conectado a tierra en múltiples puntos, a lo largo de las líneas de distribución. La influencia del punto 2, radica en que el costo de los fusibles de protección de un banco esta en relación directa a la corriente de corto circuito que se -- presentan al fallar un capacitor, y estas, a su vez están - relacionadas con el tipo de conexión del banco.

La consideración del punto 3 tiene importancia -- sólo cuando se trata de bancos de gran potencia reactiva o bancos conectados a líneas de más de 46 KV, en las que el - dispositivo de conexión y desconexión es más caro al tener que operar un banco con el neutro flotante. Los punto 4 y 5 se consideran aunque no significan lo suficiente como para influir en el tipo de conexión del neutro.

A. Bancos en estrella con el neutro a tierra.

Una ventaja de este tipo de conexión, es que --- no se requiere el mismo aislamiento del nivel básico de --- impulso del sistema, lo que significa ventaja económica sobre los no aterrizados y bancos en delta, otra ventaja es - que con el neutro a tierra se tiene menor recuperación de - voltaje en el equipo interruptor.

La figura sig. 3-7 muestra un banco de capaci-
tores conectado en estrella, con el neutro a tierra -----
(el neutro generalmente es el cuarto conductor de un siste-
ma con neutro multiterrizado).

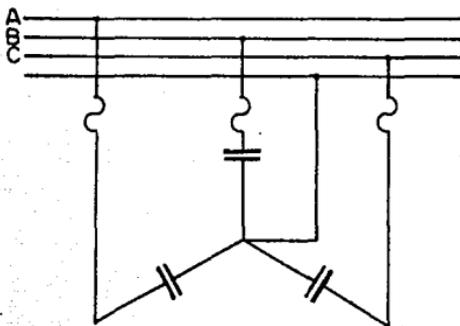


Fig. 3-7

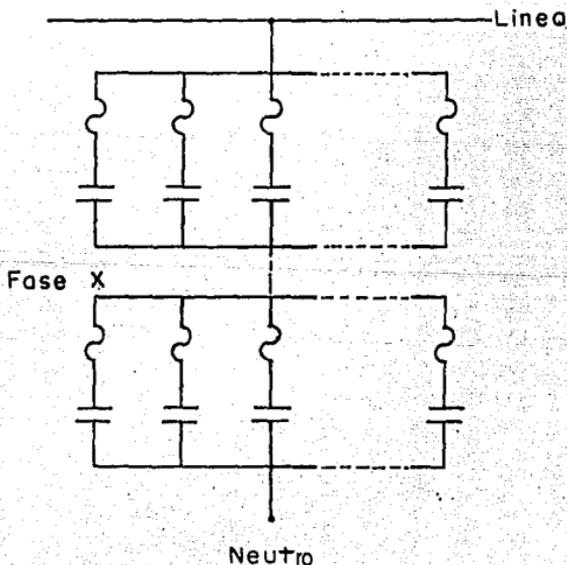
Al encontrarse el neutro aterrizado, las sobre-
tensiones tienen baja impedancia a tierra, y en algunas ---
casos puede omitirse el uso de apartarrayos. Una desventa-
ja la constituye el empleo del 4o. conductor que constitu-
ye la tierra.

Este tipo de conexión facilita el accionamiento -
de los fusibles, o también evita sobretensiones excesivas -

en la conexión y desconexión de los bancos instalados en -- líneas de alta tensión.

Con respecto a la economía del fusible, al conectarse en estrella un banco con capacitores paralelo en serie por fase, como se muestra en la figura sig. 3-8 (co--- nexión apropiada para líneas de más de 34.5 KV), no afecta dejar el neutro flotante o a tierra, ya que la corriente -- que fluye a través de un capacitor fallado antes de actuar el fusible, es casi la misma en ambos casos, y como el costo del fusible está en relación directa a la corriente de - corto circuito, la selección del mismo es independiente de la conexión del neutro del banco.

Fig. 3-8



Ahora si se tiene un solo grupo de capacitores -- en paralelo por fase, la corriente de corto circuito que se presenta al fallar un capacitor, depende de la conexión del neutro. Si este se conecta a tierra, la falla de un capacitor implica corrientes elevadas de corto circuito de fase a tierra; mismas que si exceden los 5 000 amperes asimétricos, en caso de que los capacitores del banco sean de ---- 100 KVAR, o 6 000 amperes si se trata de capacitores de -- 150 KVAR, la corriente debe ser interrumpida con fusibles de potencia, que cuestan mucho más que los de tipo expul--- sión.

En cuanto al dispositivo de conexión usado en --- bancos de gran potencia reactiva. O en bancos conectado a líneas de 46 KV en adelante, es ventaja por razones de costo, operar con el neutro a tierra. Para voltajes de línea superiores a 100 KV, resulta casi imprescindible la conexión a tierra del neutro, y para voltajes de más de 300 KV, los únicos interruptores disponibles son para usarse con la --- mencionada conexión.

El neutro a tierra abre el camino a las corrientes de secuencia cero, en el momento de un corto circuito, que pueden afectar al sistema de protección por relevadores; -- sin embargo, en muy raras ocasiones tal hecho significa --- una necesidad de recalibración de los mismos.

Este fenómeno influye muy poco en la selección -- del tipo de conexión del neutro. Lo mismo puede decirse -- de las terceras armónicas y armónicas múltiples de tres, -- cuyo paso lo constituye el neutro a tierra, y que pueden --

causar interferencias en líneas de sistemas de comunicación adyacentes.

B. Bancos en estrella con el neutro flotante.

La siguiente fig 3-9 muestra este tipo de conexión donde los capacitores están conectados en estrella, pero el neutro está completamente aislado de tierra.

Una desventaja de esta conexión con respecto de la aterrizada, es que el nivel básico de aislamiento del neutro debe ser igual al del nivel básico de impulso del sistema, lo que la pone en desventaja con respecto de la aterrizada. Sin embargo una ventaja de dejar el neutro flotante la constituye el hecho de no tener baja impedancia a tierra para armónicas, con lo que se eliminan posibles problemas de interferencia inductiva a tierra.

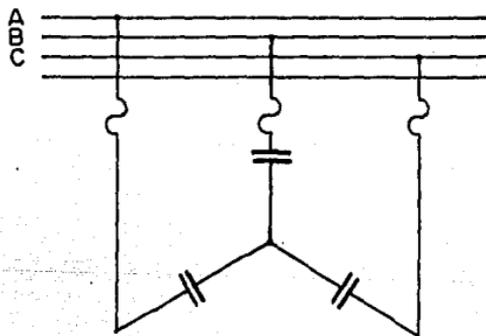


Fig. 3-9

En conexión estrella con neutro flotante, y considerando un solo grupo de capacitores en paralelo por fase, la corriente de corto circuito a través del capacitor fallado está limitada por la impedancia de las otras dos fases, a un valor de 3 veces la corriente nominal de fase, lo que significa valores bajos de corrientes de falla, que pueden interrumpirse con fusibles tipo expulsión de bajo costo.

Basado en lo anterior puede deducirse que esta -- conexión resulta más ventajosa, bajo el punto de vista de -- una protección más económica, que la estrella aterrizada. -- La conexión estrella con neutro flotante, es ideal para --- áreas donde puedan presentarse corrientes de falla excesivas.

Refiriendonos al dispositivo de conexión (equipo interruptor), este sufre recuperaciones de voltaje más altos en bancos con neutro flotante que con neutro a tierra -- haciéndose más significativa la diferencia en líneas de más de 46 KV, para las que el dispositivo en cuestión suele resultar más caro al tener que operar un banco desaterrizado. En líneas inferiores a 46 KV, la diferencia en los voltajes de recuperación puede ignorarse en el criterio de selección del neutro, siempre que el banco se opere con desconectores diseñados para operar con cargas capacitivas o -- ras.

Sin embargo la desventaja más significativa de -- la conexión estrella con neutro flotante, es la de no tener salida a tierra para sobretensiones, ya que, debido a -- ello, existe posibilidad de retroalimentación, sobre-volta-

je y bajovoltaje, al abrirse una o dos fases. Otra des---
ventaja de dejar el neutro flotante es el hecho de que, ba-
jo condiciones desbalanceadas, cambiaría el voltaje al neu-
tro.

C. Bancos en delta.

La conexión delta ('o' en triángulo) de los ban-
cos de capacitores se reduce practicamente a sistema de ---
2 400 volts, 4 800 y 7 200 volts.

La figura sig. 3-10 muestra el tipo de conexión -
delta.

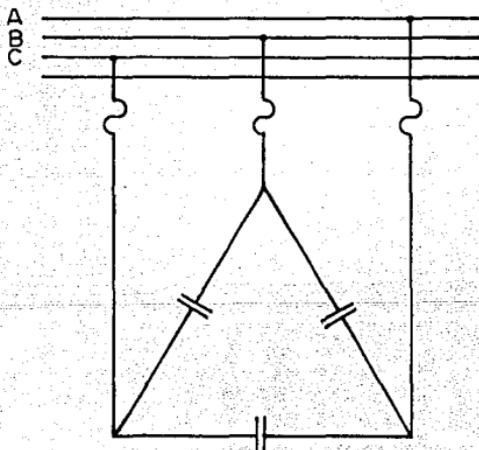


Fig. 3-10

VENTAJAS:

No tiene salida a tierra para armónicas; la recuperación de voltaje en el equipo de desconexión no es excesiva; y por último, la interrupción regularmente no es crítica, de modo que al fallar un capacitor basta la impedancia del sistema para limitar la corriente de falla, aunque hay algunos casos en que la misma puede ser excesiva, requiriéndose fusibles limitadores de corriente.

DESVENTAJAS:

Requiere un aislamiento igual al del nivel básico de impulso de la línea; no tiene salida a tierra para sobretensiones, y lo mismo que en la conexión estrella con neutro flotante, existe posibilidad de retroalimentación al abrirse una o dos fases.

NOTA:

En cualquiera de los tres tipos de conexión de los bancos de capacitores, estos se conectan siempre en grupos serie-paralelo, de modo que la tensión de línea se componga de tantas componentes lineales como grupos serie se tengan por fase, con lo que se previene que la tensión parcial a cada capacitor no exceda su tensión nominal.

Debe buscarse una solución tal que se tenga un máximo de capacitores en paralelo y un mínimo de grupos en serie.

Para determinar los arreglos serie-paralelo de los bancos de capacitores en paralelo, se evalúan las características significativas siguientes;

- a) Número de grupos serie por fase
- b) Rango de voltaje de los capacitores
- c) Rango de KVAR
- d) Número de capacitores en paralelo por grupo serie.

D. Aislamiento del bastidor.

Los bastidores sobre los que suelen montarse --- los capacitores son de acero o de aluminio estructural, y -- como ya se dijo, también pueden servir para soportar la a-- cometida y el alambrado del banco, así como el equipo de -- protección.

Se debe de instalar el bastidor aislado de tierra con el fin de evitar un corto circuito de fase a tierra, -- ya que siempre existe el peligro de contacto entre alguna - fase y el bastidor. En bancos de gran potencia reactiva -- siempre debe tenerse la precaución de instalar cada fase en un bastidor distinto, aislándolos entre sí, así como el conjunto de tierra. Si los bastidores han de quedar aislados de tierra, debe prevenirse a la instalación de cuchillas de puesta a tierra con el fin de descargar los bastidores de las cargas estáticas que puedan haber almacenado en opera-- ción, así como se descargan las partes vivas del banco, --- antes de cualquier operación de mantenimiento.

E. Resonancia con los transformadores.

En la práctica, cuando se instalan capacitores -- de alta tensión en el lado secundario de los transformado-- res de las subestaciones, y si los capacitores operan en --

paralelo con la carga, no hay peligro de resonancia con los transformadores. Este peligro puede existir cuando los capacitores operan en vacío y la potencia reactiva instalada es del mismo orden de magnitud que la potencia nominal de los transformadores; sin embargo, esta circunstancia se presenta muy rara vez, porque sólo es posible a frecuencias relativamente altas, además de que no constituye un peligro en la operación normal de los transformadores.

3.7. CONEXION Y DESCONEXION DE BANCOS DE CAPACITORES DE POTENCIA.

En los momentos de energizar o desenergizar un banco de capacitores pueden producirse sobrevoltajes y sobrecorrientes transitorias de gran intensidad. Esto es debido a la circunstancia de operarse una carga capacitiva practicamente pura (corriente defasada noventa grados en adelanto, con respecto al voltaje) que además, cuenta con una gran capacidad para almacenar energía.

Si el equipo de conexión y desconexión con el que se operan los capacitores no es adecuado, estos sobrevoltajes y sobrecorrientes transitorias pueden ocasionar perturbaciones considerables en el sistema, y en algunos casos incluso el deterioro o el fallo del equipo de conexión y desconexión de algún equipo adyacente o incluso de los mismos capacitores. Estas perturbaciones son tanto más críticas, cuanto más alto es el voltaje del banco de capacitores o mayor es la potencia reactiva del mismo.

Por consiguiente, a la hora de elegir el equipo -

de conexión y desconexión, es importante el asegurarse de su capacidad para operar al banco de capacitores que se vaya instalar, bajo las circunstancias de instalación de cada caso particular. Deben revisarse los factores siguientes:

- 1.- Voltaje nominal
- 2.- Garantía del equipo para operar con cargas capacitivas puras.
- 3.- Corriente nominal
- 4.- Corriente instantánea de conexión
- 5.- Corriente de corto tiempo
- 6.- Capacidad interruptiva.
- 7.- Equipo de conexión y desconexión en baja tensión
- 8.- Equipo de conexión y desconexión en alta tensión.

1.- Voltaje nominal.

El voltaje nominal del equipo de conexión y desconexión debe ser adecuado para el voltaje de la línea en que va a efectuarse la instalación.

2.- Garantía del equipo para operar con cargas capacitivas puras.

En las instalaciones de alta tensión, debe comprobarse que el fabricante garantiza la capacidad del equipo para operar con cargas capacitivas puras y obtenerse información sobre la máxima potencia reactiva que se puede --

conectar y desconectar, para los diferentes voltajes de operación.

En el momento de la desconexión, el voltaje a que quedan cargados los capacitores puede ocasionar fuertes diferencias de potencial entre los contactos fijos y móviles del equipo de desconexión. Esto puede originar reignición del arco, o rearqueos, que produzcan fuertes sobrevoltajes sobre los capacitores y en el punto de la red donde se está efectuando la desconexión. Este peligro se evita asegurando se de la elección de un equipo diseñado especialmente para conectar y desconectar capacitores.

3.- Corriente Nominal:

En alta tensión, la corriente nominal del equipo de conexión y desconexión debe exceder en un 35% como mínimo, a la corriente nominal, por fase, del banco de capacitores que va a operar. El objeto de este margen es tener en cuenta las tolerancias de fabricación de los capacitores en cuanto a potencia reactiva se refiere (tolerancia normalmente positiva) y la posible operación a un 10% de sobrevoltaje.

En baja tensión, puede ser necesario tomar márgenes todavía mayores, dependiendo del tipo de equipo de conexión y desconexión elegidos e incluso del tipo de instalación efectuada.

4.- Corriente instantánea de conexión:

En el momento de conectar a la red un banco de capacitores se producen picos de corriente que, en la prácti-

ca, pueden llegar a alcanzar valores de 10 veces, o más, -- el valor de cresta de la corriente nominal del banco. La -- magnitud exacta de estos picos de corriente depende del --- tamaño del banco (potencia reactiva) y de la impedancia -- del sistema en el punto donde se efectúe la conexión.

Debe comprobarse que la corriente instantánea --- que garantiza el fabricante para el equipo de conexión y -- desconexión es igual o mayor que la representada por estos picos de corriente.

Estas corrientes instantáneas de conexión pueden presentar una severidad extrema cuando se energizan bancos de capacitores conectados en paralelo. La descarga de un banco de capacitores sobre todo puede originar corrientes - de frecuencia elevada, con picos que excedan en 100 o' ---- 200 veces el valor de cresta de la corriente nominal de --- cualquiera de los bancos. Estas corrientes pueden llegar a destruir los equipos de conexión y desconexión en unas po-- cas operaciones, e incluso pueden llegar a dañar los ca--- pacitores. Para evitar riesgos, debe comprobarse que la -- capacidad del equipo para operar cargas capacitivas. conec-- tadas en paralelo es adecuada. Este dato suele proporcio-- narlo el fabricante, junto con la capacidad del equipo pa-- ra operar con cargas capacitivas aisladas. Sin embargo --- lo más práctico en cualquier caso, es calcular la corrien-- te de conexión y asegurarse de que ésta no exceda los lf--- mites de corriente instantánea garantizados por el fabri--- cante del equipo de conexión y desconexión. La corriente - de conexión depende del tamaño de los bancos conectados en -

paralelo y de la inductancia del cableado interpuesto entre ambos bancos. Aumentando artificialmente esta inductancia, puede reducirse fácilmente la corriente instantánea de conexión a valores que resulten apropiados.

5.- Corriente de corto tiempo:

Normalmente, para conectar y desconectar capacitores de potencia en alta tensión, se usan interruptores de baja capacidad interruptiva, o desconectores, a los que no se les exige capacidad interruptiva para corrientes de corto circuito. El desconector, complementado con fusibles de potencia adecuados, suele proporcionar una solución segura y económica.

En baja tensión se adopta una solución análoga -- usando contactores y fusibles.

Como estos desconectores y contactores deben ser capaces de resistir las corrientes de corto circuito del sistema en posición de contactos cerrados, debe comprobarse que estas no excedan a los valores de corriente de corto tiempo especificados por el fabricante.

6.- Capacidad interruptiva:

Cuando se decida operar los capacitores con un interruptor, éste debe contar con una capacidad interruptiva suficiente para interrumpir las corrientes de corto circuito del sistema en el punto de instalación del banco de capacitores.

Hay interruptores que cuentan con una cierta limitación para el producto corriente-frecuencia. En estos casos también debe comprobarse que el límite impuesto por el

fabricante no va a ser excedido.

7.- Equipo de conexión y desconexión en baja tensión.

En baja tensión, los capacitores de potencia se operan por medio de equipo de conexión y desconexión estándar, con la única precaución de que la corriente nominal -- de dicho equipo exceda a la corriente nominal del banco de -- capacitores en un margen de seguridad adecuado.

Cuando se instalan bancos fijos pueden usarse --- interruptores de cuchillas con fusibles que permitan la co-- conexión y desconexión esporádica del banco (por fines de - mantenimiento, por ejemplo) ofreciendo también protección - para un caso de cortocircuito. La corriente nominal de --- estas cuchillas debe exceder, como mínimo en un 65% a la co rriente nominal del banco de capacitores.

Cuando se instalan bancos desconectables (opera-- ciones de conexión y desconexión continuadas) pueden usar-- se contactores magnéticos (o arrancadores) cuya corriente - nominal exceda como mínimo en un 50% a la corriente nomi--- nal del banco de capacitores. Como los contactores no proporcio-- nan protección contra cortocircuitos debe prevenirse la instalación adicional de una protección adecuada. Un -- interruptor de cuchillas adicional puede proporcionar di--- cha protección, por medio de sus fusibles, además de la posibilidad de aislar el contactor del sistema cuando sea necesario (operaciones de mantenimiento, por ejemplo).

