

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

CALIDAD DE LA ENERGIA EN LOS SISTEMAS
ELECTRICOS DE BAJA TENSION

T E S I S

Que para obtener el Título de
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

P r e s e n t a n

JAVIER ALTAMIRANO GUERRERO
ERIK ÁVILA GOMEZ TAGLE
LUIS HUMBERTO WAH RUEDA



DIRECTOR DE TESIS: ING. JUAN JOSÉ LÓPEZ MARQUEZ

Noviembre 2005

m 341958



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Este trabajo escrito representa la culminación de una vida académica de grandes satisfacciones, esfuerzos y sacrificios por parte mía y de mi familia.

En términos generales quiero agradecer a toda mi familia por enseñarme e inculcarme valores tan grandes como la honradez, la sinceridad y la integridad etc. Valores que me sirvieron a lo largo de mi vida académica para lograr la culminación de esta en forma exitosa.

Por otro lado agradezco a cada miembro de mi familia por su forma de ser ya que con su comportamiento y actitud me han impulsado y a veces hasta retado para salir adelante.

Agradezco muy especial mente a mi abuela Teresa quien desde mi educación media superior hasta el término de mi carrera me ayudo en todos los aspectos tanto económicos como morales, y me considero pienso yo que como uno más de sus hijos, gracias mil gracias abuela por todo su apoyo y todo su cariño.

A la memoria de mi abuelo Vicente que me enseñó que en esta vida vale más ser una persona bondadosa y de buen corazón, que ser la persona más adinerada del mundo.

A la memoria de mi abuelo Porfirio que me dio su cariño durante mi infancia y siempre que lo necesite pude contar con el.

Agradezco a mis padres Juan y Leticia que sea como sea siempre estuvieron conmigo cuando necesite un consejo, un regaño o una simple palmada en la espalda, gracias por estar siempre conmigo.

Agradezco muy especialmente a mis hermanos Juan Manuel y Raúl quienes a lo largo de mi carrera siempre estuvieron presentes en mi mente y fueron uno de mis grandes motores para lograr el término exitoso de mi carrera.

También quiero agradecer el apoyo de mis tíos Jorge Wah, Teresa Wah, Mei-Lein Wah, Mari Wah, Georgina Rueda, Raúl Rueda quienes me entendieron y me proporcionaron un consejo siempre que lo solicite así como su ayuda económica.

Quiero Agradecer a mis amigos de la carrera Javier Altamirano, Antonio Palacios y Eric Ávila, ya que con ellos compartí borracheras inolvidables, así como momentos de estudio también inolvidables.

Quiero Agradecer a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería que por medio de sus profesores me dieron la enseñanza y formación requerida para enfrentar nuevos retos en mi vida.

A ti madre que gracias a tu esfuerzo, tu apoyo, tu lucha contra las adversidades lograste en mi formar lo que ahora soy; no tengo palabras para agradecer todo lo que me has dado, has sido un gran ejemplo para mí, pues me has demostrado que hay que luchar siempre contra lo que venga para salir adelante, me has enseñado todos los valores que me han hecho crecer como ser humano, pero dentro de ellos ha habido uno que sobresale de todos y eso es la responsabilidad, pues para ello has sido la mejor maestra que he tenido. Muchas gracias mamá por creer en mi, espero no haberte defraudado, te quiero.

A la memoria de mi padre quien junto con mi madre me dio la vida, me vio nacer y me dio los primeros cuidados. Sé que donde quiera que estés estarás muy orgulloso de lo que hoy he logrado.

A ti hermana por tu paciencia, tus consejos, tu apoyo, tus regaños y por muchas cosas más; pero sobre todo gracias por ser la mejor hermana, por ser el punto de unión de nuestra familia y por tener el equilibrio exacto entre un carácter fuerte y una nobleza infinita, te quiero hermana, nunca cambies.

A la memoria de mis abuelos Angelina y Jesús quien nos abrieron las puertas de su casa, pero que sobre todo nos abrieron las puertas de su corazón. Abuela gracias por tu compañía, abuelo gracias por todos tus consejos, los valores que me inculcaste, el apoyo que siempre me diste y por creer en mí, a ambos siempre los llevaré en mi mente y en mi corazón por el resto de mis días.

A la memoria de mi abuela Lina quien sembró en mí la esperanza de encontrar aún gente buena en el mundo.

A mis tíos Arcelia y Juvenal de quienes recibí mucho apoyo cuando los momentos eran muy difíciles para mi madre, ya que sin su apoyo hubiera sido muy difícil ser lo que ahora soy. Tía Arcelia gracias por ser siempre mi segunda madre en

todas las escuelas que cursé, por estar al pendiente de mí, por ayudarme en mis primeras tareas, por llevarme y traerme a la escuela y hasta por llevarme los desayunos; pero sobre todo por apoyar siempre a mi madre, por ello y por mucho más siempre te estaré agradecido.

Tío Jaime gracias por ser el Melchor de todos los días de reyes y por tu apoyo cuando te he necesitado.

A mis amigos por siempre Javier y Luis por todos los momentos que hemos pasado, por ser los mejores compañeros de mi carrera, pero sobre todo por brindarme su amistad incondicional que es lo más valioso e importante que me ha dejado el conocerlos. Gracias y sigamos gozando de nuestra amistad.

A todos aquellos que creyeron en mí, estuvieron conmigo y contribuyeron para que yo lograra alcanzar una de las metas más importantes para mi vida.

A mis excompañeros y amigos de la Facultad de Ingeniería por compartir muchos momentos y por enseñarme a trabajar en equipo y en forma unida para lograr un fin común.

A la Facultad de Ingeniería que por medio de sus profesores me dieron la enseñanza y formación requerida para enfrentar nuevos retos en mi vida.

Y a mi querida Universidad Nacional Autónoma de México, por inculcar en mí no solo el conocimiento, sino una mente más abierta y crítica a las situaciones por las que hoy el país enfrenta.

Después de un largo camino, hoy llego a la conclusión de mi licenciatura y me siento muy orgulloso de todas las cosas que he logrado. Por supuesto todos estos logros han sido el resultado de un esfuerzo particular y de un esfuerzo muy grande de todas aquellas personas que siempre me apoyaron para alcanzar este gran paso de mi vida.

Agradezco mucho a mis padres por brindarme todo su apoyo y dedicación.

Muchas gracias Papá por todos tus consejos y dedicación, nunca voy a olvidar que siempre estuviste conmigo en las noches de estudio, verte junto a mí en todo momento me motivo a terminar con éxito esta etapa de mi vida, gracias por todo tu cariño y por inculcarme el camino del trabajo, nunca voy a terminar de pagarte todo lo que haces por mí, te quiero y te admiro mucho.

Muchas gracias Mamá por educarme por el camino del bien, por tu gran esfuerzo y cariño. Sabes que te quiero y que siempre te estaré agradecido por darme todo tu apoyo y comprensión.

Muchas gracias Víctor por ser siempre un ejemplo a seguir, tu coraje para hacer las cosas me alimento para concluir con éxito mi carrera. Nunca olvides que siempre estaré contigo y que podemos compartir muchas cosas juntos como lo hemos hecho tantos años.

Muchas gracias Arianna por todos tus consejos y cariño que me brindaste, eres una persona muy capaz, estoy seguro que muy pronto vas a conseguir el éxito por el cual has luchado siempre.

Muchas gracias Gaby por ser mi gran hermanita, te quiero mucho, eres una persona que a pesar de ser pequeña te admiro mucho por el entusiasmo que le pones a

realizar tus tareas. Por favor siempre conserva esa chispa de alegría y disposición para conmigo, cuenta conmigo en todo momento.

Durante esta etapa de mi vida tome muchas decisiones de las que estoy muy orgulloso, pero hay una que estoy viviendo en este momento y que me hace muy feliz. La decisión de formar una familia a lado de la mujer más maravillosa que he conocido.

Muchas gracias María Elena por darme tu corazón y por compartir conmigo estos 6 años que han sido maravillosos, estoy convencido que podemos lograr muchas cosas juntos, espero que muy pronto estés escribiendo los agradecimientos de tu proyecto final de tu carrera, por supuesto que cuentas conmigo para apoyarte en lo que necesites, te amo.

A mis grandes amigos Wah, Fosi y Toño, que siempre han estado conmigo en todo momento. Nunca olviden que ese apoyo es mutuo y espero que conservemos ese lazo de amistad siempre.

Finalmente quiero agradecer a la Universidad Nacional Autónoma de México por abrirme sus puertas y brindarme una educación de excelencia. Quiero hacer una gran mención a todas aquellas personas con las que compartí momentos de amistad y de enseñanza, muchas gracias compañeros y profesores.

Javier Altamirano Guerrero

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN.....	1
1. ENERGÍA ELECTRICA.....	3
1.1. Los tres elementos de un circuito.....	3
1.1.1. La resistencia.....	3
1.1.2. La inductancia.....	4
1.1.3. El capacitor.....	6
1.2. Receptores combinados.....	7
1.3. El sistema trifásico.....	10
1.3.1. Distribución trifásica.....	10
1.3.2. Delta-Estrella.....	10
1.3.3. Identificación de fases/ Indicador de campo rotatorio.....	12
1.4. El factor de potencia.....	13
1.4.1. Potencia activa.....	13
1.4.2. Potencia reactiva.....	13
1.4.3. Potencia aparente.....	13
1.4.4. Representación gráfica.....	14
1.5. Mediciones de potencia.....	15
1.5.1. Principio.....	15
1.5.2. Medición de energía activa.....	17
1.5.3. Medición de potencia reactiva.....	18
1.5.4. Valor del Coseno φ	19
1.5.5. Medición de potencia.....	19
1.6. Medición del Coseno φ	21
1.6.1. Medición en circuito de una fase.....	21
1.6.2. Medición de un circuito trifásico balanceado.....	23
1.6.3. Medición en 3 fases con circuito desbalanceado.....	25
1.6.4. Dispositivo electrónico de medición.....	26

CALIDAD DE LA ENERGÍA EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE BAJA TENSIÓN

1.7. Problemas con un bajo factor de potencia bajo.....	28
1.7.1. Arranque de corriente.....	28
1.7.2. Problemas con un factor de potencia bajo.....	29
1.7.3. Pérdidas en los cables.....	30
1.7.4. Pérdidas en los transformadores.....	31
1.7.5. Caída de voltaje en un transformador.....	33
1.7.6. Caída de voltaje y capacidad máxima en cables.....	35
1.7.7. Potencia aparente disponible en el transformador.....	36
1.7.8. Costo de la energía.....	38
2. EL CAPACITOR DE POTENCIA DE BAJO VOLTAJE.....	41
2.1. Antecedentes históricos.....	41
2.1.1. Después de 1970.....	44
2.2. Película de polipropileno metalizado.....	45
2.2.1. Historia.....	45
2.2.2. Principio.....	46
2.2.3. Fabricación.....	48
2.2.4. Principio de trabajo.....	49
2.2.5. Desmetalización.....	51
2.2.6. Pérdidas.....	51
2.2.7. Otros diseños.....	53
2.3. Transitorios de conmutación.....	57
2.3.1. Principios.....	57
2.3.2. Experimentos prácticos.....	61
2.4. Dispositivos de descarga.....	64
2.4.1. Propósito.....	64
2.4.2. Descarga de un capacitor.....	65
2.4.3. Valor de resistencia.....	66
2.4.4. Descarga rápida de bancos automáticos.....	69
2.4.5. Descarga por bobina de inducción.....	70

CALIDAD DE LA ENERGÍA EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE BAJA TENSIÓN

2.4.5.1. Pruebas fabricación.....	71
2.4.5.2. Pruebas destructivas.....	79
2.4.5.3. Proyecto IEC Reporte No.33 del Comité de Estudio.....	80
2.4.5.4. Norma USA-UL 810 - Noviembre 1984.....	81
2.4.5.5. Canadá CSA-C22,2 No. 190.M-1985.....	82
2.4.5.6. Japón JIS C4908.....	82
2.4.5.7. Otras pruebas.....	82
2.5. Diseño con dieléctrico combinado.....	82
2.6. Capacitores con dieléctrico metalizado.....	85
2.6.1. Capacitores con dieléctrico metalizado.....	86
2.6.2. Funcionamiento sin protección.....	87
2.6.3. Vermiculita.....	89
2.6.4. Protección secuencial (IPE).....	91
3. EL BANCO AUTOMATICO DE CAPACITORES.....	97
3.1. Propósito.....	97
3.1.1. Principio de Operación.....	97
3.1.2. Bancos auxiliares.....	98
3.2. El regulador Var.....	102
3.2.1. Propósito.....	102
3.2.2. Medición del Coseno φ	103
3.2.3. Ajuste del Coseno φ	106
3.2.4. Ajuste de sensibilidad (c/k).....	109
3.2.5. Control de pasos.....	112
3.2.6. Secuencias de conexión.....	113
3.2.7. Intervalos de conmutación.....	114
3.2.8. Desconexión en voltaje cero.....	114
3.2.9. Armónicas.....	117
3.2.10. Señalización.....	118
3.3. El transformador de corriente.....	119

CALIDAD DE LA ENERGÍA EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE BAJA TENSIÓN

3.3.1. Propósito.....	119
3.3.2. Datos para el TC.....	119
3.3.3. Conexiones.....	120
3.3.4. TC para medición de suma de corriente.....	122
3.3.5. Transformadores en paralelo.....	124
3.3.6. Contactores.....	128
3.3.7. Fusible.....	129
3.4. Control de capacitores por tiristor.....	131
3.4.1. Variaciones en la potencia reactiva.....	131
3.4.2. Efecto de la variación de voltaje.....	132
3.4.3. Uso de semiconductores.....	134
3.4.4. Realización.....	134
3.4.5. Medición e indicación de potencia reactiva.....	136
4. CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA.....	139
4.1. Antecedentes.....	139
4.2. Principio de compensación.....	140
4.3. Determinación del rango del capacitor.....	143
4.4. Problemas con motores.....	148
4.4.1. Factor de potencia de motores asíncronos.....	148
4.4.2. Arranque de un motor asíncrono.....	150
4.4.3. Auto-excitación.....	151
4.4.4. Compensación central.....	157
4.5. Instalación de capacitores.....	157
4.5.1. Compensación de motor individual.....	159
4.5.2. Compensación de transformador individual.....	166
4.5.3. Ventajas y desventajas con diferentes compensaciones.....	167
4.6. Ejemplo industrial.....	170

5. ARMONICAS.....	183
5.1. Introducción.....	183
5.1.1. Circuitos lineales.....	184
5.1.2. Circuitos no lineales.....	185
5.2. Series de Fourier.....	190
5.2.1. Desarrollo de una función periódica.....	191
5.2.2. Medición de armónicas.....	193
5.2.3. Valor efectivo con armónicas.....	194
5.2.4. Efectos de las armónicas.....	195
5.2.5. Corrientes armónicas.....	202
5.2.6. Resonancia en serie.....	203
5.3. Protección contra resonancias.....	208
5.3.2. Principio.....	208
5.3.3. Dimensionamiento de la corriente.....	209
5.3.4. Voltaje en las terminales del capacitor.....	210
5.3.5. Compensación de potencia.....	210
6. CONCLUSIONES.....	211

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es suministrada a los usuarios en un voltaje de Corriente alterna (C.A.) cuya forma de onda se muestra en la figura 1.

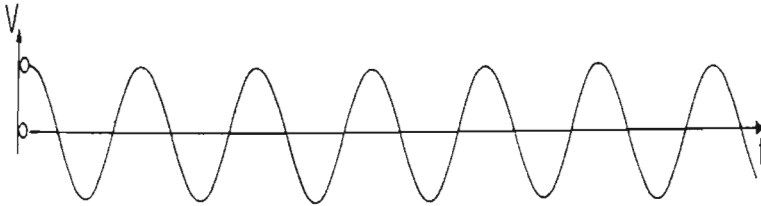


Fig. 1

Este voltaje alterno varía continuamente entre un voltaje máximo positivo y un máximo negativo. Un ciclo completo incluye una alternancia positiva y una negativa. El número de ciclos por segundo es la frecuencia de la señal y esta designada por el símbolo "f" y se expresa en unidades de hertz (Hz), Fig. 2.

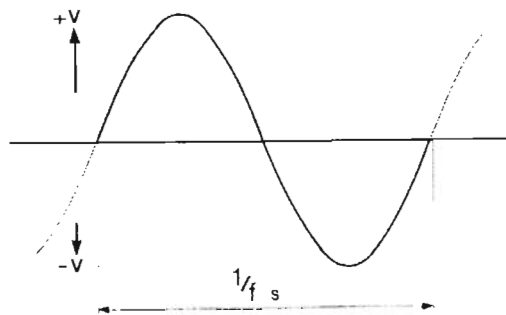


Fig.2

INTRODUCCIÓN

La estandarización del valor de frecuencia en el mundo fue iniciada antes de la primera guerra mundial, pero no se pudo terminar dadas las condiciones de la guerra.

Hoy en día las frecuencias mas utilizadas en el mundo son 50 y 60 Hz. La frecuencia de 50 Hz es usada territorialmente en mayor cantidad que 60 Hz, la cual existe principalmente en Norte y Sudamérica, a excepción de las regiones del sureste de Sudamérica (Argentina, Bolivia, Chile, Uruguay y Paraguay) en donde se utiliza 50 Hz.

La frecuencia de 60 Hz es usada también en Liberia (África), Corea, La Filipinas, Taiwán (Asia) y en algunas regiones de Arabia Saudita y Japón.

Existen diferentes valores de voltaje alrededor del mundo variando en un rango de 190 a 660 volts, pero predominantemente entre 380 y 415 volts.

En México los voltajes de alimentación en baja tensión son suministrados en 220 V, 440 V y 480 V a una frecuencia de 60 Hz.

1. ENERGÍA ELÉCTRICA.

1.1 LOS TRES ELEMENTOS DE UN CIRCUITO.

Existen diferentes tipos de cargas en los circuitos eléctricos, los cuales requieren diferentes características de onda eléctrica para ser alimentados, Cuando conectamos una carga a un circuito eléctrico, (cuyo voltaje es expresado en Volts, V) comienza a fluir una corriente I , (expresada en Amperes, A).

En términos generales podemos clasificar una carga dentro de uno de los tres siguientes tipos:

1.1.1 LA RESISTENCIA.

El primer tipo de carga presente en los circuitos eléctricos es la resistencia la cual es designada con la letra R y expresada en unidades de ohms⁽¹⁾. Existen muchos ejemplos de este tipo de carga como lo es; el horno eléctrico, un radiador, una lámpara incandescente de luz, etc.

Gráficamente la resistencia es representada como en la figura 1.1:



Fig. 1.1

⁽¹⁾ El ohm fue nombrado así gracias a Georg Simon Ohm: (16 de marzo, 1789 - 6 de julio), 1854. Físico alemán.

En un circuito puramente resistivo, la corriente está en fase con el voltaje y es una función inmediata del voltaje Fig. 1.2. Por lo tanto, si el voltaje y la corriente están en fase, tenemos que:

$$I = \frac{V}{R} \dots\dots\dots(1)$$

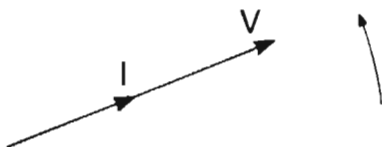


figura 1.2 Diagrama vectorial de un circuito resistivo.

Una resistencia absorbe potencia (en watts) igual a:

$$P=VI=RI^2 = \frac{V^2}{R} \dots\dots\dots(2)$$

Dependiendo del tiempo conectado, la energía se consume y pagaremos en cierto número de kWh.