Los bancos de capacitores desconectables también pueden operarse por medio de interruptores magnéticos, y -- termomagnéticos o cualquier otro tipo de interruptor de po-

potencia para bajo voltaje, cuya corriente nominal exceda - como mínimo en un 35% a la corriente nominal del banco de - capacitores.

En el caso particular de los interruptores termomagnéticos de caja moldeada la corriente nominal del interruptor debe exceder como mínimo en un 85% a la corriente nominal del banco de capacitores. Debe preverse este mismo margen, cuando se usan contactores o interruptores instalados en el interior de gabinetes de control.

Para la conexión y desconexión de capacitores en paralelo (bancos de capacitores divididos en secciones desconectables), existen contactores especiales que limitan la corriente de conexión por medio de una resistencia que se intercala automáticamente en el circuito en el momento inicial de la conexión. También puede usarse equipo estándar cuya capacidad para soportar corrientes instantáneas sea apropiada para cada caso particular, o bien se instale en serie con unas inductancias capaces de amortiguar las corrientes de conexión, reduciéndolas a valores apropiados para el contactor.

8.- Equipo de conexión y desconexión en alta tensión.

La corriente nominal del equipo de conexión y desconexión usado para operar bancos de capacitores en alta tensión debe exceder en un 35%, como mínimo a la corriente nominal del banco de capacitores.

En instalaciones de bancos fijos de pequeño tamaño pueden usarse arpillas desconectadoras o bien cuchillas cortacircuitos fusibles que incorporan protección de grupo

al medio de desconexión. La corriente de corto tiempo ---- que sean capaces de soportar estas cuchillas debe ser igual o mayor que la corriente de cortocircuito del sistema en el punto de instalación del banco de capacitores; En caso de usarse cuchillas cortocircuitos fusibles, estas deben contar con una capacidad interruptiva apropiada a la magnitud del cortocircuito del sistema.

Normalmente, la conexión y desconexión esporádica de bancos de capacitores por medio de cuchillas se efectúa - hasta voltajes de línea que no excedan a 25 KV.

Para operar bancos de capacitores desconectables se usan desconectores (sin capacidad para interrumpir --- corrientes de cortocircuito) o interruptores con capaci--- dad interruptiva que interrumpen el arco por medios di---- versos: cámara de aceite, cámara de vacío, aire comprimido, aire ionizado o exafloruro de azufre.

El desconector (o interruptor, en su caso) en aceite, es el equipo que resulta normalmente más económico como medio de conexión y desconexión de bancos de capacitores en alta tensión. Aunque para los voltajes más bajos -- puede usarse equipo estándar, lo mas recomendable es usar - equipo que ha sido diseñado especialmente para operar con - cargas capacitivas puras.

Para líneas de más de 34.5 KV (hasta 345 KV) pueden usarse interruptores trifásicos.

Los desconectores de cámaras de vacío resultan económicos y apropiados para operar bancos de capacitores -

de tamaño mediano y voltajes de línea de hasta 34.5 KV. --- Aunque en la práctica se han observado arcos en el momento de la conexión, ocasionado por rebotes de los contactos, normalmente estos desconectadores operan libres de rearqueos.

Los interruptores de aire comprimido tienen una capacidad interruptiva, libre de rearqueos, muy eficaz. Se usan hasta voltajes de línea de 34.5 KV.

Los interruptores con cámaras de aire ionizado -- pueden usarse para operar bancos de capacitores, aunque no operan libres de rearqueos. Sin embargo, se ha observado que en la práctica no producen sobrevoltajes muy violentos. Se usan hasta voltajes de línea de 13.8 KV.

Los interruptores con cámaras de exafluoruro de -- azufre de diseño estándar operan prácticamente libres de -- rearqueos y resultan muy apropiados para la conexión y desconexión de bancos de capacitores de potencia. Se usan -- hasta en voltajes de línea de 345 KV.

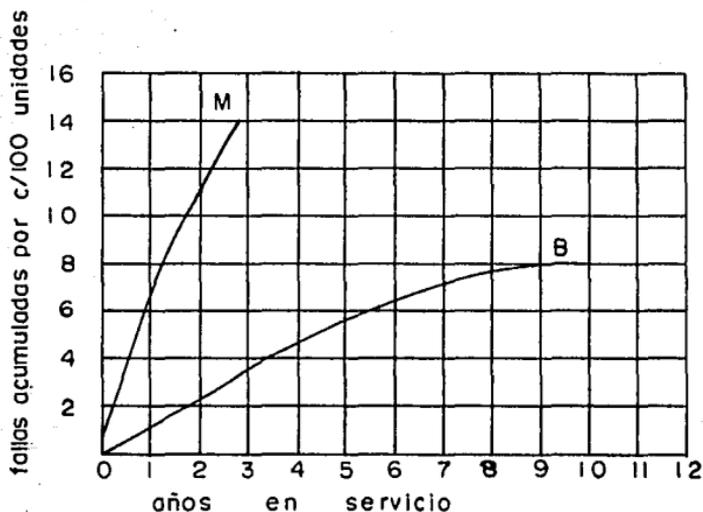
3.8. PROTECCION DE BANCOS DE CAPACITORES EN BAJA O ALTA TENSION.

Para poder elegir la mejor protección para los capacitores de potencia, ya sea en alta o baja tensión, es necesario partir dicho estudio desde la vida media de dura---ción de una instalación de capacitores de potencia, la cual se ha determinado en un periodo de 15 a 20 años de servicio, en condiciones normales de operación.

En la gráfica siguiente se muestra el porcentaje

de fallas de unidades acumuladas en tanto por mil, durante los primeros años de servicio de instalación de capacitores de potencia en alta tensión.

La curva M se refiere a las fallas ocurridas en bancos de capacitores de pequeña potencia reactiva, instalados con un sistema de protección muy elemental. La curva B se refiere a las fallas ocurridas en bancos de capacitores de gran potencia reactiva, en los que el sistema de protección ha sido estudiado cuidadosamente.



Normalmente el fallo de un capacitor implica ---- un corto circuito entre sus placas, con un arqueo que des-- compone el dieléctrico, formado de cloruro de hidrógeno ga-- seoso. Este gas, sometido a presión por el calentamiento - proporcionado por el arco eléctrico, puede llegar a hacer - explotar el tanque del capacitor si no existe un medio ade-- cuado de interrumpir el corto circuito en un tiempo sufi--- cientemente pequeño.

Debido a este tipo de fallas imprescindible que - en cualquier instalación de capacitores de potencia, ya sea en alta o en baja tensión, se planea una protección adecuada; ya que nuestro objetivo primordial será el de mantener la - continuidad del servicio, proteger al personal y equipo de las posibles consecuencias de la falla de un capacitor.

La protección de capacitores se pueda realizar -- con cualquiera de las formas siguientes:

- A. Protección por fusibles
- B. Protección con relevadores
- C. Protección con interruptores

A. Protección por fusibles

La protección por fusibles es la más económica -- para capacitores de potencia. Las razones por las cuales - se protegen con fusibles son las siguientes:

- a) Aislar rápidamente cualquier falla ocurri---- da en el banco de capacitores y así poder --- seguir manteniendo sin ninguna interrupción - el servicio.

- b) Evitar que la falla de un capacitor pueda --- causar daños a otros capacitores del mismo -- banco, y aislarlo antes de que la presión interna producida por los gases cause la explosión de la caja y tambien llegue a dañar a -- los equipo instalados en las proximidades del banco de capacitores e incluso evitar los -- accidentes al personal.
- c) Proporcionar una indicación visual de la unidad fallada, o de la fase en que ha ocurrido la falla, en caso de protección en grupo.

Sin embargo para elegir un fusible destinado para proteger adecuadamente a los capacitores se deben de considerar varios factores:

- a) El fusible debe ser adecuado para la tensión del sistema en que se esta trabajando, es --- decir la tensión nominal de la instalación.
- b) Debe ser capaz de llevar la corriente máxima continua normal o sea la corriente nominal -- del capacitor o grupo de capacitores, y de -- interrumpir la corriente de corto circuito.
- c) No debe responder a condiciones transitorias de corriente y sus características de operación tiempo-corriente, deben ser tales que, - aislará al capacitor fallado antes de que la caja del capacitor pueda estallar.

La tensión nominal debe ser adecuada a la tensión de la línea en que se va a instalar, de forma que en el ---

momento de fallar un capacitor, la tensión que aparezca en el fusible no sea superior a su tensión nominal; en general, - la tensión nominal del fusible debe coincidir con la tensión nominal de los capacitores.

Debe procurarse que la corriente nominal del fusible exceda en un 65%, como mínimo, a la corriente nominal del capacitor o grupo de capacitores, que se pretenda - proteger. De esta forma, se prevee que el fusible no falle por el paso de un nivel de corrientes armónicas todavía admisible por los capacitores, ni por las corrientes transitorias ocasionadas en las operaciones de conexión y desconexión del banco de capacitores.

En las instalaciones más usuales de bancos de capacitores con una sola fila de capacitores en paralelo -- por fase (tipo shunt) esta corriente de falla depende esencialmente del tipo de conexión que se tenga, pudiendo ser; delta, estrella con neutro a tierra o' estrella con neutro flotante.

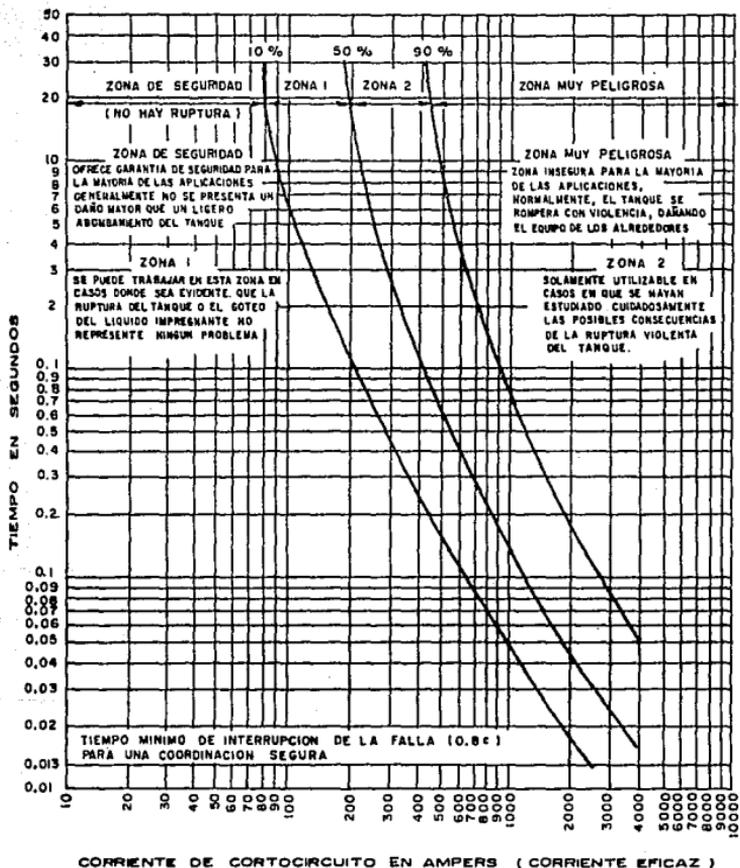
Sin embargo en los bancos de capacitores cuyas -- fases están formadas por varias filas de capacitores conectados en serie (conexión serie-paralelo), la corriente de -- falla de un capacitor fallado en una de las filas, está limitado por la impedancia de las otras filas restantes y no varía en forma significativa con el tipo de conexión efectuada.

Al elegir la capacidad interruptiva del fusible, ---- debe tenerse en cuenta que esta suele basarse en la corriente asimétrica máxima que puede soportar dicho fusible

durante medio ciclo después de haberse producido la falla. En la práctica, esta corriente asimétrica se considera de 1.6 veces el valor de la corriente asimétrica de falla, --- para fusibles de alta tensión, y 1.4 veces para fusibles -- de baja tensión. Cuando se eligen fusibles para capacitores de potencia de alta tensión, es necesario coordinar las características de fusión de los fusibles, con las curvas de probabilidad de ruptura del tanque de los capacitores -- (normas del NEMA) de potencia de 25, 50, 100, 150, 200 y -- 300 KVAR. Observar las 3 graficas siguientes que muestran las curvas de probabilidad de ruptura del tanque de capacitor de potencia en condiciones de un cortocircuito interno.

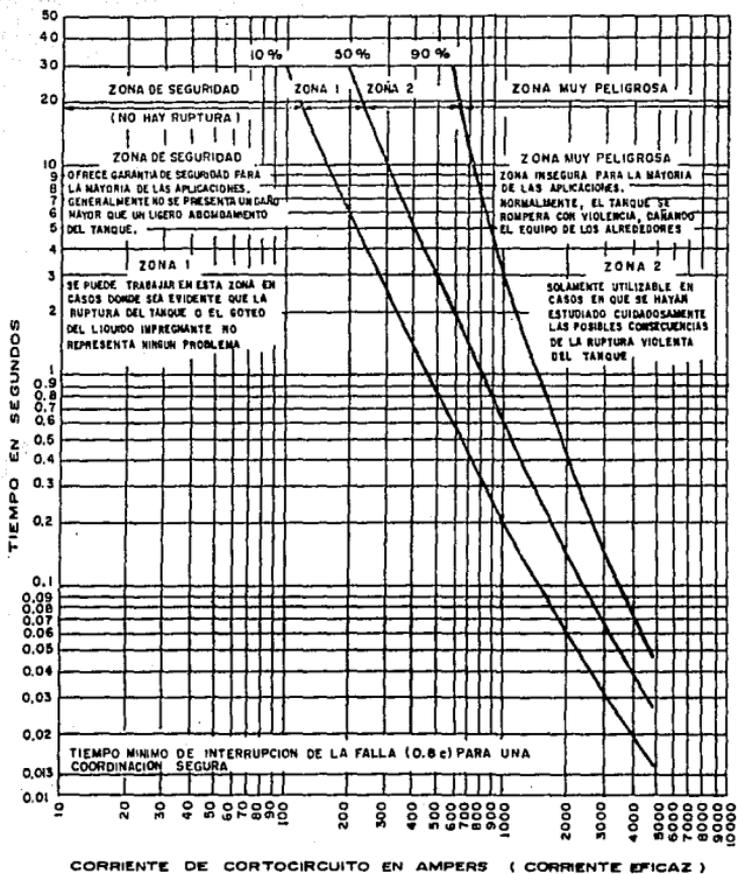
Estas curvas nos indican el tiempo que tardará -- el fusible en interrumpir la corriente de falla en el ca--- pacitor, la combinación de estos dos parámetros corriente - de falla y tiempo de apertura del fusible, determina un pun to que debe quedar situado en la zona de seguridad de dichas curvas. De otra forma debe elegirse un tipo de fusible más sensible, cuya combinación corriente-tiempo si quede en dicha zona de seguridad.

Si la corriente de falla de un capacitor de poten cia de alta tensión es mayor de 4 000, 5 000 o' 6 000 amperes para capacitores de 25 o' 50 KVAR, 100KVAR, 150 o' --- 200KVAR respectivamente, no pueden usarse fusibles tipo --- expulsión para la protección de los capacitores de una es--- tación ya que existe el peligro eminente de que se produz--- ca la ruptura violenta del tanque antes de que actué el fu--- sible.



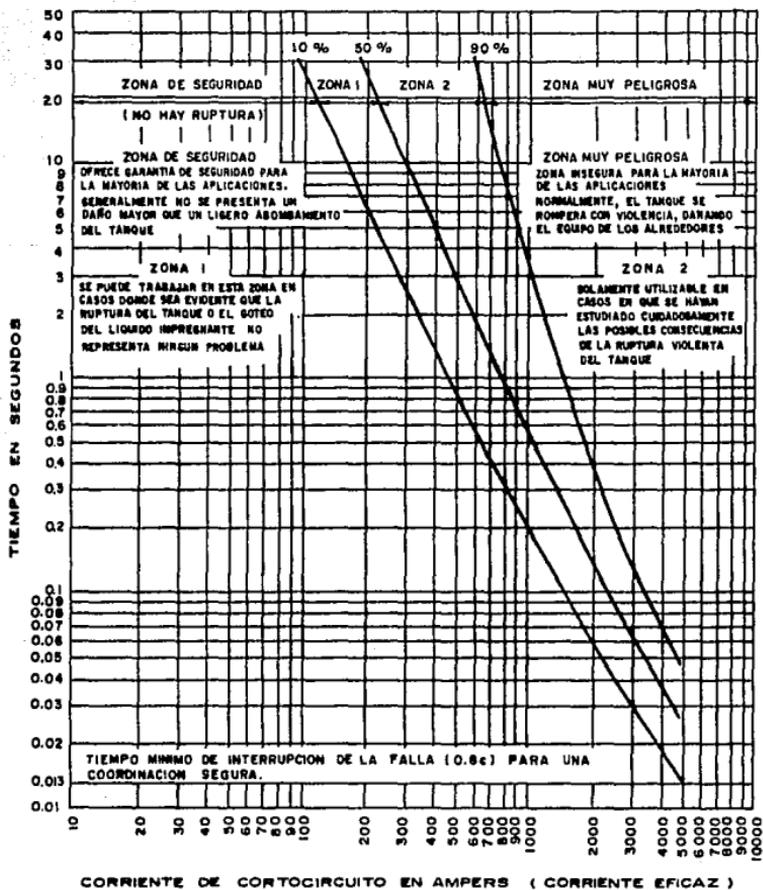
UTILICENSE VALORES EFICACES DE CORRIENTE ASIMETRICA PARA TIEMPOS MAS CORTOS QUE UN CICLO

CURVAS DE PROBABILIDAD DE RUPTURA DEL TANQUE DE CAPACITOR DE POTENCIA DE 25 ó 50 KVAR, EN CONDICIONES DE UN CORTOCIRCUITO INTERNO



UTILICENSE VALORES EFICACES DE CORRIENTE ASIMETRICA PARA TIEMPOS MAS CORTOS QUE UN CICLO

CURVAS DE PROBABILIDAD DE RUPTURA DEL TANQUE DE UN CAPACITOR DE POTENCIA DE 100 KVAR, EN CONDICIONES DE UN CORTOCIRCUITO INTERNO.



UTILICENSE VALORES EFICAZES DE CORRIENTE ASIMETRICA PARA TIEMPOS MAS CORTOS QUE UN CICLO

CURVAS DE PROBABILIDAD DE RUPTURA DEL TANQUE DE UN CAPACITOR DE POTENCIA DE 150 KVAR, EN CONDICIONES DE UN CORTOCIRCUITO INTERNO.

En estos casos la solución para proteger el banco de capacitores es utilizar fusibles de potencia limitadores de corrientes; estos fusibles también se usan cuando se encuentran conectados los capacitores en paralelo tal que su capacidad de almacenamiento de energía exceda de 10 000 Joules eliminando las corrientes de altas frecuencias.

1.- Protección con fusibles individuales:

Los fusibles individuales son usados en instalaciones de subestaciones, donde cada unidad de capacitor es protegida por fusible y se tiene además protección de respaldo para el banco.

Esta protección consiste en proteger cada capacitor con su fusible propio o bien, en caso de usarse capacitores trifásicos, proteger cada fase del capacitor con un fusible, para proteger individualmente capacitores de baja tensión que no lleven instalados fusibles internos, la práctica normal es instalar dos fusibles por capacitor, en dos cualesquiera de sus fases.

Las ventajas que implica la protección individual son:

- a) La protección individual permite que un capacitor fallado salga de operación, sin necesidad de que se desconecte el banco de capacitores o toda una fase del banco, proporcionándose de esta forma la mejor continuidad del servicio.

- b) Los fusibles usados normalmente en la protección individual son de pequeña corriente nominal y fáciles de coordinar, de una forma segura, con las curvas de probabilidad de ruptura de los tanques de los capacitores esto permite reducir el porcentaje de los capacitores fallados en cualquier instalación particular ya que resulta muy improbable que un capacitor al fallar dañe a otras unidades próximas a él.
- c) El hecho de que el fusible individual indique directamente cual es la unidad fallada, simplifica considerablemente el mantenimiento del banco de capacitores.

Sin embargo, la protección individual está limitada en banco de capacitores de un cierto tamaño en adelante, debido al desbalanceo interno de tensión que se produce en un banco de capacitores al salir de operación algunas unidades. En el caso de un banco conectado en estrella con neutro flotante, la falla y desconexión de algunas unidades en alguna de las fases, origina un desplazamiento eléctrico del neutro que, a su vez, ocasiona una sobretensión en los capacitores de la fase, o de las fases, que hayan quedado con mayor impedancia. Si esta sobretensión llega a exceder en más del 10% a la tensión nominal de dichos capacitores, puede originarse una falla indefinida de capacitores.

2.- Protección en grupo

Consiste en proteger agrupamientos de capacitores,

o fases completas de un banco de capacitores, con un solo fusible de grupo. Se usa principalmente en bancos cuyo tamaño es pequeño y no permite el uso de protección individual. Se usa también como protección de corto circuito en bancos cuyos individuales no tienen capacidad suficiente para interrumpir las corrientes del corto circuito del sistema en que se encuentran instalados, o bien, en bancos de gran tamaño y de gran cantidad de alambrado que cuentan con muchas partes vivas que no quedan protegidas con los fusibles individuales.

El tipo de fusibles tienen las mismas características que la de los de protección individual, para utilizar fusibles de grupo debe tenerse en cuenta las siguientes reglas:

- a) En cualquier caso, el fusible debe ser capaz de interrumpir la corriente de falla que vaya a soportar, en un tiempo inferior a 300 seg.
- b) Cuando la corriente de falla de un capacitor excede a 3 000 amperes, los fusibles de grupo deben ser complementados con fusibles individuales.

B. Protección con relevadores:

Cuando existe una sobretensión excesiva originada por la falla y desconexión de un cierto número de capacitores en un banco, se utiliza un sistema de protección llamado sistema de protección por desbalanceo: estos consisten esencialmente en un desconectador (o juego de desconecto---

res monofásicos) capaz de operar el banco de capacitores -- con carga, un transformador o juego de transformadores de corriente o de potencial y un relevador o juego de relevadores de corriente o de tensión, que al captar una señal de desbalanceo predeterminada, envía una señal de apertura al desconectador, sacando de operación al banco de capacitores en el momento en que llegan a alcanzarse unas condiciones de desbalanceo críticas.

Los grupos más importantes de protección por desbalanceo son:

- a) Un transformador de corriente o de potencial, conectado entre los neutros de un banco conectado en estrella con neutro flotante que ha sido dividido en dos secciones generalmente iguales entre sí. Dicho transformador alimenta a un relevador de corriente o de tensión, que -- capta la señal de desbalanceo entre ambas secciones del banco.
- b) Un juego de transformadores de potencial, con los primarios conectados entre fases y neutro de un banco conectado en estrella con neutro flotante y los secundarios conectados en delta abierta, alimentando un relevador de tensión -- que detecta el desplazamiento del neutro.
- c) Un juego de transformadores de potencial y relevadores de tensión, conectado en cada fila -- de capacitores de un banco conectado en estrella con neutro a tierra o en delta, cuyas fases están conectadas en serie paralelo.

C. Protección con interruptores:

La protección de un banco de capacitores puede -- planearse también por medio de un interruptor que sea ca-- paz de interrumpir cualquier corto circuito entre fases o -- entre fase y tierra, originado en el banco de capacitores, así como la corriente de falla de un capacitor.

En los bancos conectados en estrella con neutro - flotante caso normal en alta tensión, la corriente de falla de un capacitor suele ser mucho más pequeña que las corrientes de corto circuito de la instalación. En estos casos, - deben tomarse las precauciones debidas al calibrar los re-- levadores de sobre corriente del interruptor, de forma que este sea capaz de interrumpir tanto unas corrientes como -- otras, en un tiempo lo suficientemente corto para que no -- exista peligro de ruptura del tanque del capacitor fallado.

En instalaciones de alta tensión, el interruptor debe ser usado especialmente para la conexión y desconexión del banco de capacitores.

Cuando se conectan capacitores a las líneas aéreas es común instalar pararrayos autovalvulares como medios de protección contra descargas atmosféricas o sobre tensiones transitorias producidas por operaciones de conexión y des-- conexión. Este último factor toma especial importancia en tensiones de línea del orden de 100 KV o superiores.

Como sabemos los capacitores representan una vía de paso para las altas frecuencias y impulsos eléctricos, especialmente en las conexiones en estrella con neutro a --

tierra. Sin embargo, puede caer un rayo cuya energía llegue a ser suficientemente grande para cargar los capacitores a un potencial excesivo y producir la falla en algunas unidades.

La conexión de los pararrayos autovalvulares se efectúan en estrella con neutro a tierra. La elección de su tensión nominal depende del tipo de línea donde van hacer instalados. La NEMA clasifica las líneas de distribución en los siguientes tipos:

Tipo A) Sistemas de cuatro hilos, con el neutro conectado a tierra a todo lo largo de la línea. Sistemas cuyas relaciones de reactancia y resistencia son menores que en las líneas tipo B.

Tipo B) Sistemas con neutro conectado a tierra, en los que la relación es positiva y menor que uno, en cualquier punto del sistema.

Tipo c) Sistemas con neutro conectado a tierra, pero con características diferentes a las del tipo B. La relación de resistencia y reactancia es positiva, pero alguna de ellas, o ambas, presentan valores mayores que los límites máximos especificados para los sistemas del tipo B.

Tipo D) Sistemas con el neutro aislado, cuya reactancia de secuencia cero es capacitiva y la relación de reactancia X_0/X_1

es negativa. La relación X_0/X_1 se mantiene entre -40 y $-\infty$.

Los capacitores deben quedar protegidos con pararrayos autovalvulares siempre que se instalen conectados en estrella con neutro flotante, o bien, conectados en delta.

MAQUINAS SINCRONAS

4.1. GENERALIDADES.

Se les llama máquinas eléctricas a aquellas máquinas que reciben al menos una forma de energía de naturaleza eléctrica.

Para hacer una primera diferencia de este tipo -- de máquinas, existen: máquinas de corriente continua y de corriente alterna, esta última a su vez se divide en máquinas monofásicas o trifásicas.

Una clasificación muy importante de este tipo de máquinas eléctricas se obtiene al conocer que tipo de energía consumen a la entrada, y que tipo de energía nos proporcionan a la salida, para el caso donde se requiera de energía mecánica en la entrada y en la salida se obtenga energía eléctrica, se les llama generadores eléctricos, en cambio, los que en su entrada disponen de energía eléctrica y a la salida nos proporcionan energía mecánica se les conoce como motores eléctricos.

Otra diferencia significativa dentro de las máquinas eléctricas los constituyen el movimiento o el reposo de sus componentes, clasificandose en máquinas giratorias -- y máquinas estáticas, para el primer grupo están los generadores y motores, y en el segundo caso se encuentran los transformadores, capacitores, convertidores eléctricos, etc.

Dentro de las máquinas eléctricas giratorias de --

corriente alterna existe otra diferencia en la cual la velocidad de la máquina juega un papel importante, encontrándonos con máquinas síncronas y máquinas asíncronas.

Las máquinas síncronas trabajan siempre a la misma velocidad para la cual fueron diseñadas, o lo que es igual, la velocidad del rotor debe ser muy cercana a la velocidad síncrona del campo magnético giratorio. El otro tipo de máquinas en la cual la velocidad del rotor es diferente a la de sincronismo se les denomina máquinas asíncronas.

4.2. ESTRUCTURA DE LOS MOTORES SINCRONOS.

Estas máquinas esencialmente están constituidas por tres partes muy importantes, la parte fija que constituye el estator, también conocida como inducido, este es alimentado de corriente alterna. La segunda parte es un elemento giratorio conocido como rotor, también denominado inductor o campo, esta parte es alimentada de corriente continua. La tercera parte está constituida por un pequeño espacio de aire que se encuentra entre la superficie cilíndrica interna del estator y la superficie externa del rotor, cuyo espesor puede variar desde pocos milímetros hasta algunos centímetros.

La parte del estator está constituida por un paquete de laminaciones magnéticas, entre las cuales se tiene una capa de aislamiento de barniz especial para alojar a los conductores dispuestos en las ranuras a lo largo de la superficie cilíndrica interna del estator.

Las tensiones elevadas que se generan normalmen--
 te en el inducido contribuyen a la elección de un inducido
 fijo, y de esta forma evitar la degradación de los materia--
 les aislantes a los cuales tambien se sobreponen los es---
 fuerzos mecánicos de la acción del motor, otra ventaja del
 inducido fijo es que simplifican la conexión a la línea --
 externa, que normalmente se hace por medio de cables de po--
 tencia o barras (buses) de fase aislada al transformador --
 (o banco de transformadores) elevador.

El rotor o sistema inductor gira dentro del es---
 tator, y este aloja los polos magnéticos de excitación de -
 c.c. destinados a crear flujo inductor, este se alimenta --
 por medio de anillos rozantes que se encuentran alojados en
 el eje del rotor.

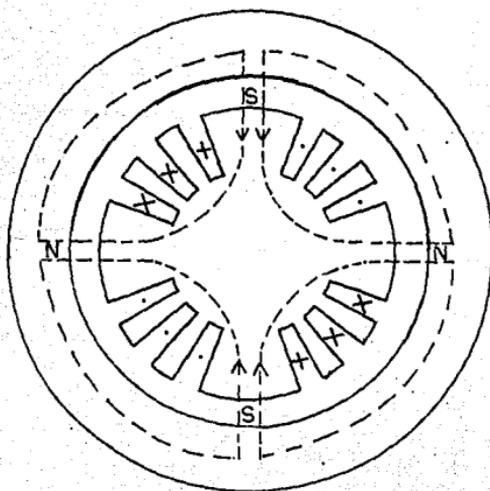


Fig. 4-1
 POLOS LISOS
 O
 CILINDRICO

El rotor puede ser de polos lisos (rotor cilíndrico) o de polos salientes. El primero es para motores de alta velocidad y el segundo para motores de velocidad lenta o media que son los más utilizados, figuras 4-1 y 4-2.

El devanado de campo o inductor, y el devanado de armadura o inducido se encuentran distribuidos en la periferia de la máquina. El devanado de campo para un motor de polos salientes se encuentra localizado en los polos salientes del rotor, y para un motor de polos lisos se encuentran localizados en las ranuras del rotor. El devanado de armadura puede ser devanado integrado o fraccionario, dependiendo si el número de ranuras por polo y por fase es un número entero o fracción.

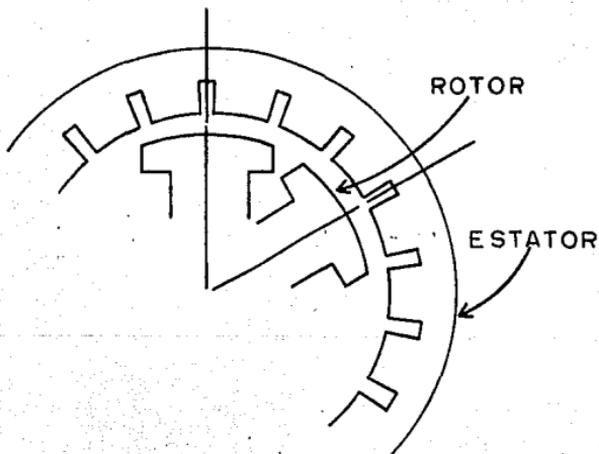


Fig. 4-2 POLOS SALIENTES

4.3. APLICACIONES DE LOS MOTORES SINCRONOS.

Dada la gran importancia de los motores síncronos es conveniente establecer las aplicaciones típicas de dichos motores, en grandes industrias y en sistemas de potencia.

- a) En centrales eléctricas y en las subestaciones se emplea en paralelo a las barras del sistema para mejorar el factor de potencia (como condensador síncrono).
- b) En algunas líneas de transmisión se ocupa para regular el voltaje de la misma.
- c) En industrias que cuentan con un número elevado de motores de inducción, es usado para corregir el factor de potencia de la instalación.
- d) En otros usos es ocupado para mover grandes cargas como por ejemplo, molinos de cemento, molinos textiles, molinos de hule, y en industrias extractivas, etc.

Estos motores sirven principalmente para operar en forma continua a una velocidad constante, como en bombas centrífugas, ventiladores centrífugos, compresores de aire u otro fluido, grupos de motor-generador, etc.

4.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS.

a) Ventajas.

- 1.- El factor de potencia puede hacerse variar a voluntad.
- 2.- Velocidad constante a plena carga o en vacío.

- 3.- La potencia varia linealmente con el voltaje.
- 4.- Máquinas de mayor rendimiento con factor de potencia igual a la unidad.

b) Desventajas.

- 1.- No se pueden usar donde se necesita velocidad variable.
- 2.- Requiere excitación de c.c. de una fuente --- externa en algunos casos.
- 3.- No arranca bajo carga, ya que su par de arranque es cero.
- 4.- Puede salirse de sincronismo y pararse cuando se sobrecarga.
- 5.- Requiere de anillos rozantes y excobillas.
- 6.- Tiende a oscilar.
- 7.- Su costo y su mantenimiento son bastante elevados.

4.5. PRINCIPIO DE OPERACION.

Para entender más facilmente el principio de operación del motor síncrono, supongamos que tenemos un motor síncrono como el de la figura sig. 4-3 : motor tres fases - dos polos.

En la figura se representa un estator de polos -- salientes por conveniencia, pero ya se ha indicado que son ranuras alrededor del nucleo magnético del estator.

Teniendo en cuenta que el rotor se excita con -- corriente continua, los polos del rotor mantienen la misma polaridad entre ellos, pero en el estator la polaridad cam-

bia debido a que es alimentado con corriente alterna. En la figura para el inciso a), en este instante el polo sur del rotor es atraído por el polo norte del estator, tendiendo a girar en dirección de las manecillas del reloj. Después de medio periodo $T/2$ segundos, donde $T = 1/f$, la polaridad se invierte, pero la polaridad del rotor la conserva como se indica en el inciso b), en donde el estator tiene una polaridad sur y el rotor también sur, el rotor es repelido en sentido contrario a las manecillas del reloj. Se puede afirmar por lo tanto que el par que actúa en un motor síncrono no es unidireccional, y debido a la inercia del rotor no se mueve en ninguna dirección, es decir, el motor síncrono no tiene par de arranque.

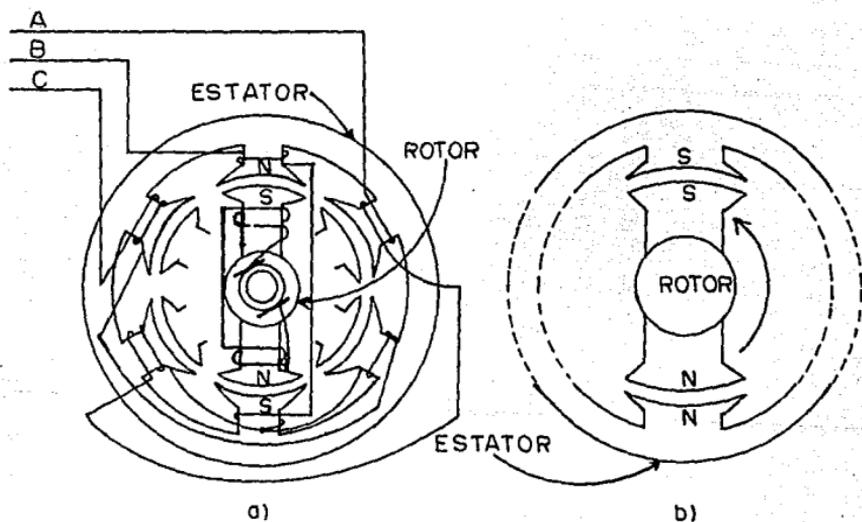


Fig. 4-3

Por otra parte si giramos el motor hasta una velocidad síncrona o cercana a la de sincronismo en sentido de las manecillas del reloj, como en el inciso a) de la figura anterior, donde el polo sur del rotor es atraído al polo norte del estator desarrollandose así un par sobre el rotor en la dirección de rotación, despues de medio periodo $1/120$, la polaridad del estator se invierte y el estator tiene un polo sur y el rotor norte por haber girado por inercia, esto hace que exista nuevamente un par sobre el rotor y el motor conseguira moverse nuevamente en la dirección de rotación a una velocidad de sincronismo.

El desplazamiento en el espacio del polo en grados eléctricos para la velocidad de sincronismo, corresponde con la inversión de 180° del sentido de la corriente en la bobina del inducido, y el par producido tiene el mismo sentido.

Debido a lo anterior, para que se obtenga un par continuo, es necesario que el motor síncrono tenga una velocidad tal que se mueva a través de una distancia igual al paso polar en la mitad de un periodo, es decir, $T/2$ o' $1/2 f$ segundos donde f es la frecuencia de la red de alimentación en c.a. Si el motor tiene P polos, el rotor debe girar a su velocidad síncrona dada por la expresión:

$$S = \frac{120 f}{P}$$

4.6. ARRANQUE DE LOS MOTORES SINCRONOS.

Como se vio anteriormente el motor síncrono no puede arrancar por si solo, por lo tanto debe llevarse a una velocidad cercana a la de sincronismo por medios externos a fin de quedar en sincronismo con el campo giratorio, los medios con los que se lleva a esta velocidad son:

- 1.- Un motor de c.c. acoplado al eje del motor síncrono.
- 2.- El uso de la excitatriz como motor de c.c.
- 3.- Un pequeño motor de inducción de por lo menos un par de polos menos que el motor síncrono.
- 4.- El uso de los devanados amortiguadores como motor de inducción, ya sea de jaula de ardilla o de rotor bobinado.