1.1.2 LA INDUCTANCIA

Al igual que la resistencia, el circuito más comúnmente encontrado, es el circuito inductivo. Se encuentran Cargas inductivas en cualquier lugar en donde haya

bobinados involucrados por ejemplo, en transformadores, motores y balastos para lámparas de descarga.

Las inductancias son denotadas por la letra L y expresadas en unidades de Henrys (Hy). Gráficamente, la inductancia (o choque o bobina) se representa como en la Fig. 1.3:

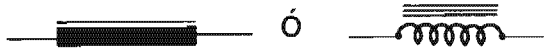


Fig. 1.3

En un circuito puramente inductivo la corriente no esta en fase con el voltaje ya que va retrasada en 90 grados eléctricos como se muestra en la Fig. 1.4 en donde vemos que la corriente va retrasada con respecto de la dirección de giro del diagrama vectorial.

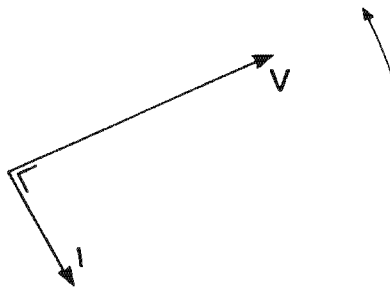


Fig. 1.4. Diagrama Vectorial de un circuito inductivo.

En este tipo de circuitos se crea un campo magnético que absorbe energía, posteriormente este campo se elimina y la energía es liberada sin pérdidas. Por ejemplo, en un circuito puramente inductivo. La potencia activa es nula.

No existe un consumo de energía a pesar de que ha fluido la corriente. La inductancia consume potencia reactiva, usualmente expresada en volts-ampères reactivos ó VAR.

Un circuito inductivo puro no existe en la práctica: los alambres conductores de la bobina tienen una cierta resistencia y hay pérdidas en el circuito magnético, por lo tanto, puede decirse que la inductancia consume una pequeña cantidad de energía activa.

1.1.3 EL CAPACITOR

El capacitor es el tercer tipo de carga en un circuito:

La capacitancia es designada por la letra C y expresada en funciones de faradios (F). Esto será discutido con más detalle en los capítulos siguientes. El símbolo gráfico del capacitor es (Fig. 1.5):



Fig. 1.5

En un circuito capacitivo la corriente adelanta al voltaje en 90 grados eléctricos como se muestra en la Fig. 1.6.

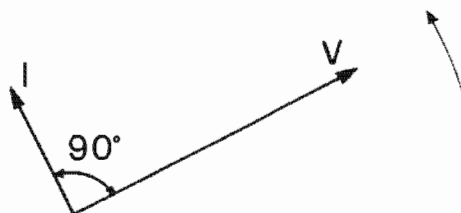


Fig.1.6. Diagrama vectorial de un circuito capacitivo

En un circuito puramente capacitivo, no existe consumo de energía aún si hay una corriente circulando.

No obstante el capacitor genera potencia reactiva expresada en volts-amperes reactivos, del valor de la capacitancia podemos calcular la potencia reactiva.

$$Q=2 \pi fcv^2 \text{ (VAR)}\dots\dots\dots(3)$$

1.2 RECEPTORES COMBINADOS.

En la práctica una carga no está constituida solamente por la resistencia, inductancia o capacitancia; estas tres cargas con frecuencia coexisten. Las diversas cargas son usualmente abastecidas directamente de la red principal del circuito eléctrico.

Estas cargas se describen estando conectadas en paralelo Fig. 1.7. y en serie. Fig. 1.9

El elemento común, en este caso, la fuente de voltaje, es tomada al inicio del diagrama vectorial.

La corriente total es la suma vectorial de las corrientes parciales: $I_T = I_R + I_L + I_C$, Fig. 1.8.

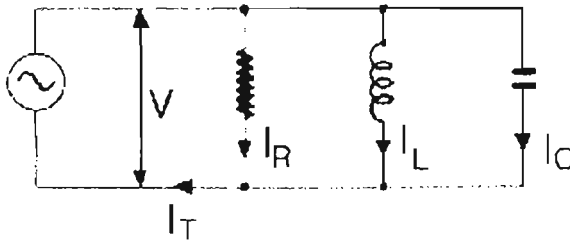


Fig. 1.7. Circuito paralelo $I_T = I_R + I_L + I_C$.

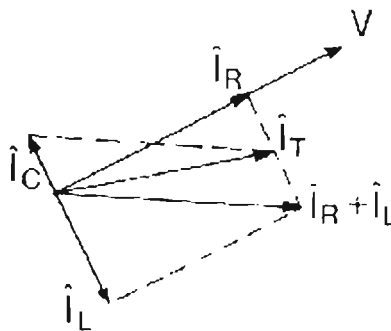


Fig.1.8. Diagrama vectorial paralelo $V = V_R = V_L = V_C$

En algunos casos, el circuito se puede conectar en serie, por ejemplo, en un estabilizador (balastro), se coloca en serie con un tubo o lámpara de descarga.

En la figura 1.9 el tubo de descarga se ha aproximado a una resistencia.

En la figura 1.10 se muestra el diagrama vectorial de un circuito conectado en serie.

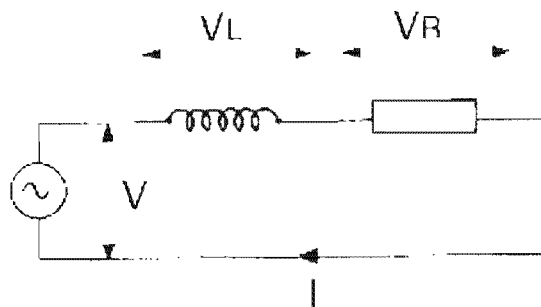


Fig.1.9. Circuito serie.

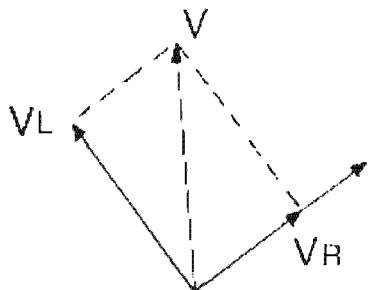


Fig.1.10. Diagrama del vector serie $I=I_L=I_R$

1.3 EL SISTEMA DE TRIFÁSICO

1.3.1 DISTRIBUCIÓN TRIFÁSICA.

Un sistema se describe como un sistema trifásico balanceado, cuando se compone de un grupo de tres voltajes, con el mismo periodo y el mismo valor efectivo ó eficaz (r.m.s) desfasados entre ellos por un tercio del periodo (120 grados eléctricos) en la Fig.1.11 se muestra una señal trifásica balanceada.

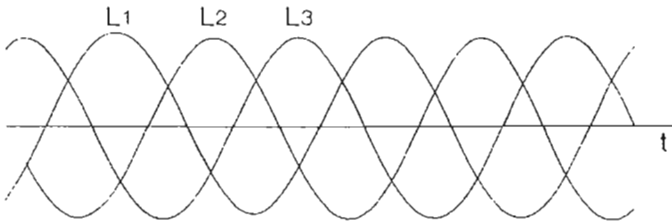


Fig. 1.11

A fin de que el sistema pueda ser posible, es obvio que la suma algebraica de las corrientes debe ser nula durante cualquier intervalo de tiempo, no importando que tan pequeño sea.

1.3.2 DELTA ESTRELLA

Un Generador y una carga pueden ser conectados ya sea con un punto común (en estrella) o en serie (en delta).

En una conexión estrella (Fig. 1.12), el voltaje principal es igual a $\sqrt{3}$ veces el voltaje por fase y la corriente principal es igual a la corriente de fase.

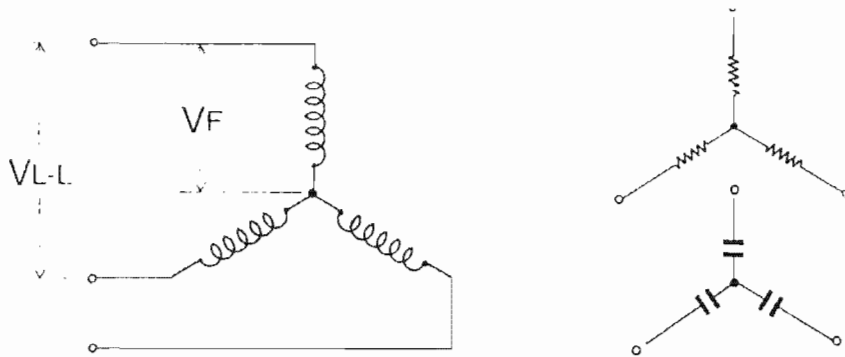


Fig.1.12. conexión Estrella.

En una conexión delta (Fig. 1.13) los voltajes de fases son iguales y la corriente principal es igual a $\sqrt{3}$ veces la corriente de fase.

$$P = \sqrt{3} \quad VI \cos \phi \dots\dots\dots(4)$$

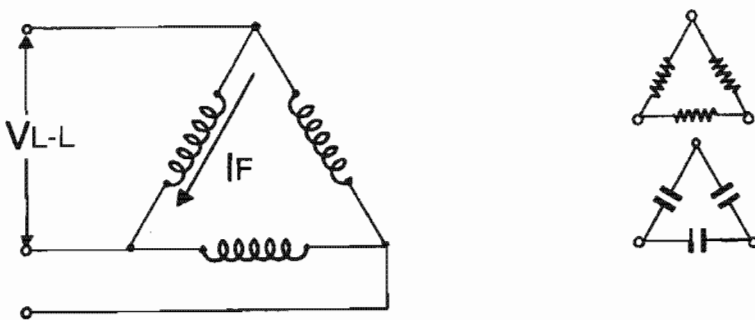


Fig.1.13. Conexión delta.