Por ser más factible y práctico al arranque, este último método es el más utilizado en los motores síncronos

El devanado amortiguador de jaula de ardilla consta de conductores en la cara de los polos del rotor, que están cortocircuitados en sus extremos mediante conexiones puenteadoras, esta conexión puenteadora tiene agujeros para permitir la unión con el siguiente juego de bobinas del polo siguiente, formando un devanado completo de jaula de ardilla, observar figura 4-4.

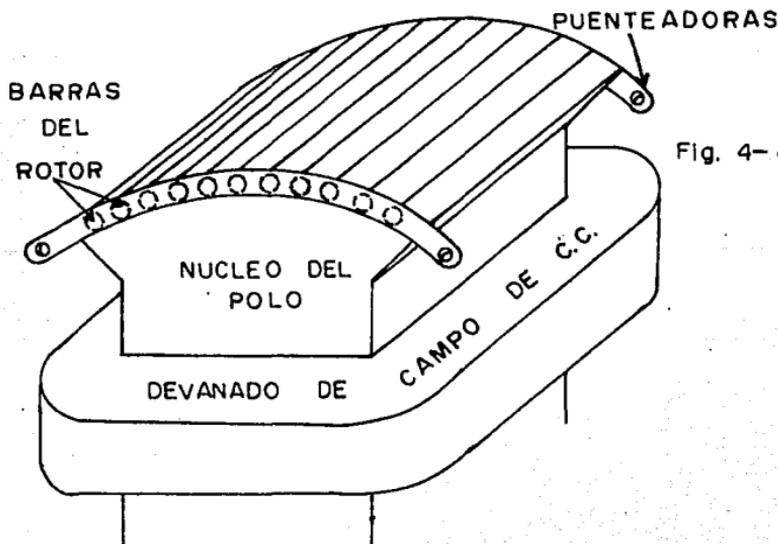
Este tipo de arranque no tiene suficiente fuerza para llevar la carga nominal del motor síncrono, pero sí la suficiente para el arranque.

Para evitar la inducción de tensiones extremada--

mente elevadas en las muchas espiras del devanado de excitación, suele cortocircuitarse dicho devanado durante el periodo de arranque, lo cual ayuda a producir un efecto de motor de inducción.

Estando cerca de la velocidad de sincronismo se elimina el corto circuito de la excitación y se aplica c.c. al devanado de campo, y el rotor fácilmente se pone en sincronismo con la excitación giratoria del estator. Se dice que el motor se pone en sincronismo si en el momento de excitar los polos resultantes en el rotor están frente a los polos de polaridad contraria del estator, apareciendo entre ellos una fuerza de atracción magnética considerable. Esta atracción mutua liga entre sí estator y rotor y éste se ve literalmente arrastrado en conjunción con el campo giratorio. En el mercado existen motores de gran par de arranque denominados; motor amortiguador de fase.

CONEXIONES



Un motor de este tipo se reconoce inmediatamente porque emplea cinco anillos rozantes, dos para la excitación de campo de c.c. y tres para el devanado amortiguador de c.a. del rotor bobinado conectado en estrella.

El comportamiento es similar al motor de inducción de rotor bobinado, en la cual se usa una resistencia de arranque externa para mejorar el par de arranque para este tipo de motores. Este se hace arrancar con toda la resistencia externa por fase, el circuito de c.c. es cortocircuitado, el motor se aproxima a la velocidad de sincronismo al ir reduciendo la resistencia de arranque, cuando se aplica la excitación de c.c. el motor se pone en sincronismo fig. 4-5.

Es así como este motor adquiere un par más elevado al arranque, pero teniendo todas las características de un motor síncrono.

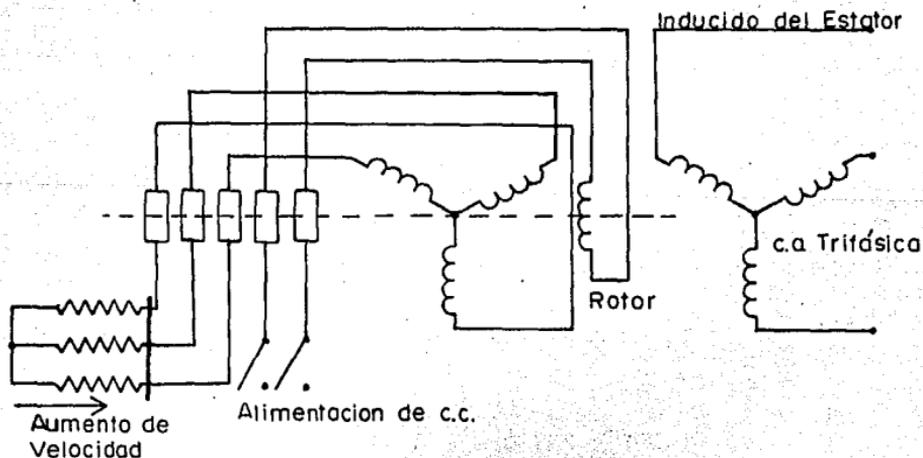


Fig. 4-5 Diagrama de un motor síncrono con su devanado amortiguador bobinado.

4.7. FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR SINCRONO EN ESTADO PERMANENTE.

Todos los motores producen una tensión generada mientras tiene lugar el efecto motor. Durante el periodo transitorio el motor síncrono va aumentando su velocidad como un motor de inducción, circulando una corriente de inducido en el devanado del estator. Esta corriente esta limitada por la tensión inducida, y la corriente que circula por las barras del rotor del devanado amortiguador.

Una vez aplicada la tensión a su excitatriz de c.c. y puesto a la velocidad de sincronismo, el flujo del rotor induce una tensión de c.a. en los conductores del estator. Como el motor síncrono esta en paralelo con las barras, la corriente que absorbe el motor es una corriente sincronizante, por lo tanto, es necesario tener tambien una potencia sincronizante para poder tener el rotor en sincronismo con la frecuencia de rotación del flujo del estator.

Para tener una visión más amplia del funcionamiento del motor síncrono, a continuación se representa vectorialmente la relación que existe entre la tensión de barras V_p la cual tomamos de referencia, y E_g que es la tensión generada, estas tensiones son iguales al instante de sincronización del motor pero desplazada de la posición a 180° un ángulo α que es debido a la potencia sincronizante recibida observar figura 4-6.

Teniendo en cuenta que aunque las tensiones tanto generada como de barras son iguales, la corriente del

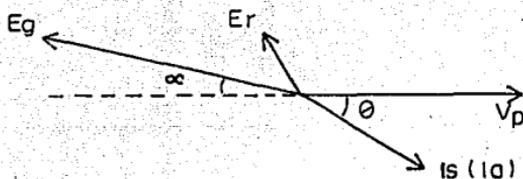


Fig.4-6

inducido del motor y la corriente sincronizante I_s o I_a --- son debidos a la tensión resultante E_r , por lo tanto la -- corriente sincronizante en el inducido se obtiene por la - siguiente ecuación.

$$I_a = \frac{V_p - E_g}{R_a + jX_s} = \frac{E_r}{Z_p}$$

Donde a I_a se le denomina a la corriente del inducido que es absorbida por fase por el motor síncrono en c.a., V_p es la tensión de fase aplicada a dicho inducido, E_g es la tensión generada por fase en los conductores del inducido, E_r es la resultante entre la tensión aplicada y la tensión generada, Z_p es la impedancia que se tiene en un motor síncrono dada en ohms por fase, y consta de la resistencia del inducido por fase expresada por R_a y la reactancia síncrona del inducido por fase expresado por X_s .

Haciendo una representación de aproximación lineal, es decir, teniendo en cuenta un flujo uniforme del inductor como del inducido, se crea un voltaje inducido diferente al voltaje de barras, esto es debido a que el devanado del estator tiene resistencia y reactancia, por lo tanto cada fase se puede representar por un circuito equivalente como la siguiente fig. 4-7.

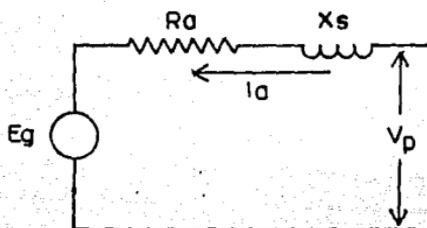


Fig. 4-7

Aplicando la ley de Kirchhoff de tensión para el circuito se tiene:

$$E_g = V_p - I_a R_a - j I_a X_s$$

Donde:

R_a = Resistencia de armadura.

V_p = Voltaje de barras.

E_g = Voltaje generado.

X_s = Reactancia síncrona.

Esto quiere decir que el motor síncrono se puede comparar más fácilmente con otros dispositivos que reciben energía eléctrica con impedancias y resistencias eléctricas.

Teniendo en cuenta que la reactancia síncrona --- cuenta con dos reactancias, la de armadura y la de dispersión.

$$X_s = X_a + X_l$$

Donde X_l es la reactancia de dispersión y es considerada como imperfección inevitable del devanado del estator.

Se estableció que en el instante de sincronización a las barras, la tensión generada era igual a la tensión de barras por fase pero opuesta, en este instante se cerraba el interruptor de alimentación al campo, si desacoplamos el motor de accionamiento bruscamente como cuando el motor sin carga se pone en sincronismo con la excitación de c.c., como ya no está siendo accionado el motor se retrasará un ángulo α desarrollando una tensión E_r . Pero el ángulo α puede ser insuficiente para mantener girando al motor, cuando la corriente en el inducido es también demasiado pequeña, sin embargo debemos mantener el giro para que los polos magnéticos del rotor giratorio retrasen unos pocos grados eléctricos más.

Cuando se retrasan los polos del rotor la tensión resultante E_r aumenta, existiendo también un aumento en la corriente de inducido I_a .

Aplicando una potencia sincronizante positiva al motor síncrono, $P = V_p I_a \cos \theta$ por fase necesaria para que este quede en sincronismo, su tensión generada esta desplazada 180° respecto a las barras, pero como la potencia ---- sincronizante supera el par resistente del motor producido por rozamiento y otro tipo de pérdidas, este gira a la velocidad de sincronismo con un retraso fijo α entre un ---- polo norte del rotor y un sur del estator.

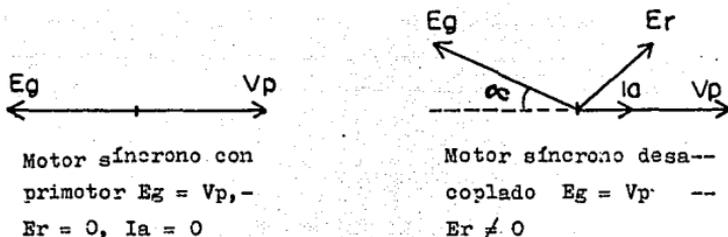


Fig. 4-8

Sin embargo α solo nos representa unos pocos - grados eléctricos, el número de grados geométricos repre-- sentada por β encuentran una relación con los grados eléctricos como sigue:

$$\beta = \frac{2\alpha}{P}$$

Donde:

β = Grados geométricos.

α = Grados eléctricos.

P = Número de polos.

Calculando E_r para cualquier valor de ángulo α , tensión de excitación y la tensión de fase aplicada en una máquina síncrona con la siguiente ecuación, fig. 4-9.

$$E_r = (V_p - E_g \cos \alpha) + j(E_g \sin \alpha)$$

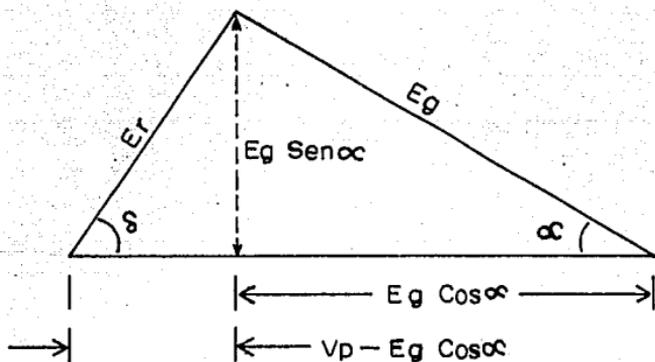


Fig. 4-9

4.8. CARGA EN LOS MOTORES SINCRONOS.

En los principios básicos de operación para motores eléctricos, ya sea de corriente continua como de corriente alterna, uno de los puntos más importantes es la generación de una fuerza electromotriz (fem) inducida opuesta al voltaje en barras, el campo magnético rotatorio corta a los conductores de armadura que son estacionarios generando esta, la fem inducida limita la corriente para cualquier carga en particular.

En el comportamiento del motor síncrono existen tres tipos de excitación para estas máquinas: a) excitación normal, b) subexcitación y c) sobreexcitación.

Teniendo en cuenta el tipo de excitación de la máquina síncrona y tomando en cuenta el aumento de carga tenemos:

1.- Aumento de carga para excitación normal. Esto es $V_p = E_g$. La velocidad del motor no debe disminuir como resultado del incremento de carga, pero ángulo de carga α puede aumentar.

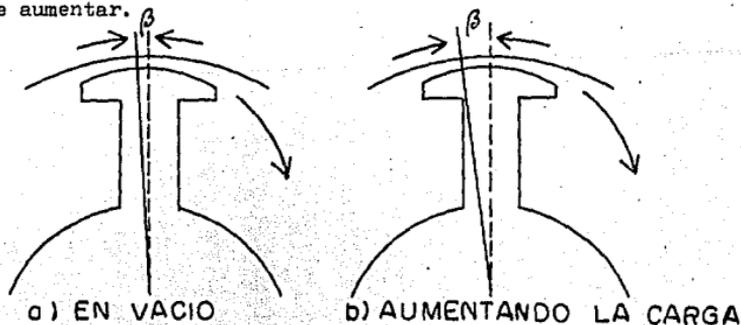
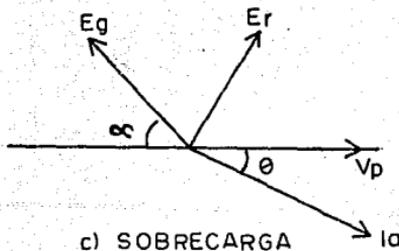
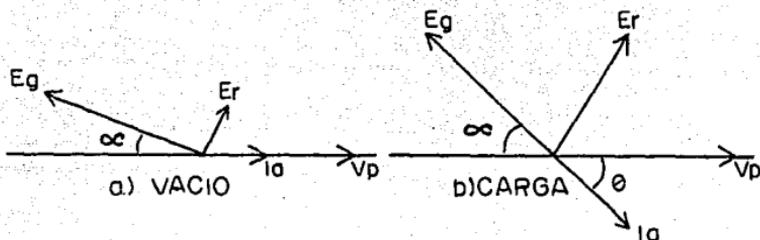


Fig.4-10

Como consecuencia al aumento del ángulo de carga α , también habrá un incremento de la tensión resultante E_r y la corriente de inducido I_a .

El diagrama vectorial del aumento de carga para excitación normal, nos dice que al aumentar la carga el ángulo α también aumenta, la tensión que resulta E_r tiende a aumentar rápidamente y el factor de potencia θ disminuye. Incluso en condiciones de sobrecarga el factor de potencia no se retrasa mucho fig. 4-11.

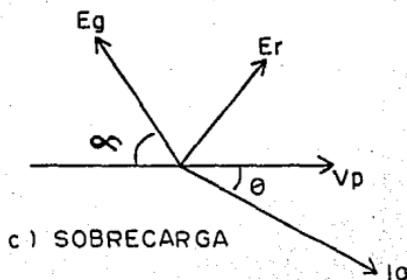
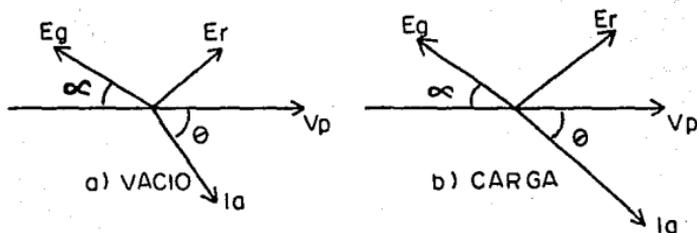
Fig. 4-11



2.- Aumento de carga en condiciones de subexcitación. Es decir $E_g < V_p$. Para este tipo de excitación tenemos que -- para una pequeña carga dada cuando el motor se ha subexcitado deliberadamente, la corriente de inducido I_a se retrasa casi 90° con respecto a la tensión inducida, pero al aumentar la carga, mejora el ángulo θ , es decir aumentar el factor de potencia.

Por otra parte, debido a la mayor tensión resultante E_r , circula más corriente I_a , el factor de potencia aumenta, es decir que la potencia generada por el inducido aumenta para satisfacer la carga fig. 4-12.

Fig. 4-12



3.- Aumento de carga para condiciones de sobreexcitación. Es decir $E_g > V_p$. Esto sucede cuando un motor síncrono genera una tensión mayor que la tensión de barras y sigue absorbiendo corriente de la línea, y como consecuencia sigue obteniendo potencia de las barras. Esto se debe a que la fem generada y la tensión de inducido no están defasadas 180° . Cuando la carga es pequeña, la tensión resultante E_r esta casi en fase con E_g , porque ésta es más grande que la tensión de barras V_p , por lo tanto, la corriente que circula I_a de inducido se adelanta casi 90° con respecto de la tensión de barras V_p . Al aplicar una carga más grande, el ángulo de fase entre la corriente y el voltaje de barras mejora, esto quiere decir, que se acerca más a la unidad fig. 4-13

Lo anterior significa que el motor síncrono sobreexcitado toma corrientes adelantadas de las barras.

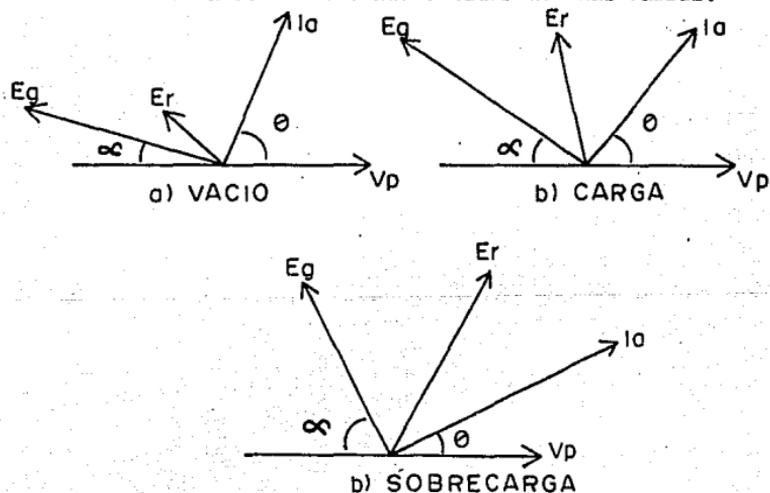


Fig. 4-13

4.9. CURVA V DE UN MOTOR SINCRONO.

Cuando el motor síncrono esta en estado permanente, existen ciertas características de operación que muestran la relación entre el voltaje generado, la corriente de campo, la corriente de armadura, factor de potencia y eficiencia del motor síncrono. Estas características tienen una representación gráfica por medio de curvas, que para cada caso tienen una aplicación práctica, estas curvas se denominan curvas V para motores síncronos.

Dichas curvas se obtienen al variar la excitación de campo de c.c. en el motor síncrono trifásico, que toma su energía de una fuente de alimentación con tensión constante, esto a su vez hace que el factor de potencia cambie, como consecuencia podemos controlar la corriente de armadura, ajustando la corriente de excitación de campo.

Lo anterior significa que cuando la corriente de campo se reduce, absorbe una corriente inductiva I_a superior a la que tendría para una excitación normal, es decir, con un factor de potencia igual a la unidad. Análogamente si dicho motor lo sobreexcitamos, es decir, se aumenta la corriente de campo, la corriente de inducido también aumenta, esto nos dice que la corriente de inducido también es más grande que la necesaria para la excitación normal.

Por otra parte la potencia que esta demandando el motor síncrono esta dada por:

$$P = \sqrt{3} V_p I_a \cos \theta$$

donde V_p es voltaje de barras, I_a corriente de armadura y $\cos \theta$ es el factor de potencia del motor. Teniendo en cuenta que la potencia del motor es constante, como también el voltaje que llega a dicho motor, se deduce que si existe una reducción del factor de potencia existirá un aumento de la corriente de armadura.

$$I_a = \frac{P}{V_p \cos \theta}$$

Para determinar la curva V experimentalmente en un laboratorio se usa la disposición mostrada enseguida fig. 4-14.

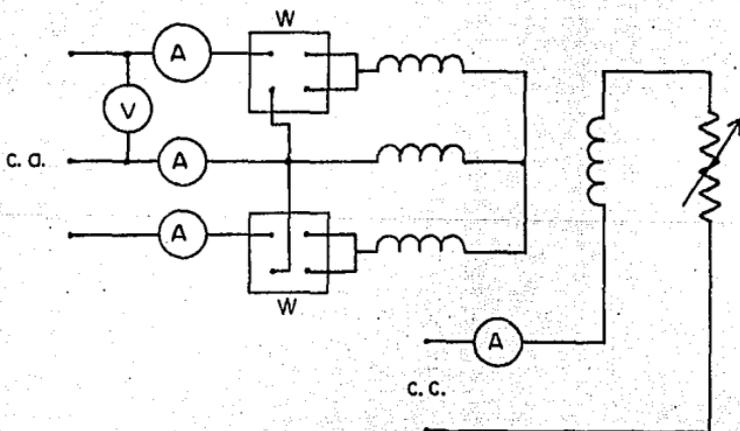


Fig. 4-14

El primer paso que se debe seguir es llevar el motor síncrono a la velocidad de sincrismo y la tensión generada alcanzará la tensión de barras. El motor se encuentra trabajando a velocidad síncrona y con un voltaje generado igual que el de barras, pero en vacío, en este momento se toman las lecturas del amperímetro, voltímetro y watímetro en el lado de c.a. para diferentes valores de corriente de excitación. La excitación se varía con la ayuda de un reóstato que se instala en el circuito de campo del motor síncrono, estas lecturas se deben tomar para distintos valores de carga como son: vacío, media carga y plena carga, obteniéndose las siguientes curvas fig. 4-15.

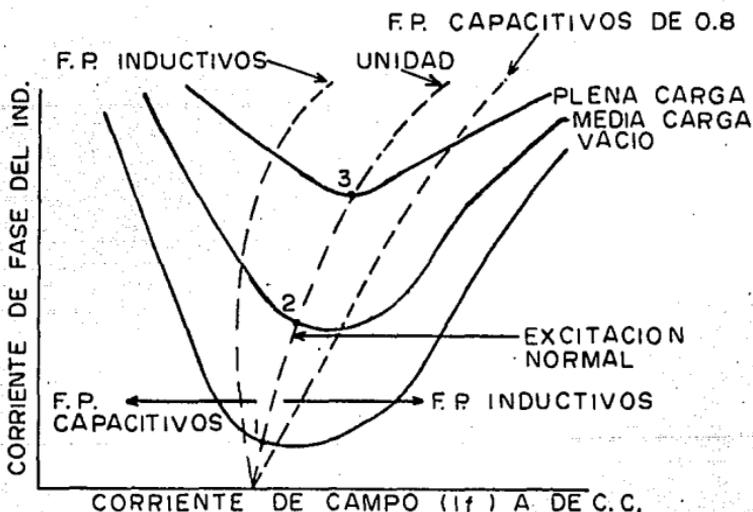


Fig. 4-15

4.1.0. TENSION GENERADA POR FASE DEL MOTOR SINCRONO.

Con un motor síncrono trifásico no importa que --
aumente la carga, la velocidad y la fem se puede decir que
son constantes, lo único que varía es el ángulo de carga --
que produce la tensión resultante E_r , este a su vez deter--
mina el valor de la corriente absorbida por el motor sín--
crons.

Tambien se ha podido apreciar que la fem induci--
da varía con la excitación de c.c., y la relación de fase -
se determina por el ángulo de carga.

En una máquina se puede conocer tensión de barras,
potencia del motor, pcos, frecuencia, y se puede descono--
cer el voltaje generado y el ángulo de carga.

Por otra parte habíamos estudiado antes que para
determinar el valor de la tensión generada, se necesita de--
terminar la resistencia efectiva del inducido por fase R_a -
y la reactancia síncrona X_s , que como veremos a continua--
ción se calculan por medio de los ensayos de vacío y corto-
circuito.

$$E_g = V_p - I_a (R_a + j X_s)$$

$$E_g = V_p - I_a Z_p$$

1.- Ensayo de vacío.

Para este tipo de prueba se obtiene la curva de --
magnetización (en vacío), esto se logra llevando el motor -
síncrono a la velocidad de sincronismo por medio de un pri-
motor estando en vacío el motor, esto se hace apartir del -

circuito equivalente elemental para estos motores fig. 4-17.

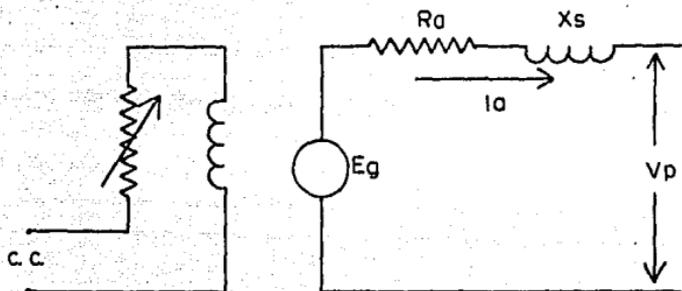


Fig.4-17

Fijando varios valores para la corriente de campo, se toma para cada valor las tensiones de línea a línea o línea a neutro, y se traza la curva que es denominada --- como la característica de circuito abierto o característica de saturación para máquinas síncronas.

En la curva siguiente si no fuera por la saturación del hierro, las características serían lineales de --- circuito abierto y estarían representadas por la línea de --- entrehierro fig. 4-18.

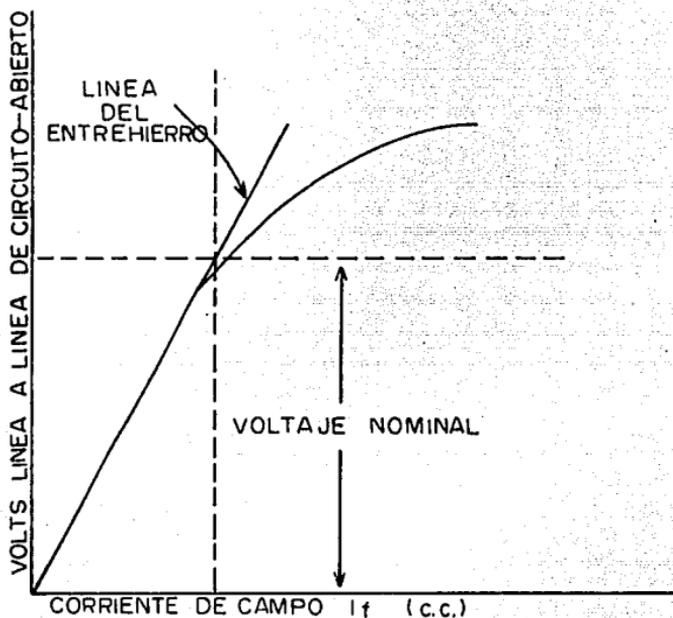


Fig. 4-18

2.- Ensayo de cortocircuito.

Este ensayo es otra parte de las pruebas para --- motores síncronos y es parte de la información elemental ---

para determinar numericamente los parámetros de la máquina, en esta prueba los devanados del estator se cortocircuitan de acuerdo con el diagrama siguiente fig. 4-19.

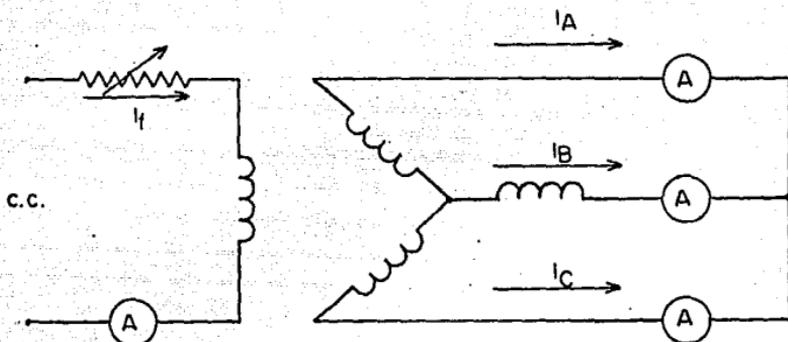


Fig. 4-19

El motor es llevado hasta su velocidad de sin--- cronismo por medio de un primotor, se fijan los valores para la corriente de campo y se toman las lecturas de la corriente de armadura, estas corrientes son iguales a la nominal o un poco superior a estos. Con los valores de la -- corriente de campo y los obtenidos de la corriente de armadura se hace la siguiente curva fig. 4-20.

Para esta prueba se observa que la gráfica ob--- tenida es completamente lineal, esto se debe a que el entrehierro no se satura al valor nominal de la corriente y ---

aun a valores superiores a este.

Cuando se obtienen las dos pruebas es muy común - que estos sean representados en una sola gráfica usando dos escalas diferentes en el eje de las ordenadas, una para el voltaje de vacío en terminales, y otra para la corriente -- de cortocircuito fig. 4-21.

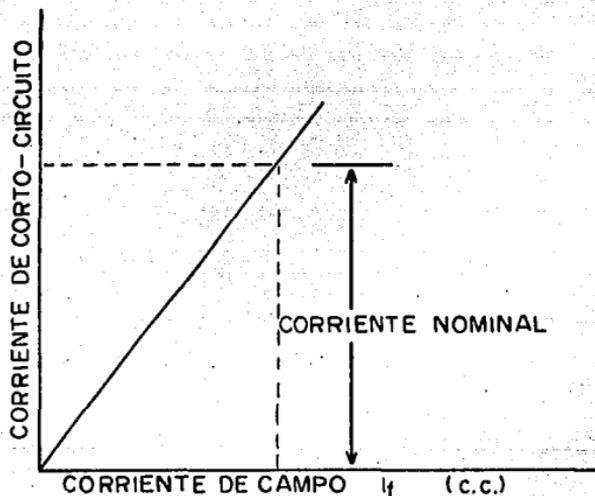


Fig. 4-20

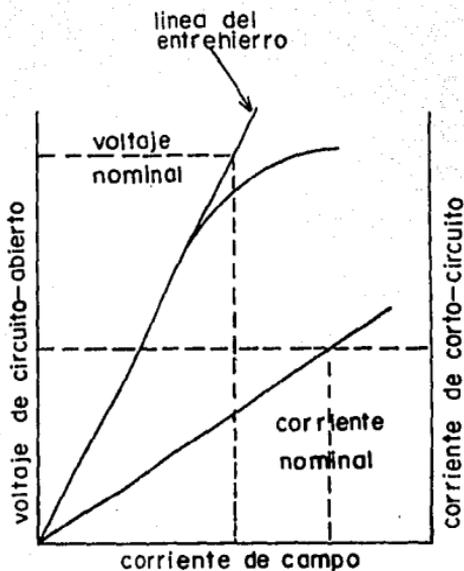


Fig. 4-21

La relación que existe entre el voltaje de vacío (nominal) y la corriente de cortocircuito se conoce como reactancia síncrona:

$$X_s = \frac{V_o}{I_{cc}} = \frac{E_g}{I_{cc}}$$

Donde:

V_o = Voltaje nominal.

I_{cc} = Corriente de cortocircuito.

X_s = Reactancia síncrona.

Habiendo obtenido el valor de la reactancia síncrona, ahora se expondrá la forma en que se obtiene el valor de la resistencia de inducido. Se conecta en estrella el inducido, y entre fases se alimenta con corriente continua como se muestra en la figura siguiente 4-22.

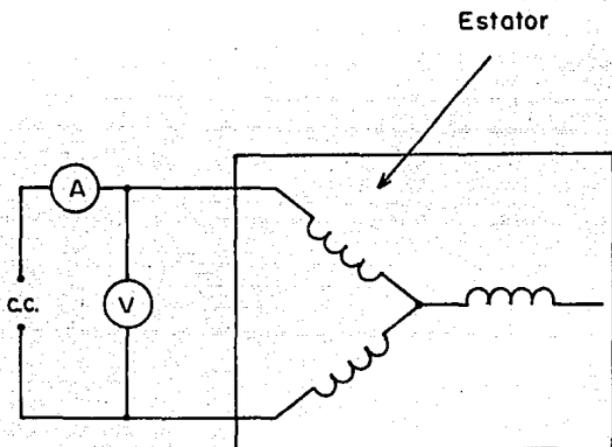


Fig. 4-22

Se usa una fuente de baja tensión de corriente -- continua y el método de voltímetro amperímetro, se emplea - corriente continua para no tener lecturas erróneas por pérdidas de acoplamiento en la estructura de los polos de excitación y en el hierro de alrededor. Con esta prueba se -- obtiene el valor de la resistencia de inducido por fase en c.c., y despues se hace la relación $R_{ca} = 1.5 R_{cc}$ para poder obtener la resistencia de inducido por fase para corrien te alterna, esto se logra mediante la siguiente fórmula:

$$R_{cc} = \frac{V}{A \times 2}$$

Donde:

V = Lectura del voltímetro.

A = Lectura del amperímetro..

Rc.a. = 1.5 Rcc

Por otra parte tenemos que la caída de tensión E_r , es debido a la impedancia síncrona para cualquier corriente dada del inducido, $I_a Z_p$.

$$E_r = I_a (R_a + j X_s)$$

$$E_r = I_a Z_p$$

Al hacer las pruebas de ensayo en vacío y corto-- circuito al igual que la de corriente continua para deter-- minar la resistencia efectiva por fase R_a y la reactancia - síncrona, se pueden obtener los valores de la tensión ge--- nerada E_g por medio de la expresión siguiente:

$$E_g = V_p - I_a Z_p$$

Usando la ley de los cosenos:

$$E_g^2 = E_r^2 + V_p^2 - 2 E_r V_p \cos \delta$$

En la que δ es la diferencia angular para cualquier factor de potencia entre V_p y E_r , V_p es la tensión de barras por fase, E_r la caída de tensión debida a la impedancia síncrona para la corriente de inducido.

A diferentes valores del factor de potencia, la diferencia angular nos queda; para FP unidad $\delta = \beta$, para FP capacitivo $\delta = \beta + \theta$ y para FP inductivo $\delta = \beta - \theta$, -- en donde β es igual al arcotangente de X_s/R_a y $\cos \theta$ es el factor de potencia del motor síncrono fig. 4-23.

Habiendo obtenido la tensión generada por medio de la ecuación anterior, se determina el ángulo de carga -- para cualquier factor de potencia, usando el teorema de -- cosenos

$$\alpha = \text{Arc Cos} \left[\frac{E_g^2 + V_p^2 - E_r^2}{2 E_g V_p} \right]$$

$$\alpha = \text{Arc Tan} \left[\frac{I_a X_s}{V_p - I_a R_a} \right] \quad \text{----- F.P. unidad.}$$

$$\alpha = \text{Arc Tan} \left[\frac{I_a Z_p \text{ Sen } (180 - \delta)}{V_p + I_a Z_p \text{ Cos } (180 - \delta)} \right] \quad \text{---- F.P. capacitivo.}$$

$$\alpha = \text{Arc Tan} \left[\frac{I_a Z_p \text{ Sen } \delta}{V_p - I_a Z_p \text{ Cos } \delta} \right] \quad \text{----- F.P. inductivo.}$$

En la siguiente hoja se hace una representación gráfica de la tensión generada E_g por fase, usando la tensión de inducido V_p como referencia para los distintos valores de factor de potencia.