1.3.2 IDENTIFICACIÓN DE TRES FASES/ INDICADOR DE CAMPO ROTATORIO.

Como una regla general, las fases son identificadas por las letras A, B y C (ó R, S y T respectivamente). El orden de fase (sucesión de máximo voltaje) es 1, 2 y 3. Por ejemplo A, B, y C (ó R, S y T).

Cuando un motor esta conectado en secuencia de fase ABC, este gira en la dirección de las manecillas del reloj. Y girará en contra de las manecillas del reloj, si dos fases se invierten.

Con frecuencia es útil para identificar el orden de la fase, usar un pequeño motor trifásico en donde ambas fases y la dirección de rotación ya han sido identificadas.

También es posible identificar la dirección de rotación de fase, por medio de un medidor estático.

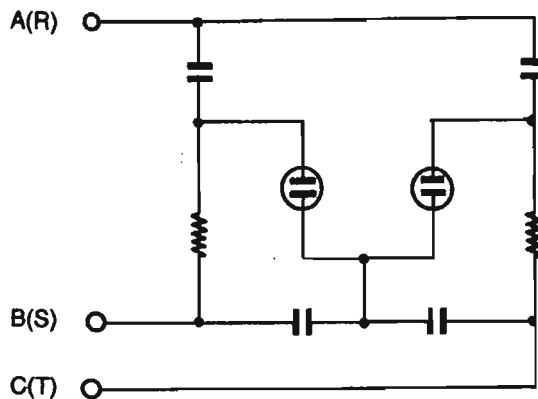


Fig. 1.14 Diagrama de un indicador de campo rotatorio

1.4 EL FACTOR DE POTENCIA.

1.4.1 POTENCIA ACTIVA.

Los diferentes dispositivos eléctricos convierten energía eléctrica en otras formas de energía como: mecánica, lumínica, térmica, química, etc.

Esta energía corresponde a una energía útil o potencia activa o simplemente potencia, similar a la energía consumida por una resistencia.

Este tipo de potencia puede ser expresada en watts (W):

1.4.2 POTENCIA REACTIVA.

Los motores, transformadores y en general todos los dispositivos eléctricos que hacen uso del efecto de campo electromagnético, requieren energía activa para realizar un trabajo útil, mientras que la potencia reactiva es utilizada para la generación del campo magnético. Esta energía reactiva corresponde a la potencia reactiva que esta desfasada 90 grados de la potencia activa. Ya vimos que esta potencia es expresada en volts-amperes reactivos (VAR).

1.4.3 POTENCIA APARENTE

El producto de la corriente y el voltaje es llamado potencia aparente, es también la resultante de la suma de los vectores gráficos de la potencia activa y de la potencia reactiva.

1.1.4 REPRESENTACIÓN GRÁFICA.

La siguiente representación gráfica puede ser usada para ilustrar las diferentes formas de potencia eléctrica Fig. 1.15.

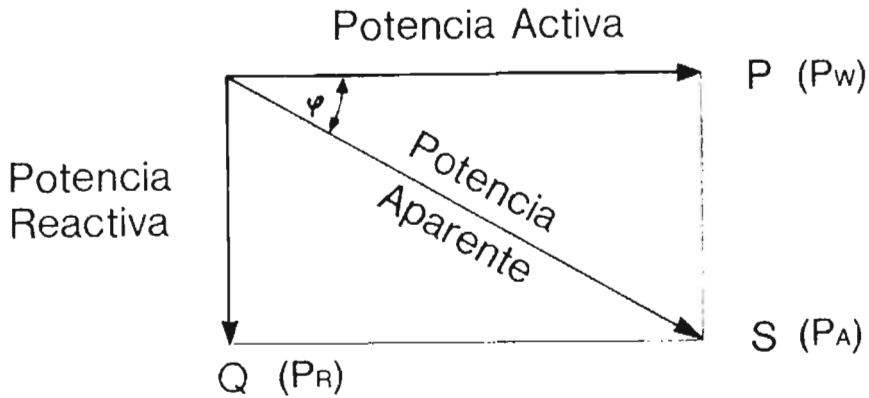


Fig.1.15 Diagrama de potencia Eléctrica.

El ángulo entre las potencias activa y aparente es denotado por la letra ϕ .
 Tenemos por lo tanto que:

Potencia activa = Potencia aparente * $\cos \phi$

$$P = S * \cos \phi \quad \text{ó} \quad P_w = P_a * \cos \phi \dots\dots\dots(5)$$

El Valor de $\cos \phi$ es llamado factor de potencia.

El factor de potencia se puede expresar como una función de la potencia activa y reactiva.

$$\text{De lo cual} \quad S^2 = P^2 + Q^2 \quad \text{ó} \quad P_A^2 = P_W^2 + P_R^2$$

$$\cos \phi = \text{F.P.} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad \dots\dots\dots(6)$$

Esta fórmula muestra que el factor de potencia puede ser considerado en un valor relativo. Como un valor característico de la potencia consumida.

Además de $\cos \phi$, la tangente del ángulo también se utiliza:

$$\text{tg } \phi = \frac{Q}{P} \quad \dots\dots\dots(7)$$

1.5. MEDICIONES DE POTENCIA.

1.5.1 PRINCIPIO.

El principio de funcionamiento de un medidor de potencia se encuentra fundamentado en las leyes de Faraday, que aplicadas a la medición de potencia se explican en su forma más simple de la siguiente forma.

La medición de potencia eléctrica se hace con uno o varios dispositivos de control que conducen un disco, y el torque o par de frenado que esta en función de la velocidad del disco.

Dos electroimanes son colocados en el medidor y se alimentan con el voltaje y la corriente a ser medidos Fig. 1.17 y 1.16. El flujo resultante induce un torque en el motor del disco que es proporcional a la potencia. La acción de frenado del disco es proporcionada por un imán permanente Fig. 1.17.

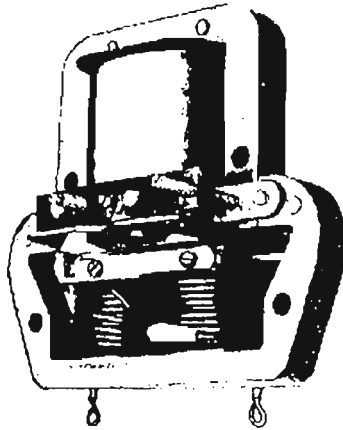


Fig.1.16 Circuito electromagnético de un medidor de una fase

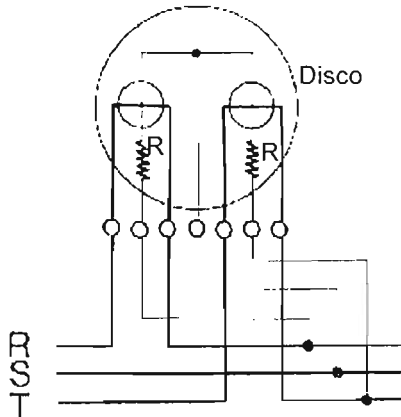


Fig.1.17 Diagrama eléctrico de un medidor trifásico

1.5.2 MEDICIÓN DE LA ENERGÍA ACTIVA

En una red de distribución trifásica sin neutro, se usan dos watorímetros para medir la energía activa.

En una red con neutro, la corriente debe ser medida en las tres fases. En la Fig. 1.18 y 1.19 se muestra el dibujo de un medidor para un sistema trifásico y su diagrama.

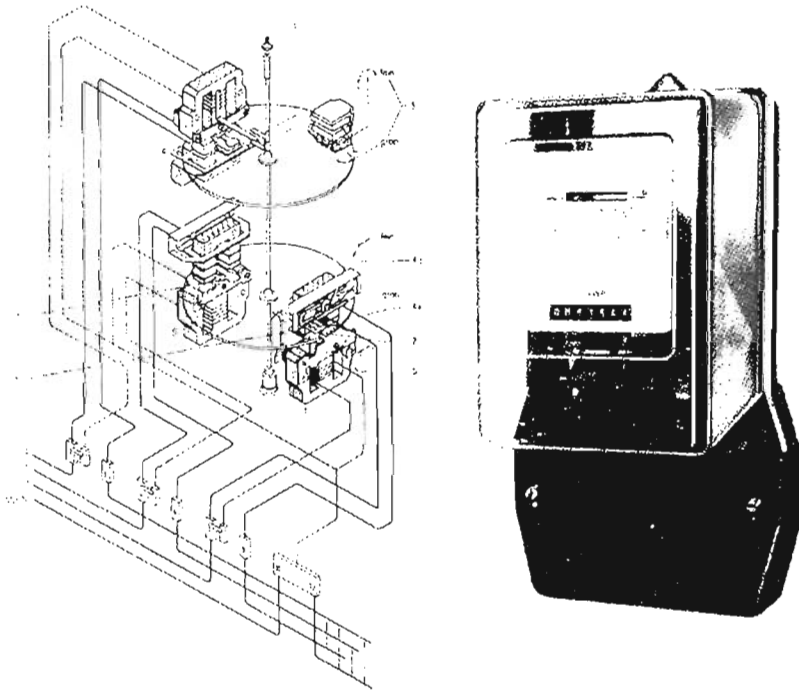


Fig. 1.18 y 1.19 Diagrama y medidor de 3 fases, 4 cables

1. Inicio
2. carga débil
3. Ajuste del número de revoluciones
4. Corrección de fase a) gruesa, b) fina.
5. Torque o par.
6. Compensación de error de campo giratorio

1.5.3 MEDICIÓN DE LA POTENCIA REACTIVA.

El principio es el mismo que para la medición de potencia activa, pero el flujo debido al voltaje de la bobina tiene que estar desfasado en 90 grados. Para este propósito se usa el valor de voltaje de las otras dos fases diferentes para la medición de corriente.

El siguiente diagrama (Fig.1.20) muestra un medidor de VAR para el caso de una carga simétrica.