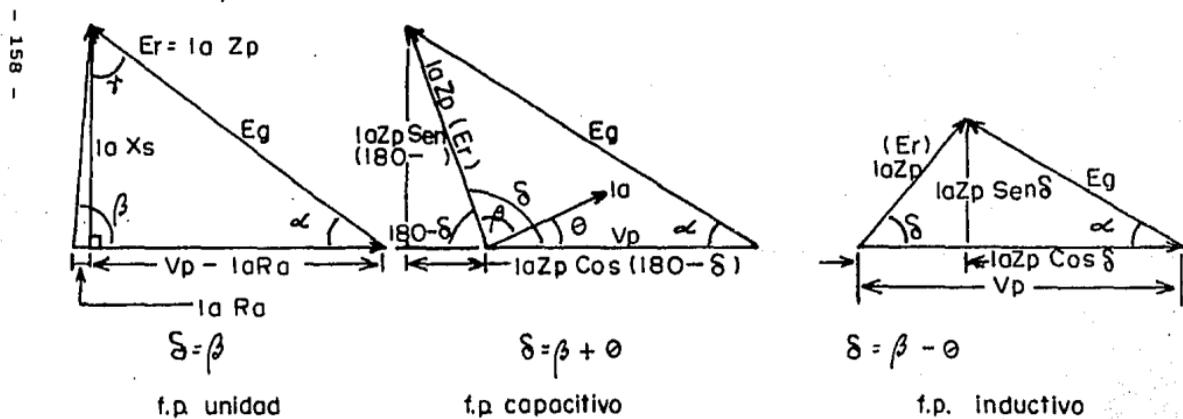
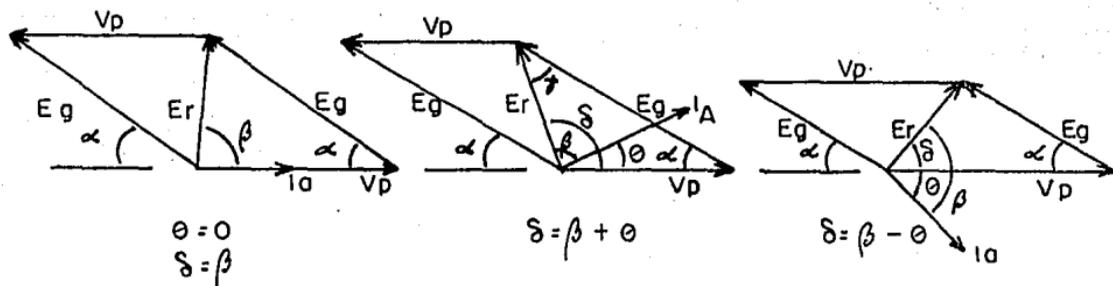


Fig. 4-23

Esto nos lleva a tener la tensión generada para cada factor de potencia como sigue;

$$E_g = (V_p - I_a R_a) + j I_a X_s \quad \text{F.P. unidad.}$$

$$E_g = V_p + I_a Z_p \cos(180 - \delta) + j I_a Z_p \sin(180 - \delta) \\ \text{F.P. capacitivo.}$$

$$E_g = (V_p - I_a Z_p \cos \delta) + j I_a Z_p \sin \delta \quad \text{F.P. inductivo.}$$

Utilizando los valores de la corriente de inducido I_a como referencia para facilitar la comprensión nos queda como sigue:

$$E_g = (V_p - I_a R_a) + j I_a X_s$$

$$\alpha = \text{Arc Tan} \left[\frac{I_a X_s}{V_p - I_a R_a} \right] = \text{Arc Sen} \left[\frac{E_r}{E_g} \right] \text{ Sen } \delta \quad \text{FP Unidad}$$

$$E_g = (V_p \cos \theta - I_a R_a) + j(V_p \sin \theta - I_a X_s)$$

$$\alpha = \text{Arc Tan} \left[\frac{V_p \sin \theta + I_a X_s}{V_p \cos \theta - I_a R_a} \right] - \theta = \text{Arc Sen} \left[\frac{E_r}{E_g} \right] \text{ Sen } \delta \quad \text{FP Capacitivo}$$

$$E_g = (V_p \cos \theta - I_a R_a) + j(V_p \sin \theta - I_a X_s)$$

$$\alpha = \theta - \frac{V_p \sin \theta - I_a X_s}{V_p \cos \theta - I_a R_a} = \text{Arc Sen} \left[\frac{E_r}{E_g} \right] \text{ Sen } \delta \quad \text{FP Inductivo}$$

C A P I T U L O V

METODO DEL MOTOR SINCRONO

5.1. MEJORA DEL FACTOR DE POTENCIA USANDO MOTOR SINCRONO.

Una de las aplicaciones de los motores síncronos entre tantas otras, se localiza en las industrias que tienen un elevado número de motores de inducción, donde es --- posible usarlos como una de las alternativas para mejorar - el factor de potencia.

Una de las ventajas del motor síncrono, es que -- el factor de potencia se puede ajustar variando la excita-- ción en el campo.

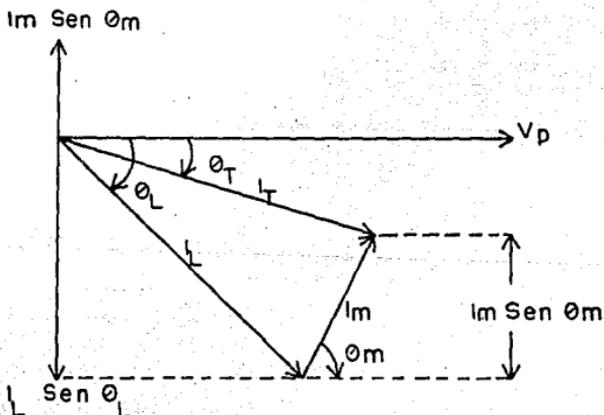
Generalmente los rotores de motores síncronos -- convencionales son de polos salientes, siendo estos motores accesibles para velocidades inferiores a 500 rpm para car-- gas de conexión directa.

Comunmente los motores síncronos son usados en -- grandes industrias por la característica de suministrar su potencia mecánica nominal y simultaneamente absorber una -- corriente capacitiva de las barras, esta corriente capaci-- tiva que es absorbida por el motor síncrono, es la que com-- pensa la corriente inductiva (atrasada) que absorben los -- motores de inducción, obteniendose con esta compensación -- un aumento en el factor de potencia global en la instalación donde se colocó en paralelo el motor síncrono.

Cuando el factor de potencia global de una ins--- talación industrial es bajo, por ejemplo del 0.65 atrasado,

la generación del sistema y los aparatos de alimentación -- solo suministran el 65% de la potencia total que se podría suministrar con un factor de potencia unidad, por tal motivo la Compañía suministradora penaliza los factores de potencia bajos; dando como resultado un costo mayor en el funcionamiento de la industria.

Los motores síncronos para la corrección del factor de potencia resultan más ventajosos que los capacitores de potencia, en las grandes instalaciones, nuevas o en proceso de ampliación, donde pueda encontrar cabida el uso de motores grandes (de 500 Hp o más). Se consideran los motores síncronos como primera posibilidad, porque a los mismos se les puede sobreexcitar para funcionar a factores de potencia capacitivos de 0.8 adelantado u otros valores, y a la vez suministrar potencia mecánica nominal para accionar la carga.



La gráfica anterior muestra en forma vectorial, -
la mejora del factor de potencia producida por un motor sín-
cromo.

DONDE:

I_L --- Nos representa la carga inductiva existente en la -
instalación industrial (antes de colocar el motor -
síncromo), retrasada respecto a V_p (tensión de ba--
rras) un ángulo θ_L .

I_m --- Representa la corriente capacitiva absorbida por --
el motor síncromo, conectado en paralelo a la car--
ga y a las mismas barras. La corriente I_m capaci--
tiva se obtiene al tener el motor síncromo sobreexci--
tado y con una excitación constante, estando esta -
corriente adelantada un ángulo θ_m con respecto a -
 V_p .

I_T --- Muestra la corriente resultante producida despues de
conectar el motor síncromo, siendo esta corriente -
la suma vectorial de I_L e I_m .

El factor de potencia es mejorado con el motor --
síncromo debido a que la componente original en cuadratura
(en retraso) de la corriente de carga $I_L \text{ Sen } \theta_L$ esta, en -
efecto, neutralizada en parte por la componente en cuadra--
tura en avance de la corriente del motor síncromo -----
 $I_m \text{ Sen } \theta_m$, produciendose un ángulo θ_T que es mucho menor
que θ_L , con las consiguientes ventajas de mejor factor de -
potencia.

El ejemplo siguiente nos muestra la utilidad ob--

tenida al mejorar el factor de potencia y reducir la corriente de carga inductiva a través de un motor síncrono.

E J E M P L O

En una instalación industrial se tiene un factor de potencia de 0.65 atrasado, en la cual se consume una potencia total de 4500 KW, con una tensión de barras de 6000V. Por ampliación de dicha industria, debe adquirirse un grupo motor generador de c.c. para suministrar aproximadamente 1 500 KW. La elección del motor se centra entre un motor síncrono bipolar de 2 000 HP, 6 000 V, 60 Hz, trifásico y con un factor de potencia de 0.8 capacitivo, conectado en estrella. Teniendo una resistencia efectiva de inducido de 0.52Ω y una reactancia síncrona de 4.2Ω / fase. Y un motor de inducción de 2 000 HP, 6 000 V, y cuyo factor de potencia a plena carga es de 0.8 inductivo. Suponiendo un rendimiento del 92% para cada motor, calcular:

- a) La corriente total de carga y el factor de potencia cuando se usa el motor de inducción.
- b) La corriente total de carga y el factor de potencia usando el motor síncrono.
- c) El porcentaje de reducción de corriente de carga producida en (b) expresado como porcentaje de (a)
- d) La mejora del factor de potencia global.

S O L U C I O N

- a) Efectuando la conversión de los HP a Watts con su respectivo rendimiento del motor de inducción.

$$\text{HP} \times \frac{746\text{W}}{1 \text{ HP}} \times \frac{1}{\eta} = \text{W}$$

$$\frac{2\,000 \times 746\text{W}}{\text{HP} (0.92)} = 1\,621.73 \text{ KW}$$

Obteniendo la corriente inductiva absorbida por el motor de inducción.

$$I_{MI} = \frac{W}{\sqrt{3} E_L \cos \theta} = \frac{1621.73}{\sqrt{3} (6\,000)(0.8)}$$

$$I_{MI} = 195.06 \quad \underline{- 36.86 \text{ A}}$$

Obteniendo la corriente de carga inductiva de la fábrica

$$I_f = \frac{W}{\sqrt{3} E_L \cos \theta} = \frac{4\,500\,000}{\sqrt{3} (6\,000)(0.65)}$$

$$I_f = 666.17 \quad \underline{- 49.45 \text{ A}}$$

Efectuando la suma de la corriente inductiva del motor de inducción y la corriente de carga inductiva de la fábrica obtenemos la corriente total de carga que obtendríamos si añadimos el motor de inducción a la fábrica.

$$\begin{array}{r} I_{MI} = 195.06 \quad \underline{-36.86} = 156.06 - j 117.009 \\ + \\ I_f = 666.17 \quad \underline{-49.45} = 433.08 - j 506.18 \\ \hline I_T = 857.58 \quad \underline{-46.60} = 589.14 - j 623.189 \end{array}$$

$$I_T = 857.58 \sqrt{-46.60} \text{ A} \quad (\text{Para un factor de potencia inductivo de } 0.68).$$

- b) Efectuando la conversión de los Hp a Watts con su respectivo rendimiento del motor síncrono.

$$\text{HP} \times \frac{746 \text{ W}}{1 \text{ HP}} \times \frac{1}{\eta} = \text{W}$$

$$\frac{(2\,000 \text{ HP})(746) \text{ W}}{\text{HP} (0.92)} = 1\,621.73 \text{ KW}$$

Obteniendo la corriente capacitiva absorbida por el motor síncrono.

$$I_{MS} = \frac{W}{\sqrt{3} E_L \cos \theta} = \frac{1\,621.73}{\sqrt{3} (6\,000)(0.8)} =$$

$$I_{MS} = 195.06 \sqrt{36.86} \text{ A}$$

Efectuando la suma de la corriente capacitiva del motor síncrono y la corriente de carga inductiva de la fábrica, obtenemos la corriente total de carga que conseguiríamos si añadimos el motor síncrono a la fábrica.

$$I_{MS} = 195.06 \sqrt{36.86} = 156.06 + j 117.009$$

$$+ I_f = \frac{666.17 \sqrt{-49.45}}{+} = \frac{433.08 - j 506.18}{+}$$

$$I_T = 706.07 \sqrt{-33.44} = 589.14 - j 389.171$$

$$I_T = 706.07 \sqrt{-33.84} \text{ A} \quad (\text{Para un factor de potencia inductivo de } 0.83)$$

c) Porcentaje de reducción de la carga.

$$\frac{\text{Carga original} - \text{Carga final}}{\text{Carga original}} =$$
$$= \frac{857.58 - 706.07}{857.58} \times 100 = 17.66\%$$

d) Mejora del factor de potencia.

Usando el motor síncrono en lugar del motor de -- inducción aumentará el factor de potencia global de la fábrica de 0.68 inductivo a 0.83 inductivo.

5.2. CALCULO DEL F.P. O LOS KVA NECESARIOS DE UN MOTOR SINCRONO, PARA MEJORAR EL FACTOR DE POTENCIA A UN VALOR PREDETERMINADO.

Este cálculo se facilita teniendo los siguientes valores: Potencia real y el factor de potencia al cual trabaja el sistema, el valor al cual se desea mejorar el factor de potencia, como también el factor de potencia y la -- potencia al cual trabajará el motor síncrono.

Considerando que la manera más fácil de digerir -- el método empleado, es a través de un ejemplo, se desarrolló el siguiente problema en el cual se expone con bastante detalle el procedimiento empleado.

E J E M P L O

En una fábrica con máquinas-herramientas el consumo por este concepto es de 800 KW a factor de potencia 0.65 inductivo. Se desea añadir al sistema un motor síncrono -- para mejorar el factor de potencia, calcular:

- a) Los KVA necesarios del motor síncrono para mejorar el factor de potencia de la fábrica a 0.85 inductivo, si el factor de potencia del motor síncrono es de 0.9 -- capacitivo.
- b) El factor de potencia al que debe trabajar el motor -- síncrono que se va a añadir, para mejorar el factor de potencia de la fábrica a 0.85 inductivo, si dicho motor tiene -- una capacidad de 550 HP y un rendimiento del 92%.

S O L U C I O N

- a) Potencia que demanda la fábrica.

$$KVA = \frac{800KW}{0.65} = 1\ 230.76$$

$$KVA = 1\ 230.76$$

$$KVAR = \sqrt{(KVA)^2 - (KW)^2}$$

$$KVAR = \sqrt{(1230.76)^2 - (800)^2}$$

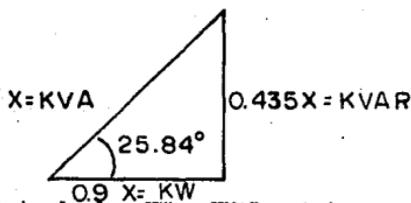
$$KVAR = 935.29$$

Expresando los KW y KVAR del motor síncrono en base al factor de potencia y los KVA del mismo, suponiendo los KVA = x

$$KVA = x$$

$$KW = 0.9x$$

$$KVAR = 0.435x$$



Realizando la sumatoria de los KW y KVAR originales con los del motor síncrono que se va a añadir al sistema tenemos:

$$\sum KW = 800 + 0.9X$$

$$\sum KVAR = 935.29 - 0.435X$$

Obteniendo los KVA finales despues de haber sido añadido el motor síncrono.

$$KVA_{\text{finales}} = \sqrt{(KW)^2 + (KVAR)^2} =$$

$$KVA = \sqrt{(\sum KW)^2 + (\sum KVAR)^2}$$

$$KVA = \sqrt{(800 + 0.9X)^2 + (935.29 - 0.435X)^2}$$

Como el F.P. = KW/KVA, y el factor de potencia fue predeter-
minado entonces sustituimos los valores de potencia finales

$$\frac{\sum KW}{\sum KVA} = 0.85$$

$$0.85 = \frac{800 + 0.9X}{\sqrt{(800 + 0.9X)^2 + (935.29 - 0.435X)^2}}$$

Elevando al cuadrado ambos lados de la ecuación para elimi-
nar la raíz cuadrada y realizando las operaciones corres-
pondientes.

$$(0.85)^2 = \frac{(800 + 0.9X)^2}{\left[\sqrt{(800 + 0.9X)^2 + (935.29 - 0.435X)^2} \right]^2}$$

$$(0.85)^2 = \frac{(800 + 0.9X)^2}{(800 + 0.9X)^2 + (935.29 - 0.435X)^2}$$

$$0.7225 = \frac{64 X 10^4 + 1440X + 0.81X^2}{64 X 10^4 + 1440X + 0.81X^2 + 874767.38 -}$$

$$0.7225 = \frac{64 X 10^4 + 1440X + 0.81X^2 - 813.7023X + 0.189225X^2}{1514767.4 + 626.2977X + 0.999255X^2}$$

$$1094419.4 + 452.50009X + 0.7219617X^2 = 64 \times 10^4 + 1440X + 0.81X^2$$

$$-0.0880383X^2 - 987.49991X + 454419.4 = 0$$

$$X = \frac{987.49991 \pm \sqrt{975156.07 + 160025.25}}{-0.1760766}$$

$$X = \frac{987.49991 \pm \sqrt{1135181.3}}{-0.1760766}$$

$$X = \frac{987.49991 \pm 1065.4489}{-0.1760766}$$

$$X_1 = -11\,659.407$$

$$X_2 = 442.69931$$

Los motores proporcionan una potencia, la cual no puede ser negativa, como $X = \text{KVA}$, entonces tomamos a $X_2 = 442.69931 \text{ KVA}$ como solución, que es la potencia necesaria del motor síncrono para mejorar el factor de potencia de la fábrica --- de 0.65 inductivo a 0.85 inductivo.

Datos del motor que se requiere:

F.P. = 0.9 Capacitivo

$$\text{Potencia} = \frac{(442699.31)(0.9) \text{ W-HP}}{746 \text{ W}} \text{ ---}$$

$$\text{Potencia} = 534 \text{ HP}$$

b) Potencia que demanda la fábrica.

$$\text{KVA} = \frac{800 \text{ KW}}{0.65} = 1230.76 \text{ KVA}$$

$$\text{KVA} = 1230.76$$

$$KVAR = \sqrt{(KVA)^2 - (KW)^2}$$

$$KVAR = \sqrt{(1230.76)^2 - (800)^2}$$

$$KVAR = 935.29$$

Obteniendo los KW del motor síncrono que se va a añadir, --
a partir de los HP y su rendimiento.

$$KW = \frac{550 \times 746}{1000 \times 0.92} = 445.97826$$

$$KW = 445.97826$$

Realizando la sumatoria de los KW originales con los del --
motor síncrono que se va a añadir al sistema.

$$\sum KW = 800 KW + 445.97826 KW$$

$$\sum KW = 1245.97826$$

Para obtener los KVA _{finales} tomamos como datos los -----
KW _{finales} ($\sum KW$) y el factor de potencia al que se desea --
que trabaje la fábrica.

$$KVA = \frac{KW}{F.P.}$$

$$KVA = \frac{1245.97826}{0.85}$$

$$KVA = 1465.8567$$

Como $KVAR = KVA \text{ Sen } (\text{Arc Cos } F.P.)$

$$KVAR_{\text{ finales }} = 1465.8567 \text{ Sen } (\text{Arc Cos } 0.85)$$

$$KVAR = 772.18794$$

Los KVAR que suministra el motor síncrono a la fábrica es la
diferencia de los KVAR _{originales} y los KVAR _{finales} .

KVAR del motor síncrono = KVAR_{originales} - KVAR _{finales}

KVAR = 935.29 KVAR - 772.18794 KVAR

KVAR del motor síncrono = 163.10206

Teniendo los KW y los KVAR a los que debe trabajar el motor síncrono para mejorar el factor de potencia al valor deseado, podemos encontrar el ángulo θ y a partir de este, el -- factor de potencia al que debe trabajar dicho motor.

$$\text{Tan } \theta = \frac{\text{KVAR}}{\text{KW}}$$

$$\text{Tan } \theta = \frac{163.10206}{567.6087} = 0.2873495$$

$$\theta = \text{Arc Tan } 0.2873495 = 16.031977^\circ$$

$$\text{F.P.} = \text{Cos } \theta = \text{Cos } 16.031977^\circ = 0.9611077$$

$$\text{F.P.} = 0.9611077$$

Datos del motor que se necesita

F.P. = 0.9611077 Adelantado

Potencia = 550 HP

El problema siguiente nos muestra en forma grá---fico-analítica, como obtener los KVA necesarios de un motor síncrono para mejorar el factor de potencia a un valor deseado en una empresa, o también como obtener el factor de -- potencia al que debe trabajar un motor síncrono para mejo---rarel factor de potencia a un valor predeterminado en una -- instalación industrial.

E J E M P L O

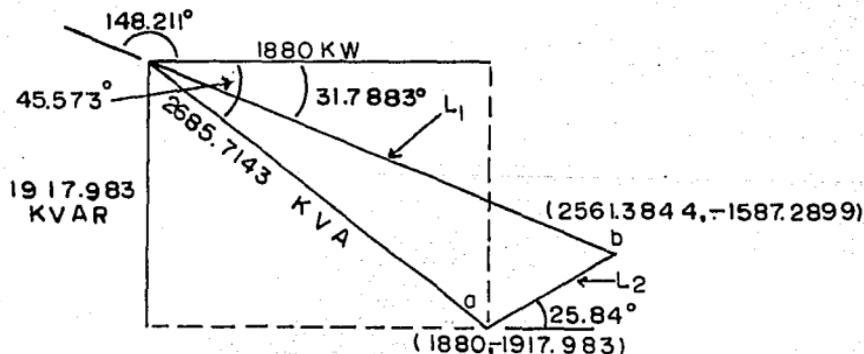
En una fábrica se tiene una carga total de 1880 KW con un factor de potencia de 0.7 inductivo y una tensión de alimentación de 6 000 volts.

Se desea mejorar el factor de potencia de toda la instalación a un valor de 0.85 inductivo, determinar:

- Los KVA necesarios de un motor síncrono si el factor de potencia de dicho motor es de 0.9 adelantado.
- El factor de potencia a que debe funcionar un motor síncrono de 800 KVA para mejorar el factor de potencia de la instalación industrial a un valor deseado.

S O L U C I O N

- Para poder entender con mayor claridad la solución a este inciso a continuación trasaremos la gráfica en la cual apoyaremos la solución a dicho punto.



Los KVA del motor síncrono en la gráfica corresponden a --- la distancia \overline{ab} , que es la recta L_2 .

La recta L_1 corresponde a los KVA de la instalación industrial cuando ya tiene un valor de su factor de potencia de 0.85 atrasado.

Apoyandonos en la geometría analítica encontraremos las --- ecuaciones de las rectas L_1 y L_2 , con la siguiente fórmu--- la de la ecuación de la recta punto-pendiente:

$$Y - Y_1 = m(X - X_1)$$

Donde: m = Pendiente de la recta

X_1, Y_1 = Corresponden a un punto cualesquiera de la recta.

a continuación la ecuación de la recta L_2

$$L_2 = Y - Y_1 = m(X - X_1)$$

$$m = \tan \theta = \tan 25.842^\circ = 0.484$$

$$X_1, Y_1 = (1880, -1917.983)$$

sustituyendo los valores tenemos:

$$L_2 = Y + 1917.983 = 0.484(X - 1880)$$

$$Y + 1917.983 = 0.484X - 909.92$$

$$Y + 1917.983 - 0.484X + 909.92 = 0$$

$$\underline{Y - 0.484X + 2827 = 0} \quad \text{-----} \quad 1$$

A continuación la ecuación de la recta L_1

$$L_1 = Y - Y_1 = m(X - X_1)$$

$$m = \tan \theta = \tan 148.211^\circ = -0.6197$$

$$X_1, Y_1 = (C, 0)$$

sustituyendo los valores tenemos:

$$L_1 = Y - 0 = -0.6197 (X - 0)$$

$$Y = -0.6197 X$$

$$\underline{Y + 0.6197 X = 0} \quad \text{----- 2}$$

necesitamos encontrar el punto b, este punto lo encontraremos ya que es la intersección de la recta L_1 con la recta L_2 es dicho punto. El desarrollo que sigue a continuación es para encontrar dicho punto.

Despejando Y de la ecuación 2 y sustituyendo en la ecuación 1

de la ec. 2 $Y = - 0.6197 X$

Sustituyendo en la ecuación 1

$$- 0.6197 X - 0.484 X + 2827 = 0$$

$$- 1.1037 X = - 2827$$

$$X = 2561.3844$$

El valor de X que acabamos de encontrar lo sustituimos en la ecuación 2.

$$Y + 0.6197 X = 0$$

$$Y + 0.6197 (2561.3844) = 0$$

$$Y = - 1587.2899$$

El punto de intersección de las dos rectas es el siguiente que es el punto b.

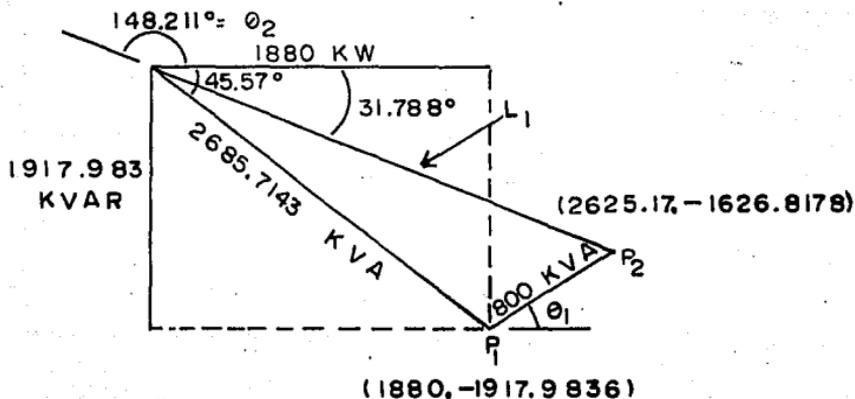
$$(2561.3844, - 1587.2899)$$

Teniendo los valores de los puntos a y b ahora podremos encontrar la distancia \overline{ab} , que corresponde a los KVA necesarios del motor síncrono para mejorar el factor de potencia:

de la instalación a un valor de 0.85 atrasado.

$$\begin{aligned}
 \overline{ab} &= \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2} \\
 &= \sqrt{(2561.3844 - 1880)^2 + (1587.2889 + 1917.9831)^2} \\
 &= \sqrt{464284.7 + 109357.99} \\
 &= \sqrt{573642.69} \\
 &= \underline{757.392 \text{ KVA}}
 \end{aligned}$$

- b) Para poder entender con mayor claridad la solución a -- este inciso a continuación trasaremos la gráfica en la cual apoyaremos la solución a dicho punto.



En este inciso necesitamos encontrar el P.P. al que debe -- trabajar el motor síncrono. Tal factor de potencia es ---- igual a:

$$\text{F.P.} = \cos \theta_1$$

Por tal motivo debemos encontrar el valor de θ_1 . Pero pri-- mero encontraremos la ecuación de la recta L_1 .

A continuación la ecuación de la recta L_1 .

$$L_1 = Y - Y_1 = m (X - X_1)$$

$$m = \tan \theta_2 = \tan 148.211667^\circ = -0.6197443$$

$$X_1, Y_1 = (0, 0)$$

Sustituyendo los valores tenemos:

$$L_1 = Y - 0 = -0.6197443 (X - 0)$$

$$Y = -0.6197443 X$$

$$Y + 0.6197443 X = 0 \text{ ----- } 3$$

Necesitamos encontrar el punto P_2 , tenemos la distancia $\overline{P_1 P_2}$ que es igual a 800, y el punto P_1 (1880, -1917.9836). Apli-- cando la ecuación de distancia entre dos puntos encontrare-- mos el punto P_2 .

$$\overline{P_1 P_2} = 800 = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}$$

$$(800)^2 = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}$$

Sustituyendo los Valores de P_1 en la ecuación anterior te-- nemos:

$$(800)^2 = (X_2 - 1880)^2 + (Y_2 + 1917.9836)^2$$

$$(800)^2 = X_2^2 - 3760 X_2 + 3534400 + Y_2^2 + 3835.9672 Y_2 + 3678661.1$$

$$X_2^2 + Y_2^2 - 3760 X_2 + 3835.9672 Y_2 + 6573061.1 = 0 \text{ -----4}$$

Despejando Y de la ecuación 3 tenemos lo siguiente.

$$Y = -0.6197 X$$

Sustituyendo el valor de Y que acabamos de encontrar en la ecuación 4 tenemos lo siguiente:

$$X_2^2 + (-0.6197X_2)^2 - 3760 X_2 + 3835.9672(-0.6197X_2) + 6573061.1 = 0$$

$$X_2^2 + 0.38402X_2^2 - 3760X_2 - 2377.1489X_2 + 6573061.1 = 0$$

$$1.38402 X_2^2 - 1382.8511 X_2 + 6,573,061.1 = 0$$

Resolviendo la expresión anterior, ya que es una ecuación de segundo grado se usa la siguiente ecuación:

$$X = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$X = \frac{6137.1489 \pm \sqrt{(-6137.1489)^2 - 4(1.38402)(6573061.1)}}{2(1.38402)}$$

$$X = \frac{6137.1489 \pm \sqrt{(37664597 - 36388992)}}{2.76804}$$

$$X = \frac{6137.1489 \pm \sqrt{1275604.6}}{2.76804}$$

$$X = \frac{6137.1489 \pm 1129.4267}{2.76804}$$

$$X_1 = \frac{7266.5756}{2.76804}$$

$$X_2 = \frac{5007.7222}{2.76804}$$

$$X_2 = 1809.1221$$

Tomamos a $X_1 = 2625.17$ como uno de los puntos de P_2 no tomamos a X_2 porque este valor nos representa la cantidad de KW que habra en la instalación industrial despues de haber corregido el factor de potencia, y no puede ser menor que 1880 KW y X_2 era menor.

Sustituyendo el valor de $X_1 = 2625.17$ en la ecuación 3 tenemos lo siguiente:

$$Y + 0.6197443 X = 0$$

$$Y + 0.6197443 (2625.17) = 0$$

$$Y = -1626.8178$$

El punto P_2 tiene las siguientes coordenadas

$$(2625.17, -1626.8178)$$

Sabemos que la pendiente de una recta es igual a:

$$m = \text{Tan } \theta_1 = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$$

$$m = \text{Tan } \theta = \frac{-1626.8178 + 1917.9836}{2625.17 - 1880}$$

$$m = \text{Tan } \theta = 0.3907374$$

$$\theta_1 = \text{Arc Tan } 0.3907374 = 21.342447^\circ$$

$$\text{F.P.} = \text{Cos } \theta_1 = \text{Cos } 21.342447^\circ = 0.9314219$$

$$\text{F.P.} = 0.9314219 \text{ adelantado.}$$

El factor de potencia al que debe trabajar el motor síncrono para mejorar el factor de potencia de la instalación a 0.85 atrasado es; 0.9314219 Adelantado.

5.3. CONDENSADORES SINCRONOS

Cuando el motor síncrono se hace trabajar a factor de potencia capacitivo, en paralelo con cargas inductivas, como por ejemplo, motores de inducción que operan a factor de potencia atrasado, transformadores, máquinas de soldar, lámpara fluorescentes, anuncios de neón, hornos de inducción etc., la potencia reactiva suministrada por el motor síncrono a factor de potencia adelantado, compensa a la potencia reactiva, mejorando de esta manera el factor de potencia global de la instalación industrial.

Generalmente para mejorar el factor de potencia en una instalación industrial determinada se sobreexcita el motor síncrono el cual está forzado a tomar una corriente adelantada de la línea, de esta forma lleva a cabo la función de condensador estático compensando las corrientes reactivas atrasadas necesarias para mantener los flujos en motores de inducción y transformadores, reduciendo de este modo la cantidad de corriente atrasada que va a ser proporcionada por los generadores, ya que no tienen que proporcionar la cantidad total de corriente atrasada exigida por la carga, estos generadores como resultado pueden hacerse más pequeños.

El uso de los motores síncronos es una manera de corrección del factor de potencia que resulta bastante ventajosa, aun cuando el motor síncrono no accione ninguna carga.

Como condensador síncrono, se le conoce al motor síncrono trabajando en vacío y en forma sobreexcitada de

manera que la corriente se adelante del voltaje 90° , de esta manera se dice que el motor flota sobre la línea de alimentación al no tener carga mecánica y entonces opera como si se tratara de un capacitor estático y de aquí viene el nombre de condensador síncrono o también capacitor síncrono.

El capacitor síncrono, tiene diferencias con respecto al motor síncrono, requiere de más cobre en el devanado de campo para poder conducir el incremento en la corriente de campo, por otra parte las chumaceras y el eje pueden ser menos robustas al no requerir de par para la carga.

El siguiente ejemplo nos muestra la forma de calcular los KVARc necesarios de un condensador síncrono, para mejorar el factor de potencia de una instalación industrial a un valor predeterminado.

E J E M P L O

Una fábrica tiene una carga de 4 000 KVA, con un factor de potencia de 0.7 inductivo. Calcular la capacidad requerida en KVARc de un condensador síncrono para mejorar el factor de potencia a 0.9 atrasado.

S O L U C I O N

Potencia que demanda la instalación.

$$KW = KVA (F.P.) = (400)(0.7) = 2800$$

$$KW = 2800$$

$$KVAR = KVA \text{ Sen } (\text{Arc Cos } F.P.) = 400 \text{ Sen } (\text{Arc Cos } 0.7)$$

$$KVAR = 2856.5714$$

El ángulo correspondiente al factor de potencia de 0.7 atrasado es:

$$\theta = \text{Arc Cos } F.P. = \text{Arc Cos } 0.7 =$$

$$\theta = 45.572996^\circ$$

La potencia que demandaría la instalación cuando el factor de potencia se mejora a 0.9 atrasado.

$$KVA = \frac{2800}{0.9} = 3111.1111$$

$$KVA = 3111.1111$$

El nuevo ángulo correspondiente al nuevo factor de potencia es ahora:

$$\theta = \text{Arc Cos } F.P. = \text{Arc Cos } 0.9$$

$$\theta = 25.841933^\circ$$

La nueva potencia reactiva es:

$$KVAR = KVA \text{ Sen } (\text{Arc Cos } F.P.) = 3111.1111 \text{ Sen } (\text{arc Cos } 0.9)$$

$$KVAR = 1356.1019$$

La potencia requerida por el condensador síncrono en KVAR es:

$$KVAR_c = 2\ 856.5714 - 1\ 356.1019$$

$$= 1\ 500.4695$$

5.4. PROTECCION DEL MOTOR SINCRONO.

Se toma la decisión de arranque a tensión reducida si las demandas de corriente a tensión plena son muy grandes, o bien si el par motor de arranque requerido es bajo, como en el caso de ciertos tipos de carga. La tensión reducida se obtiene usualmente por autotransformador o reactor. En los casos donde se permiten grandes corrientes transitorias y donde la carga requiere un par motor grande, se utiliza el arranque a tensión plena.

Durante el periodo de arranque, se induce una tensión elevada en el arrollamiento del campo de c-d. Para evitar el deterioro por esta tensión, el campo está en cortocircuito a través de una resistencia de descarga. Esto ayuda también a la producción del par motor de enganche. Para conectar el campo en el tiempo apropiado se utiliza un relevador de sincronización. Este relevador funciona para aplicar la excitación de c-d en el mejor instante de tiempo dentro del ciclo del deslizamiento del motor.

Durante el periodo de arranque del motor sincrono, deberá proporcionarse protección contra sobrecalentamiento del devanado amortiguador o para la pérdida de sincronismo para todos los motores cargados al arranque (un motor cargado al arranque es aquel que no es un condensador; incluye cualquier motor que maneje una carga mecánicamente aunque puedan emplearse medios automáticos de des-

carga). Dicha protección está mejor proporcionada por un relevador térmico de sobrecarga de acción retardada conectado en el circuito de descarga del campo.

Cuando se hace accionar un motor en vacío, no se requiere de la protección contra sobrecalentamiento en el devanado amortiguador, y no es probable que falle dicho motor, al aplicarle la tensión normal de arranque si este se encuentra sin carga. En casos en que se proporcionara protección contra el sobrecalentamiento del estator por un equipo de protección de equilibrio de corriente, el devanado amortiguador está protegido en forma indirecta también contra corrientes de fase desequilibradas.

Cuando se presenta una sobreexcitación prolongada para motores y condensadores síncronos con reguladores automáticos de tensión sin características automáticas que limiten la corriente del campo, deberá proporcionarse una protección contra el sobrecalentamiento del arrollamiento del campo. O también cuando se presenta el incremento de temperatura puede usarse un relevador térmico de sobrecarga con acción retardada o un relevador que responda al aumento de la resistencia del arrollamiento del campo con el aumento de la temperatura.

Cuando los motores síncronos se encuentran con carga en el momento del arranque, deberán tener protección contra la pérdida de sincronismo, dispuesta de tal modo que permita retirar en forma temporal la carga y la excitación para aplicarlas cuando se permita. De otro modo, se desconecta el motor de su fuente.

Para la pérdida de sincronismo en motores síncronos excepto el motor síncrono de un convertido de frecuencia, estando dicho motor en vacío, la combinación de las protecciones contra baja tensión, contra la pérdida de la excitación, y la de sobrecorriente del generador de c-d que por lo general se proporcionan, darán protección satisfactoria contra la pérdida de sincronismo. Si se requiriese protección adicional, está puede proporcionarse por un relevador de sobrecorriente de tiempo inverso, alimentado por la corriente en la conexión giratoria y dispuesto para disparar el interruptor principal. Por lo general no se requiere la resincronización automática.

Todos los convertidores de frecuencia que interconectan dos sistemas deberán estar protegidos contra la pérdida de sincronismo en el lado síncrono de la máquina. En grupos síncrono-síncrono, puede ser necesaria la protección en ambos lados. El equipo de protección por relevadores deberá disponerse para disparar el interruptor principal en su lado.

A los motores que en su instalación no se les instaló protección contra la pérdida de sincronismo, por estar en vacío y que tampoco tienen reguladores automáticos de tensión, deberán tener protección contra pérdida de la excitación mediante un relevador de baja corriente de reposición de acción retardada, de ajuste bajo, cuya bobina debe instalarse en serie con el arrollamiento del campo. Pero por el contrario si un motor síncrono tiene protección contra pérdida de sincronismo, contra el sobrecalentamiento del devanado amortiguador, y contra el sobrecalentamiento del

estator, estos equipos proporcionarán en forma indirecta --
la protección contra pérdida de la excitación.

C A P I T U L O VI

COMPARACION DE COSTOS

6.1. COSTOS DE ENERGIA ELECTRICA

En nuestro país el costo de la energía eléctrica se factura en base a la tarifa, tensión de suministro, periodo de lectura, consumo en KWh consumo en KVARh factor de potencia y demanda contratada o la demanda máxima ocurrida en el mes, lo que sea mayor.

Cuando se realiza la contratación en la Compañía suministradora para el suministro de energía eléctrica, el usuario fijará la tensión y la demanda a contratar, y en base a estos datos la dependencia suministradora establecerá la tarifa a la que se hará acreedor el solicitante del servicio.

A continuación se muestran los costos mensuales de las tarifas generales para el suministro y venta de energía eléctrica, establecidas en el acuerdo de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público, publicados en el diario Oficial de la Federación del 17 de diciembre de 1987, que regirán a partir del 18 de diciembre de 1987 y durante la vigencia del acuerdo.

Tarifa 1.