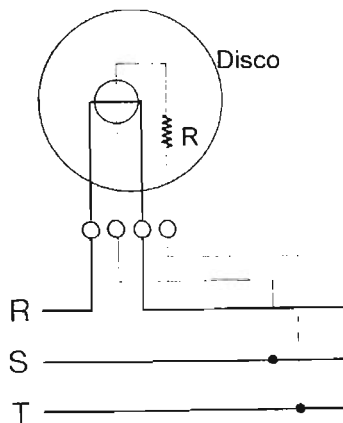


Fig.1.20. Diagrama de un medidor de energía reactiva

1.5.4 VALOR DEL COSENO DE ϕ .

Hemos visto previamente que el factor de potencia se puede calcular cuando las potencias activa y reactiva son conocidas.

Este método se puede aplicar también para calcular el factor de potencia de la energía consumida durante un cierto periodo de tiempo.

Usando medidores de potencia activa y reactiva y un cronometro, es posible determinar la energía consumida durante un periodo especificado de tiempo y así calcular el factor de potencia durante este tiempo. (Siempre tomar en cuenta la relación entre las revoluciones del disco medidor por unidad de energía usada).

1.5.5 MEDICIÓN DE POTENCIA.

La inversión y los costos de producción para el suministro de electricidad dependen de la cantidad de energía usada, pero también de los niveles de potencia demandada por el consumidor. En resumen, para medir la cantidad de energía, las compañías abastecedoras de electricidad (en México CFE y Luz y fuerza), tienen que medir el nivel de potencia a la cual esta energía es consumida.

Así como considerar solamente cargas impuestas durante periodos largos, que son aquellas que pueden modificar el equilibrio termodinámico de la instalación: La determinación de la demanda de potencia se basa en un periodo de medición de 15 minutos.

El número de revoluciones del disco medidor tipo "ferraris" (Fig. 1.21) es proporcional a la cantidad de energía consumida. El número de revoluciones en un

periodo dado, representa al final de este periodo de integración, el promedio de la potencia demandada por el consumidor.

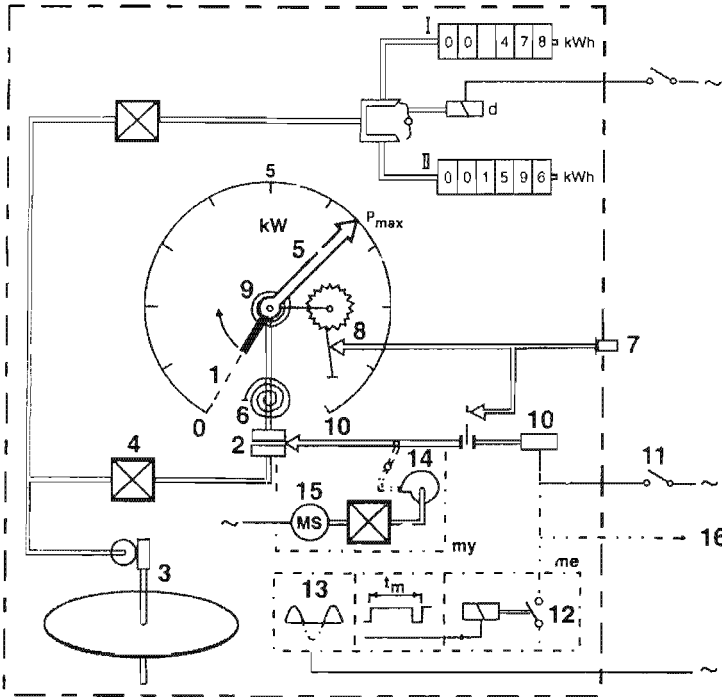


Fig.1.21 principio de funcionamiento del indicador máximo

1. indicador, 2. embrague o clutch, 3. rotor, 4. tren de engranes, 5. aguja,
6. resorte de retorno, 7. botón de retorno, 8. rueda dentada, 9. resorte,
10. relevador, 11. contacto externo, 12. contacto interno, 13. transmisión estática,
14. leva, 15. motor síncrono, 16. señal de periodo de integración.

En la carátula superior del medidor, el indicador (1) está acoplado al rotor (3) por medio de un embrague (2). El indicador se mueve por medio de un tren de engranes (4) a través de un ángulo proporcional a la potencia y empuja la aguja.

Al final de cada periodo de integración, el indicador (1) se desengancha del embrague. El resorte de retorno (6) es liberado y regresa el índice (1) a cero mientras la aguja (5) permanece en la posición que alcanzó.

La desviación total del indicador (1) iguala a la potencia promedio al final del periodo de integración, la aguja (5) indica las más altas potencias promedio durante todos los periodos de integración.

Al final del periodo de registro (por ejemplo un mes), la máxima lectura de la potencia promedio es tomada por un empleado de la empresa de electricidad.

La aguja (5) es entonces puesta a cero por medio del retorno (7). En este momento la rueda dentada (8) y el resorte de retorno (9) que fueron extendidos por la aguja, son desenganchados. Al mismo tiempo, el botón de retorno (7) es usado para abrir el embrague (2) de tal modo que el indicador también regresará a su posición cero.

1.6 MEDICIÓN DEL COSENO DE ϕ

1.6.1 MEDICIÓN EN UN CIRCUITO DE UNA SOLA FASE.

a) El método más simple es medir la potencia usando un wáttmetro, la corriente y el voltaje Fig. 1.22.

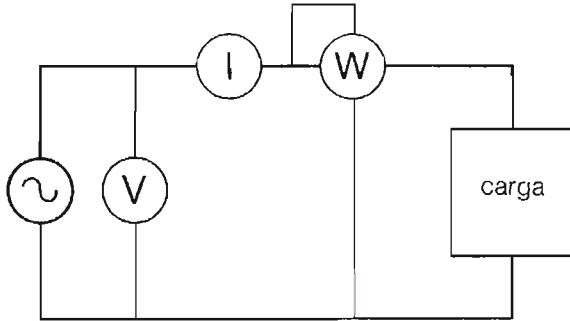


Fig. 1.22 medición del $\cos \phi$ en un circuito monofásico

Entonces tenemos que:

$$\cos \phi = \frac{P_w}{V_{xl}} = \frac{P}{VI} = \frac{P}{S} \dots\dots\dots(6)$$

b) Otro método es utilizar un medidor de fase tipo "bruger" Fig. 1.23. Este es un dispositivo con dos armazones cruzados y sin acción de resorte para el indicador. El punto, asumirá una posición arbitraria (medidor logómetro) en su posición de descanso.

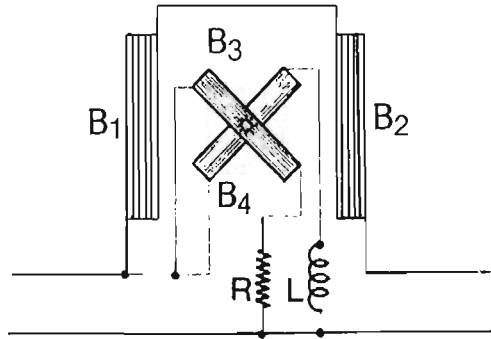


Fig.1.23. Principio de un medidor de fase Bruger.

El principio de operación de un medidor de fase tipo Buger consiste en dos bobinas B1 y B2 fijas a través de las cuales fluye la corriente total. El flujo así creado afectará los dos embobinados móviles que están montados perpendicularmente el uno con el otro.

El primero se alimenta a través de un circuito resistivo y el segundo a través de un circuito inductivo, ambos están conectados al voltaje de la red. B1 y B2 crean un flujo en fase con la corriente, B3 un flujo en fase con el voltaje y B4 un flujo retrasado del voltaje 90 grados. En equilibrio, la posición del armazón es una función del ángulo entre la corriente y el voltaje, por ejemplo; La escala de ϕ es graduada en el $\cos\phi$. Debe aclararse que la lectura es valida solo para una cierta frecuencia.

1.6.2 MEDICIÓN DE UN CIRCUITO TRIFÁSICO BALANCEADO.

a) Método de los dos wáttmetros. En un circuito trifásico balanceado se pueden conectar dos wáttmetros de acuerdo al siguiente diagrama Fig. 1.24.

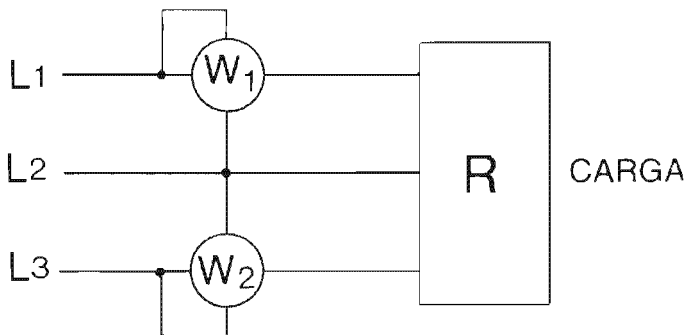


Fig.1.24. Método de los dos wáttmetros

Es muy importante realizar las conexiones correctas, indicadas en los instrumentos; de tal forma que si un instrumento reflexiona en la dirección equivocada, las conexiones de su bobina de corriente se deben intercambiar y la lectura se debe de tomar como un valor negativo. La suma de la lectura de los 2 wáttmetros dan la potencia disipada en la carga. La relación de estas dos lecturas resultan del retraso del voltaje- corriente ó sea ϕ .