Esta tarifa es aplicada solo para acometidas de uso doméstico, casas habitación, siendo exclusiva para una sola vivienda, no pudiendo conectarse dos casas a una

sola acometida. Si se excede de 40 KW de carga conectada - habrá una revisión especial.

Existe también la tarifa 1A aplicada para el uso doméstico, para localidades con clima muy cálido.

1.- Cargos por la energía consumida y mínimo.

Bloques de energía (KWh)						
1-25	26-50	51-75	76-100	101-200	Adic.	Mínimo
\$40.57	\$57.88	\$76.13	\$88.39	\$97.13	\$108.42	\$325.00

2.- Depósitos de garantía.

1 Fase	2 Fases	3 Fases
\$3,246.00	\$16,228.00	\$20,285.00

Tarifa 2.

Esta tarifa es aplicada para servicio general --- hasta 40 KW de carga conectada.

Se aplicará a todos los servicios que destinen la energía eléctrica en baja tensión a cualquier uso.

En caso de rebasar el límite de carga de 40 KW, se licitará al suministrador la reforma de su contrato aplicando la tarifa 3.

La demanda contratada la fijará el consumidor en el momento de contratar el servicio, su valor no será menor del 60% de la carga total instalada.

La facturación se realiza con la suma de cargos -

fijos y cargos por consumo.

1.- Cargo fijo, cargos adicionales por la energía consu---
mida y mínimo

	Bloques de energía (KWh)			
Cargo fijo	1-50	51-100	Adic.	Mínimo.
\$1 545.08	\$116.43	\$145.61	\$162.78	\$1545.00

2.- Depósito de garantía.

1 Fase	2 Fases	3 Fases
\$ 9,314.00	\$46,572.00	\$69,858.00

Tarifa 3

Esta tarifa es aplicada en servicio general pa---
ra más de 40 KW de carga conectada.

La demanda contratada la fijará el consumidor en
el momento de contratar el servicio, su valor no será menor
del 60% de la carga total instalada.

La demanda base de facturación será la demanda --
contratada en vigor o la demanda máxima ocurrida en el mes
(siendo estos los cargos fijos).

Ninguna cuenta se facturará por menos de 25 KW --
de demanda base de facturación, cualquier fracción de KW --
se tomará como KW completo.

Cargo por demanda, por la energía consumida, ----
mínimo y depósito de garantía.

Cargo por KW	Cargo por KWh	Mínimo	Dep. de garantía
\$16 582.71	\$82.46	132 662.00	\$33 165.42

✗ Multiplicar esta cuota por la demanda por contratar y el resultado redondearlo a pesos.

Tarifa 4

Esta tarifa es aplicada solo para el servicio de molinos de nixtamal, siendo exclusivamente en baja tensión

Cargo por la energía consumida mínimo y depósito de garantía.

Cargo por KWh	Mínimo	Depósito de garantía
\$ 57.24	\$2 290.00	\$ 9 158.00

Tarifa 5

Esta tarifa es aplicada solo para servicio de alumbrado público.

Cargos por la energía consumida, mínimo y depósito de garantía.

Cargos por KWh		Mínimo		Depósito de garantía	
A.T.	B.T.	A.T.	B.T.	A.T.	B.T.
\$73.75	\$87.86	\$8968.00	\$10683.78	\$23872.00	\$42735.12

✗ Multiplicar esta cuota por la demanda por contratar y el resultado redondearlo a pesos.

Tarifa 6

Esta tarifa es aplicada solo para servicio de

de bombeo de agua potable o' aguas negras.

Cargo fijo y adicional por la energía consumida, mínimo y depósito de garantía.

<u>Cargo fijo</u>	<u>Cargo por KWh</u>	<u>Mínimo</u>	<u>Dep. de garantía</u>
\$17 244.25	\$ 86.63	\$17244.00	\$ 68977.00

Tarifa 7

Esta tarifa es aplicada solo para servicio temporal.

<u>Cargo por KW</u>	<u>Cargo por KWh</u>
\$14 017.03	\$ 350.48

Tarifa 8

Esta tarifa es aplicada para servicio general de alta tensión, y se destina a los usuarios de energía eléctrica en alta tensión para cualquier uso, con demandas de 20 KW o más.

La demanda contratada la fijará el consumidor en el momento de contratar el servicio, su valor no será menor del 60% de la carga total instalada, ni menor de 20 KW, como tampoco debe ser menor de la capacidad del motor mayor o aparato instalado por el consumidor.

La medida de la demanda máxima se determina mensualmente con aparatos que indiquen la carga media en KW - durante un intervalo de 15 minutos en el cual el consumo de energía eléctrica sea mayor que en cualquier otro periodo de 15 minutos en el mes

Cargo por demanda, por la energía consumida, mínimo y depósito de garantía.

Cargo por KW	Cargo por KWh	Mínimo	Dep. de garantía
\$11,598.59	\$58.02	\$115,986.00	\$23,197.18

✕ Multiplicar esta cuota por la demanda por contratar y el resultado redondearlo a pesos.

Tarifa 9

Tarifa aplicada para el servicio de bombeo de agua para el uso agrícola.

Cargo por la energía consumida y depósito de garantía

Bloques de energía (KWh)

1-5000	5001-15000	15001-35000	Adic.	Dep. de garantía
\$44.54	\$53.25	\$58.77	\$65.26	\$2,082.35

✕ Multiplicar esta cuota por la demanda por contratar y el resultado redondearlo a pesos.

Tarifa 10

Servicio de alta tensión para reventa.

Tarifa 11

Servicio de alta tensión para minas.

Tarifa 12

Esta tarifa es aplicada al servicio general, con cargas de 5000 KW o más de demanda contratada.

Cargo por demanda, energía consumida, mínimo y depósito de garantía.

<u>Cargo por KW</u>	<u>Cargo por KWh</u>	<u>Mínimo</u>	<u>Dep. de garantía</u>
\$11 751.76	\$47.40	\$235,035.00	\$23,503.52 ⁷

7 Multiplicar esta cuota por la demanda por contratar ----
y el resultado redondearlo a pesos.

Los siguientes ejemplos nos muestran como obtiene la Compañía Suministradora el costo de la facturación en -- cada una de las diferentes tarifas.

E J E M P L O

Un usuario contrato un servicio de suministro de energía -- eléctrica con tarifa No.1. Calcular el costo de factura--- ción si dicho usuario tuvo un consumo de 75 KWh durante 2 - meses.

S O L U C I O N

Según la tabla donde se muestra el costo del consumo para la tarifa 1, los primeros 25 KWh se cobran a \$ 40.57.

$$25 \times (\$ 40.57) = 1,014.25$$

Por cada uno de los siguientes 25 KWh se cobran a \$ 57.88

$$25 \times (\$ 57.88) = 1,447.00$$

Por cada uno de los siguientes 25 se cobran a \$ 76.13

$$25 \times (\$ 76.13) = 1,903.25$$

Realizando la sumatoria para obtener el costo total de la - energía consumida.

\$ 1 014.25

\$ 1 447.00

\$ 1 903.25

\$ 4 364.50

\$ 4 364.50

+ 15% de IVA \$ 654.675

T O T A L ----- 5 019.175

E J E M P L O

Un consumidor tiene una carga de 75 KW, realizó su contrato con la Compañía Suministradora con una demanda contratada -- de 45 KW que es el 60% de la carga total instalada, para -- tarifa No. 3, la energía consumida durante los primeros 30 días fué de 32,400 KWh Cual será el costo por este consumo.

S O L U C I O N

T O T A L = (Cargos fijos + Cargos por consumo) x 15%

Para obtener el costo de cargos fijos, se multiplica el -- costo de los cargos por KW por la demanda contratada en vi-- gor o la demanda máxima ocurrida en el mes, lo que sea mayor.

El promedio de la demanda máxima ocurrida en el mes es la siguiente:

$$(3,400 \text{ KWh-mes}) / (720 \text{ h-mes}) = 45 \text{ KW}$$

En este caso la demanda máxima es igual a la ---- demanda contratada. En cargos fijos cada KW tiene un cos-- to de \$ 16,582.71

$$\begin{aligned} \text{Cargos fijos} &= 45 \times \$ 16,582.71 \\ &= \$ 746 221.95 \end{aligned}$$

En cargos por consumo cada KWh tiene un costo de \$ 82.46 --

$$\begin{aligned} \text{Cargos por consumo} &= 32 400 \times \$ 82.46 \\ &= \$ 2 671,704.00 \end{aligned}$$

Cargo total de energía consumida

	\$	746,221.95
	\$	<u>2 671,704.00</u>
	\$	3 417,925.95
+ 15% de IVA	\$	<u>512,688.89</u>
T O T A L ----	\$	3 930,614.84

6.2. COSTO DE CAPACITORES.

Realizando una investigación de costos en diferentes empresas que fabrican capacitores de potencia, tanto en baja como alta tensión, pudimos obtener sus costos, a continuación se expone la lista de precios de la fábrica ASEA-RTC capacitores, siendo esta lista la más económica obtenida:

Bancos de capacitores trifásicos con conexión interna en delta, para baja tensión.

Potencia KVAR	240 Volts 60 Hz			Costo de la Unidad
	dimensión	Corriente de fase	peso	
	"A" cm	en amperes	en Kg.	
6	26.5	14.4	7.4	313 500.00
9	26.5	21.6	8.5	470 250.00
12	44.5	28.8	11.3	627 000.00
18	44.5	43.3	13.8	940 500.00
21	57.0	50.5	16.0	1 050 500.00
24	57.0	52.2	17.2	1 160 500.00

Potencia KVAR	280 volts 60 Hz			Costo de la unidad
	dimensión	corriente de fase	peso en	
	"A" cm.	en amperes	Kg.	
12	26.5	14.4	6.8	342 000.00
18	26.5	21.6	7.8	510 300.00
24	44.5	28.8	10.7	680 400.00
36	44.5	43.3	12.4	1 005 084.00

42	57.0	50.5	14.5	1 172 600.00
48	57.0	52.2	15.6	1 316 700.00

Para capacitores de potencia monofásicos en alta tensión.

Potencia KVAR	Tensión	60 Hz	Costo de la unidad.
	Volts		
50	2 400		990 720.00
75	2 400		1 486 080.00
100	2 400		1 981 440.00
50	4 160		1 127 500.00
75	4 160		1 691 250.00
100	4 160		2 255 000.00
50	6 900		1 592 064.00
75	6 900		1 847 808.00
100	6 900		2 153 744.00

6.3. REDUCCION DEL COSTO DE LA ENERGIA ELECTRICA AL INSTALAR CAPACITORES.

Para poder entender con bastante claridad, cual es el ahorro económico en una instalación eléctrica al mejorar el factor de potencia con capacitores, se expone el siguiente problema.

E J E M P L O

Un empresario al realizar su contrato con la Compañía Suministradora de energía eléctrica le fué asignada la tarifa No. 12 por realizar el contrato con 9800 KW de demanda contratada. Si se tiene una tensión de alimentación de 6.9 KV y 6 696,000 KWh de consumo durante un mes, con un factor de potencia de 0.8398 atrasado, y teniendo en cuenta que la instalación trabaja las 24 horas del día, calcular:

- a) El costo de la energía eléctrica consumida y el incremento en el costo económico debido a la penalización por bajo factor de potencia, publicados en el Diario Oficial de la Federación en la parte referente a disposiciones
- b) Los KVARC necesarios para mejorar el factor de potencia en la instalación industrial a 0.85 atrasado, que es el mínimo permitido por la Compañía Suministradora, y obtener el costo de dichos capacitores (tomar el costo de los capacitores de las tablas anteriores).
- c) Tiempo en que se amortizará el capital invertido en la compra de los capacitores de potencia ocupados para mejorar el factor de potencia a 0.85 atrasado y no pagar -

ninguna penalización por bajo factor de potencia.

S O L U C I O N

T O T A L = (Cargos fijos + Cargos por consumo) x 15% de IVA

Para obtener el costo de cargos fijos, se multiplica el -- costo de los cargos por KW por la demanda contratada en vi- gor o la demanda máxima ocurrida en el mes, lo que sea ---- mayor.

El promedio de la demanda máxima ocurrida en el - mes es la siguiente:

$$(6\ 696,00\ \text{KWh-mes}) / (720\ \text{h-mes}) = 9300\ \text{KW}$$

En este caso el promedio de la demanda máxima o-- currida en el mes es menor que la demanda contrata, por --- tal motivo se toma la última para obtener los cargos fi--- jos. En cargos fijos cada KW tiene un costo de \$ 11,751.76

$$\begin{aligned} \text{Cargos fijos} &= 9800 \times \$ 11,751.76 = \\ &= \$ 115\ 167,250.00 \end{aligned}$$

En cargos por la energía consumida cada KWh = \$ 47.40

$$\begin{aligned} \text{Cargos por la energía consumida} &= \\ &= 6\ 696,000 \times \$ 47.40 = \$ 317\ 390\ 400.00 \end{aligned}$$

El costo de facturación es el siguiente:

$$\begin{array}{r} 115\ 167\ 250.00 \\ + \\ \underline{317\ 390\ 400.00} \\ \$ 432\ 557\ 650.00 \end{array}$$

Como se tiene bajo factor de potencia en la instalación --- industrial se tiene el siguiente incremento en el costo. --

$$\begin{array}{r} \$ 432\ 557\ 650.00 \times 0.85 \\ \hline 0.8398 \qquad \qquad \qquad = 437\ 811\ 390.00 \\ + 15\% \text{ de I V A -----} \qquad \qquad \qquad 65\ 671\ 708.00 \\ \hline \text{T O T A L a pagar -----} \qquad \qquad \qquad \$ 503\ 483\ 100.00 \end{array}$$

b) Para obtener los KVARc necesarios para mejorar el factor de potencia al valor deseado se ocupa la siguiente fórmula, obtenida en el punto 3.1. del capítulo III.

$$\begin{aligned} Q_c &= KW (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \\ \text{DONDE: } \theta_1 &= \text{Arc Cos } 0.8398 = 32.88^\circ \\ \theta_2 &= \text{Arc Cos } 0.85 = 31.788^\circ \\ KW &= \frac{6\ 696\ 000 \text{ KWh}}{(24 \times 30)} = 9\ 300 \text{ KW} \\ Q_c &= 9300 \text{ KW} (\tan 32.88^\circ - \tan 31.788^\circ) = \\ &= 248.5 \text{ KVAR} \end{aligned}$$

Aproximando el valor anterior a un valor real en el mercado tenemos que Qc = 250 KVAR, para obtener dicho valor -- usaremos 3 capacitores, 2 de 100 y uno de 50 KVAR.

Los tres capacitores que se conectarán por fase estarán en paralelo.

Como la corrección es a un sistema trifásico ocuparemos un total de 9 capacitores; 6 de 100 KVAR y 3 de 50 KVAR con un costo de \$ 2 153 744.00 por cada capacitor de 100 KVAR, y \$ 1 592 064.00 por cada capacitor de 50 KVAR.

$$\begin{aligned} 6 \times \$ 2\ 153\ 744.00 &= \$ 12\ 922\ 464.00 \\ 3 \times \$ 1\ 592\ 064.00 &= \$ 4\ 776\ 192.00 \end{aligned}$$

El costo total de los 9 capacitores es el siguiente;

\$ 4 776 192.00

\$ 12 922 464.00

\$ 17 698 656.00

c) El tiempo en que se amortizará el costo de los capacitores, esta en base a la reducción del consumo de energía eléctrica al mejorar el factor de potencia, y al costo de antes de --- corregir el factor de potencia.

El costo siguiente es el que se pagará a la Compañía Suministradora sin incluir el costo de penalización por bajo --- factor de potencia, ya que con los capacitores lo mejoramos a un valor de 0.85 atrasado, que es el valor mínimo --- permitido por la Compañía Suministradora.

9800 KW x \$ 11,751.76 = \$ 115 167 250.00

Cargos por consumo en KWh

6 696 000 KWh x \$ 47.40 = 317 390 400.00

Cargo total;

115 167 250.00
+ 317 390 400.00
\$ 432 557 650.00

+ 15% de IVA 64 883 648.00

Total a pagar \$ 497 441 300.00

Obteniendo el ahorro mensual para el nuevo factor de potencia.

- 503 883 100.00
497 441 300.00
\$ 6 441 800.00

Sin tomar en cuenta la inflación y depreciaciones de los --
capacitores, el tiempo de amortización del capital inver---
tido estará dado por el ahorro en el costo de la energía --
eléctrica obtenido mensualmente. En este caso la inver---
sión se amortizará aproximadamente en tres meses.

C O N C L U S I O N E S

El trabajo de cualquier ingeniero siempre va ---- encaminado hacia la minimización del costo en la ejecu----- ción de cualquier trabajo en el ramo ingenieril.

La investigación realizada para la elaboración -- de dicha tesis, se enfocó en disminuir el costo de la ener- gía consumida en una instalación industrial. Para poder -- reducir el costo de operación del sistema, se utilizan ca-- pacitores de potencia, los cuales nos proporcionan las si-- guientes ventajas: Reducen las pérdidas en el sistema eléc trico, aumentan el factor de potencia en generadores y trans formadores, reducen la carga en generadores y transformado- res permitiendo con ello alargar la vida útil de estos ---- equipos, son fácil de instalar en forma individual o en -- bancos, etc.

Uno de los puntos más importantes de los capaci-- tores de potencia, es que su costo es menor comparado con - otros medios de corrección del factor de potencia.

Esta tesis titulada: Corrección del Factor de Po- tencia en una instalación industrial, es una herramienta -- para poder corregir el factor de potencia en cualquier --- instalación, en la que su problema se localice en un mal -- factor de potencia.

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

- 1.- Máquinas eléctricas y transformadores
Irving L. Kosow
Editorial Reverte.
- 2.- Curso de máquinas síncronas
Gilberto Enríquez Harper
Editorial Limusa.
- 3.- El arte y la ciencia de protección por relevadores
C. Russell Mason
Editorial CECSA
- 4.- Máquinas electromagnéticas y electromecánicas
Leander W. Matsch
Representaciones y servicios de ingeniería, S.A.
- 5.- Máquinas de corriente alterna
Michael Liwschitz-Garik Clyde C. Whipple
Editorial C.E.C.S.A.
- 6.- Circuitos eléctricos
Joseph A. Edminister, M.S.E.
Editorial Mc GRAWHILL, serie Schaum
- 7.- Máquinas eléctricas y electromecánicas
Syed A. Nasar
Editorial McGraw-Hill
- 8.- Dr. Alfredo Navarro Crespo
Capacitores de potencia.

- 9.- Folletos y Catálogos de la Compañía Balmecc S.A.
Fabricantes de los capacitores Balmecc.
- 10.- Folletos y Catálogos de la Compañía R. T. C.
Fabricante de los capacitores R.T.C.
- 11.- Apuntes del Departamento de Ingeniería especializada
Comisión Federal de Electricidad.
- 12.- Legajo de costo de Energía eléctrica
Compañía de Luz y Fuerza del Centro.
- 13.- Aplicación del control para capacitores
Departamento de ingeniería especializada
Comisión Federal de Electricidad.