Tenemos por lo tanto que:

$$\operatorname{tg} \phi = \sqrt{3} \frac{W_1 - W_2}{W_1 + W_2} \qquad \cos \phi = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \phi}} \dots\dots\dots(7)$$

Donde:

W_1 = Potencia medida en wáttmetro 1

W_2 = Potencia medida en wáttmetro 2

Con el método gráfico que a continuación se muestra en la Fig.1.25 es posible encontrar el valor del $\cos \phi$ como una función de la relación W_1/W_2

b) Uso del factorímetro de tres fases. El principio es idéntico al usado para el medidor de una sola fase. La bobina de corriente es conectada a una fase, las dos bobinas móviles son conectadas entre esta fase y las otras dos. En esta forma ambos circuitos son resistivos cuando se usa el cambio de fase entre los voltajes en el sistema trifásico. El factorímetro indicará un factor de potencia inductivo y o capacitivo dependiendo de la secuencia de fase (dirección de rotación). En la figura 1.25 se muestra una gráfica del factor de potencia en función de la relación w_1/w_2 .

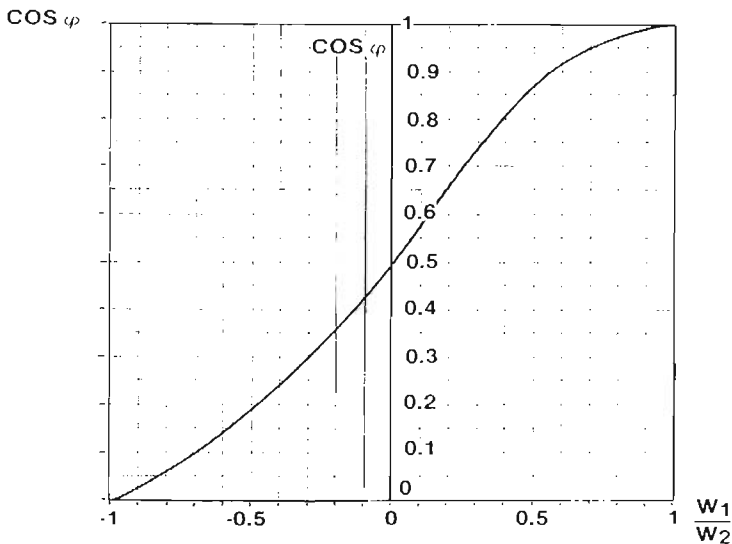


Fig. 1.25 $\cos \phi$ como una función de W_1/W_2

1.6.3 MEDICIÓN DE 3 FASES CON CIRCUITO DESBALANCEADO

En un circuito desbalanceado, el $\cos \phi$ es diferente en cada fase. Para medir el $\cos \phi$, es necesario medir separadamente, en cada fase de la carga, la potencia, corriente y voltaje, en las terminales de fase, como si fuera para una sola fase.

Si el neutro de una carga conectada en estrella es inaccesible, la medición será imposible. En forma similar, si la carga conectada es delta y las fases no pueden ser desconectadas para la medición, es imposible medir el factor de potencia en las fases, sin embargo, para la carga total de la red, es posible medir las potencias activa y reactiva y de estos valores obtener un valor promedio del factor de potencia.

En la figura 1.26 se muestra el diagrama de un medidor de energía reactiva.

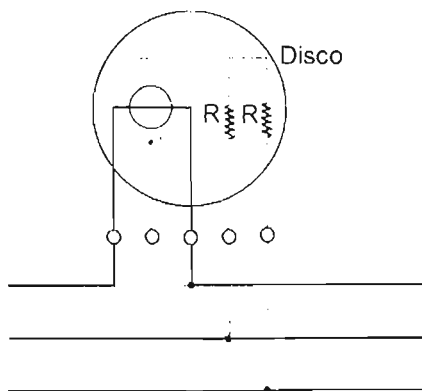


Fig. 1.26. Diagrama de un medidor de energía reactiva

1.6.4 DISPOSITIVO ELECTRÓNICO DE MEDICIÓN.

La señal del transformador de corriente y la señal de corriente de las otras dos fases (reducida por dos resistencias), son transformadas por un puente rectificador cargado sobre un diodo zener⁽²⁾. Se genera así una señal aproximadamente rectangular sincronizada con la señal medida y tendiendo una amplitud máxima constante de umbral del diodo zener (Fig. 1.27).

Para una carga resistiva, la corriente de la fase C (ó T), está desfasada 90 grados del voltaje AB (RS) para una carga puramente inductiva ó puramente capacitiva, la señal de corriente esta ya sea en fase ó en contra de la señal de voltaje.

⁽²⁾ El diodo zener., es un diodo semiconductor diseñado especialmente para trabajar en inversa.

En tales casos, el dispositivo de medición recibe una señal positiva o negativa a través de la alternancia y se desvía.

Cuando el circuito es resistivo, el dispositivo de medición recibe una señal positiva durante una mitad de onda y una señal negativa durante la otra mitad y no se desvía.

La aguja se puede ajustar al centro de la carátula Fig. 1.28.

La desventaja de este dispositivo es que está referido al paso de onda de corriente cero y la medición estará afectada por las armónicas (ver capítulo 5).

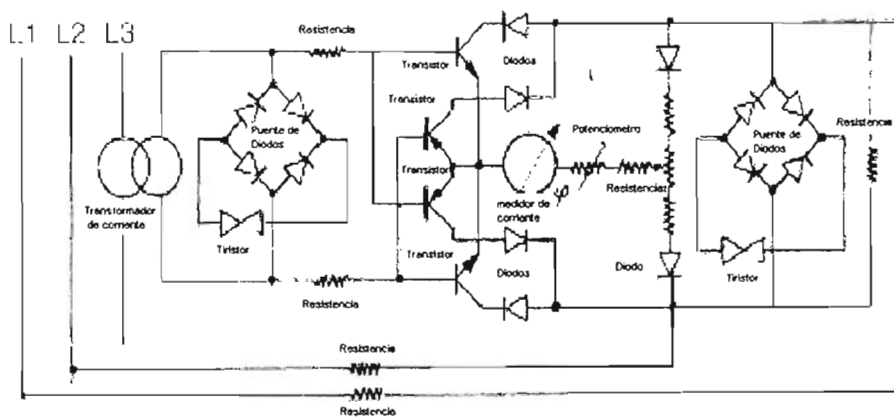


Fig. 1.27. Principio de un dispositivo electrónico de medición.



Fig. 1.28 medidor de $\cos \phi$

1.7 PROBLEMAS CON UN BAJO FACTOR DE POTENCIA.

1.7.1 ARRANQUE DE CORRIENTE.

Una carga que consume la mayor corriente reactiva y el factor de potencia más bajo es el peor fenómeno eléctrico que puede suceder en condiciones estables.

Para una potencia consumida constante (carga conectada al sistema no variable) y el factor de potencia más bajo, la potencia aparente será más alta y así también más alta la cantidad de corriente de la red.

Con un factor de potencia igual a 0.5, la cantidad de corriente consumida por la carga, será dos veces la corriente útil.

Con un factor de potencia igual a 0.9, la cantidad de corriente consumida será 10 % más alta que la corriente útil Fig. 1.29.

Para una potencia constante, la cantidad de corriente en la red se incrementará en la medida en que el factor de potencia disminuya. Esto significa que los transformadores y cables de distribución estarán sobrecargados y que las pérdidas en ellos se incrementarán en proporción al cuadrado de la corriente. Esto por supuesto es real en todos los puntos de la red, del lado de alto y bajo voltaje.

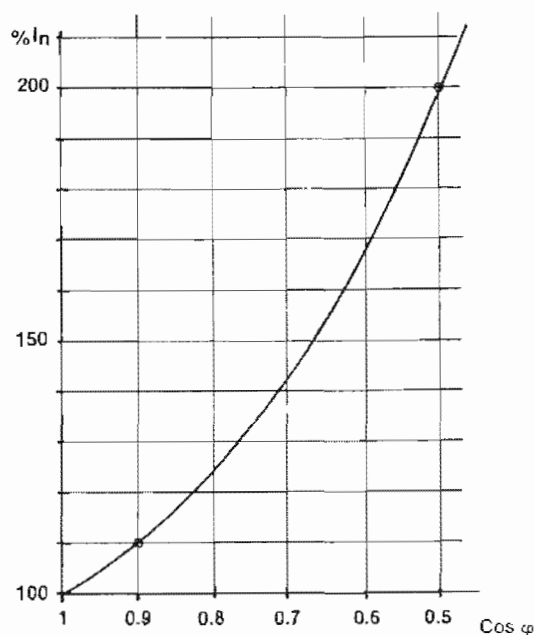


Fig. 1.29 La corriente nominal es afectada por el factor de potencia.

1.7.2 PROBLEMAS CON UN FACTOR DE POTENCIA BAJO.

Hemos visto la considerable influencia que el factor de potencia tiene sobre el valor de la corriente demandada en el sistema.

Este punto en que aumenta la corriente ocasionará muchas desventajas para el usuario industrial, todo lo cual tiene repercusiones financieras. Esas costosas circunstancias pueden situarse en 4 categorías; las cuales se verán en detalle más adelante:

- Aumenta las pérdidas por efecto joule, las cuales son una función del cuadrado de la corriente. Por ejemplo.
 - Los cables entre el medidor y el usuario.
 - Los embobinados de los transformadores de distribución
 - Dispositivos de operación y protección.

- Un aumento en la caída de voltaje resultando en un insuficiente suministro de potencia a las cargas (motores, lámparas, etc.) Estas cargas sufren una reducción en su potencia de salida. Esta caída de voltaje afecta a:
 - Los embobinados de los transformadores de distribución
 - Los cables de alimentación.
 - Sistemas de protección y control.

- Las instalaciones no pueden ser usadas a toda su capacidad resultando en los altos costos de depreciación. Esto es particularmente importante en el caso de transformadores de distribución.

- Esas desventajas también afectan a los productos y distribuidor de energía eléctrica. Es completamente comprensible, sin embargo, que él debe penalizar al usuario "malo" (que está fuera de los valores permitidos del factor de potencia: $\cos \phi < 0.9$) haciendo que él mismo pague más por su electricidad.

1.7.3 PÉRDIDAS EN LOS CABLES.

Para la misma potencia activa transmitida, una mejora en el factor de potencia significa una reducción en la corriente principal.

Para un cable dado, las pérdidas son proporcionales al cuadrado de la corriente. Para mejorar el factor de potencia de un valor inicial $\cos \phi_1$ a un $\cos \phi_2$, las pérdidas I^2R pueden ser reducidas por un factor:

$$K = \left[1 - \left(\frac{\cos \phi_1}{\cos \phi_2} \right)^2 \right] * 100 \text{ en porcentaje} \dots \dots \dots (8)$$

K : Porcentaje de reducción de pérdidas en un cable al mejorar el factor de potencia

Vemos que una mejora del factor de potencia de 0.6 a 0.8 reduce las pérdidas en un 44% y una mejora de 0.6 a 1.0 resultara en una reducción del 64%. Aunque esos factores sean bien conocidos, poca atención es dada para las posibles mejoras en economía.

Las pérdidas en el cobre varían con el cuadrado de la corriente y por lo tanto están directamente relacionadas con el factor de potencia.

1.7.4 PÉRDIDAS EN LOS TRANSFORMADORES

Las pérdidas totales en un transformador son iguales a las pérdidas en el núcleo, más las pérdidas en el cobre a plena carga, corregidas por la relación al cuadrado de las potencias aparente, a la carga dada, divididas por la potencia a plena carga.

En la figura 1.30 se muestra una gráfica donde podemos observar las pérdidas en los transformadores en función de su salida nominal.

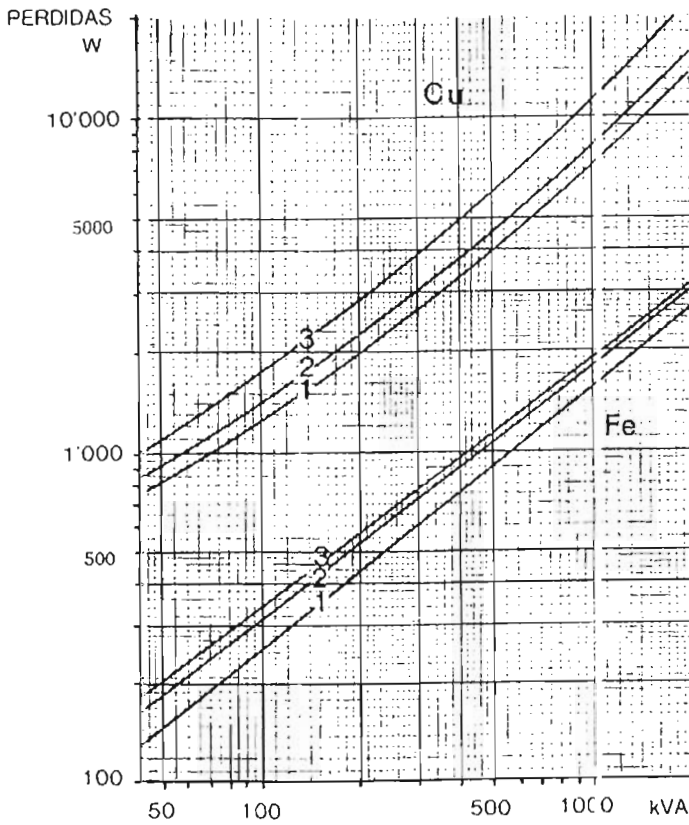


Fig. 1.30. Valores de las pérdidas del núcleo y del embobinado de los transformadores en función de su salida nominal.

3= transformador con pérdidas normales.

2= Transformador con pérdidas bajas.

1= Transformador con pérdidas extrabajas.

1.7.5 CAÍDA DE VOLTAJE EN UN TRANSFORMADOR.

Un transformador tiene una resistencia primaria, una resistencia secundaria y una inductancia (de fuga) sobre el primario y el secundario.

Esto puede ser estudiado usando el diagrama de Kapp, el cual muestra que con carga, el transformador tendrá una caída de voltaje en su lado secundario.

En la práctica se hace una prueba de corto circuito en la cual se determina el valor del voltaje primario (expresado como un porcentaje del voltaje nominal), necesario para dar la corriente nominal sobre el lado del secundario cortocircuitado. Este valor puede variar dependiendo del tipo de transformador entre 2 y 12 %.

Para transformadores de distribución, el valor del voltaje del primario esta generalmente alrededor de un 5 %,

El voltaje de corto-circuito es usado para determinar el valor relativo de la caída de voltaje resistivo (ΔV_r) y la caída de voltaje inductivo (ΔV_x).

En la práctica, la caída de voltaje relativo (en %) es siempre mas pequeña que el voltaje de corto circuito. Esta caída de voltaje esta directamente relacionada con la corriente.

También varía, asumiendo corriente constante con el factor de potencia. Con el factor de potencia bajo, la caída de voltaje es más alta. Si el circuito es capacitivo, el voltaje de salida del transformador se incrementará.

En la figura 1.30 se muestran gráficamente las pérdidas en un transformador.

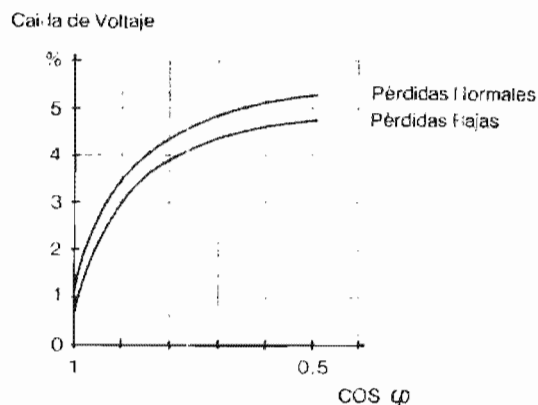


Fig. 1.31 . Gráfica de pérdidas en un transformador

Tenemos aproximadamente.

$$\Delta V = \Delta V_r \cos \phi + \Delta V_s \operatorname{sen} \phi \dots\dots\dots(9)$$

La gráfica anterior Fig. 1.31 esta dibujada para un transformador con pérdidas normales con:

$$\Delta V_r = 1.5\% \quad \text{y} \quad \Delta V_s = 5.3\% \dots\dots\dots(10)$$

Es de nuestro interés mantener, en la salida del transformador un factor de potencia tan cercano a la unidad como sea posible.

En el caso sin carga, el incremento en voltaje causado por el capacitor es mínimo.

1.7.6 CAÍDA DE VOLTAJE Y CAPACIDAD MÁXIMA EN CABLES.

Una línea de transmisión esta eléctricamente construida de una resistencia y una inductancia en serie (cerca de 0.4 a 0.9 μH por metro).

La caída de voltaje en tal línea de transmisión, a través de la cual fluye una corriente con ángulo de fase ϕ , esta dada a una primera aproximación por:

$$\Delta v = I(R \cos \phi + \omega L \sin \phi) \dots\dots\dots(11)$$

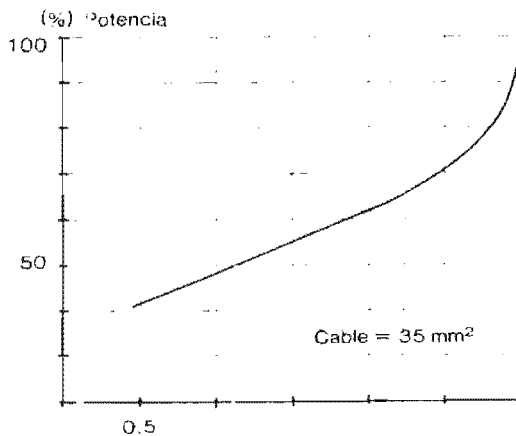


Fig. 1.32. Caída de voltaje en los cables.

En una red trifásica donde la caída de voltaje máxima permitida n%, la potencia máxima, que puede ser transmitida es (ver Fig. 1.32):

$$P = \sqrt{3}VI \cos \phi \dots\dots\dots(12)$$

$$\Delta V = \frac{nV}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots(13)$$

lo cual da:

$$P = \frac{nV^2}{R + wL \tan \phi} \dots\dots\dots(14)$$

En la práctica el valor n esta entre el 5 y 10%.

1.7.7 POTENCIA APARENTE DISPONIBLE EN EL TRANSFORMADOR.

La potencia que puede ser liberada de un transformador esta expresada en kVA. Donde la potencia máxima corresponde, en un voltaje dado a la corriente máxima.

Esta es la máxima potencia aparente que un transformador puede entregar. Pero el requerimiento es para potencia activa. Un transformador es entonces mucho mejor utilizado cuando el factor de potencia de la carga esta cercano a la unidad (ver Fig. 1.33)

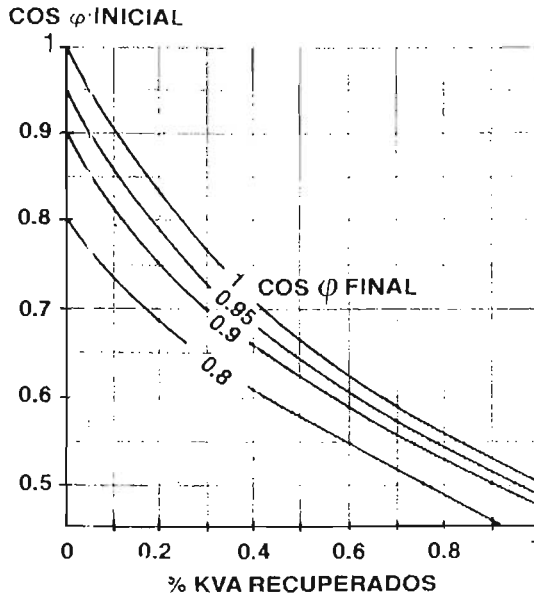


Fig.1.33 Recuperación de potencia en un transformador.

La potencia aparente extra aprovechable mientras se mantiene la misma potencia activa puede ser expresada por:

$$kVA = kW \left(\frac{1}{\cos \phi_1} - \frac{1}{\cos \phi_2} \right) \dots\dots\dots(15)$$

lo cual nos da en forma gráfica y por kW de carga, la potencia aparente recuperada.

1.7.8 COSTO DE LA ENERGÍA

En resumen, para proporcionar potencia reactiva en los cables principales y a través de transformadores de alto voltaje, las compañías de electricidad deben también generar esta potencia reactiva en sus máquinas.

Esto significaba que las máquinas deben ser sobre dimensionadas o que se deben instalar capacitores de potencia en alto voltaje. Es por esta razón, que las compañías de electricidad cargan tarifas mas altas cuando el factor de potencia es bajo.

Existen varios sistemas:

a) Conociendo la energía reactiva

El medidor instalado en el inmueble del usuario indica:

- La energía activa usada (kWh) o (E_w)
- La energía reactiva usada (kVARh) o (E_r)

de lo que se deduce:

$$\cos \phi = \frac{kWh}{\sqrt{kWh^2 + kVARh^2}} \quad \text{ó} \quad \frac{E_w}{\sqrt{E_w^2 + E_r^2}} \dots\dots\dots(16)$$

$$\text{tg} = \frac{kVARh}{kWh} = \frac{E_r}{E_w} \dots\dots\dots(17)$$

Algunos países se refieren al valor de $\cos \phi$, otros al valor $\text{tg} \phi$ para penalizar con cantidades, si el $\cos \phi$ es menor que un cierto valor (en México 0.9). Algunas veces, se da una bonificación si el $\cos \phi$ excede a un valor dado (en México 0.91).

Esto significa que a más bajo factor de potencia, el usuario tiene que pagar más por cada kWh. usado.

b) Conociendo la potencia

El sistema instalado en el inmueble del usuario comprende:

- Medición de la energía activa usada (kWh)
- Medición de la potencia aparente (kVA)

Es necesario conocer el periodo durante el cual la fábrica está en operación, a fin de determinar el $\cos \phi$; lo cual se hace aplicando las fórmulas anteriores.

En la figura 1.34 se muestra la evolución de los valores de potencia aparente y reactiva de acuerdo al valor de $\cos \phi$

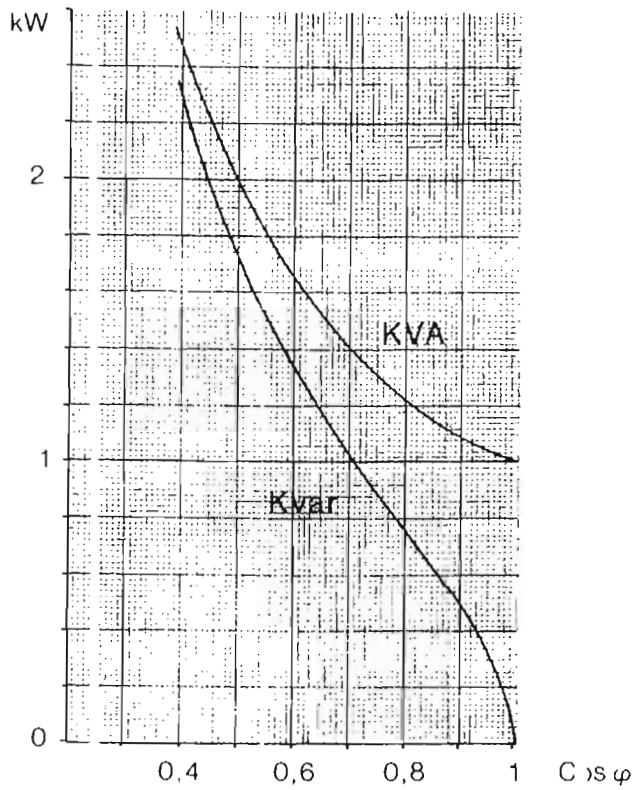


Fig. 1.34 Evolución de los valores de potencia aparente y reactiva de acuerdo al valor de $\cos \phi$

2. LOS CAPACITORES DE POTENCIA DE BAJO VOLTAJE

2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

El primer capacitor que se tiene registrado fue la botella Leyden⁽³⁾ hecho originalmente en 1746 por Pieter Van Musschenbroek y Ewald Georg Von Kleist. Consistió en un recipiente de vidrio, en cuyas superficies internas y externas fueron colocadas hojas de estaño. Las hojas de estaño eran los conductores y la botella el dieléctrico.

El recipiente Leyden se abandonó debido a propósitos industriales. En la figura 2.1 se ilustra parte del recipiente de Leyden.

Los capacitores de aquel tiempo consistieron usualmente de tiras de estaño separados por papel impregnado con parafina.



Fig. 2.1 Botella Leyden.

⁽³⁾ Botella de Leyden, Nombrada de esta manera en honor a la universidad y ciudad donde se descubrió, ya que su inventor Pieter Van Musschenbroek era oriundo de de esta ciudad, aunque el inventor Alemán Ewald Georg Von Kleist, descubre simultáneamente el mismo aparato.

Al final de la segunda guerra mundial había terminado y hubo notables progresos en muchos campos diferentes.

El dieléctrico común fue usado en los años treintas, más tarde cambio a papel duro, que a su vez fue reemplazado por el papel a base de pulpa de madera, conocido como papel *kraft* modificado. Este papel es más denso que el ordinario, se consigue en espesores finos debajo de 5 micras y tiene mucho menos partículas conductoras en su estructura (máximo 17 por m², en lugar de 130).

- Para las placas, el aluminio ha reemplazado al estaño, está disponible en 5 μm de espesor y libre de lubricantes.
- En la impregnación, la parafina ha sido reemplazada por un aceite imprégnate. El voltaje fue limitado a valores muy bajos a fin de evitar la formación de cera. En suma, éste era combustible.

Durante esta fecha se descubrieron los fluidos impregnantes clorados (askarel ó PCB), fluidos incombustibles que poseían propiedades de aislamiento constantes y que facilitaron un gran progreso en la evolución de los capacitores. En la actualidad está prohibido su uso.

En ese tiempo los valores de potencia máximos alcanzados eran de 10 kVAR a 230 Volts y 20 kVAR a 400 Volts.

La figura 2.2 muestra un capacitor de bajo voltaje y su conexión interna, por otra parte las figuras 2.3 y 2.4 muestran el proceso y la maquinaria para la elaboración de los capacitores.

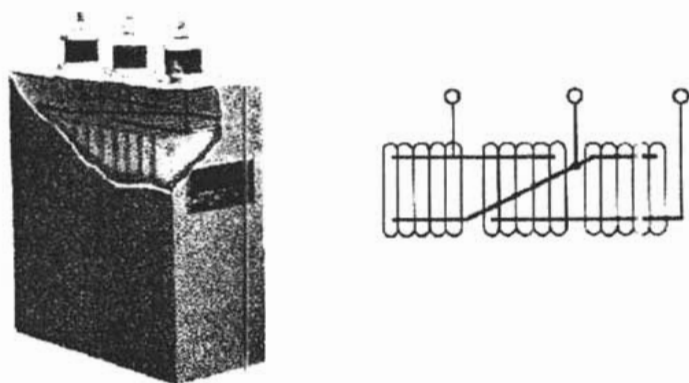


Fig. 2.2 Capacitor de bajo voltaje, 1948.

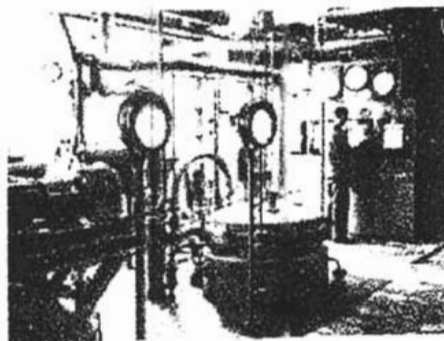


Fig 2.3 y 2.4. Control antes de impregnación e impregnación.

2.1.1 DESPUÉS DE 1970

Hasta los años 70's, los capacitores de bajo voltaje para corrección de factor de potencia fueron fabricados con hojas de aluminio separadas con un dieléctrico de varias capas de papel y devanadas en bobinas o elementos de capacitor. El papel usado en tales capacitores debe estar totalmente seco y entonces impregnado bajo condiciones de vacío.

Las películas de plástico delgadas (polipropileno) tienen mejores características dieléctricas que aquellas de papel utilizados durante los años 1965-1970. Se fabricaron capacitores con un dieléctrico de papel y película de plástico en este periodo y se les llamo "capacitores con dieléctrico combinado". Se usó el papel para facilitar la impregnación de las bobinas del capacitor.

La introducción de la película de polipropileno mejoró las características ya que permitieron una reducción en el espesor del aislamiento entre las placas conductoras para incrementar la capacitancia en el mismo volumen resultando en capacitores más pequeños y ligeros.

El último paso en el proceso de la evolución es la introducción del capacitor "todo de polipropileno" (All film Capacitor).

La técnica clásica fue abandonada por algunos fabricantes a favor del uso de película de polipropileno metalizado.

Esta técnica tiene la ventaja de proporcionar capacitores que son secos, confiables, baratos y compactos. No estaban en la etapa donde los capacitores eran hechos con dieléctrico combinado (papel + película).

2.2 PELÍCULA DE POLIPROPILENO METALIZADO

2.2.1 HISTORIA

Las investigaciones preliminares sobre polipropileno metalizado para capacitores de potencia se iniciaron a principios de 1955.

Este trabajo resulto alrededor de 1969 en la comercialización de capacitores para corrección de factor de potencia, todos con polipropileno metalizado para motores y lámparas.

Fue hasta 1971, cuando fue producido el primer capacitor industrial de bajo voltaje. Esto significa la introducción en el mercado del capacitor de bajo voltaje de polipropileno metalizado y seco; sus tamaños, no obstante, limitados a 10 kVAR.

De hecho cuando estas unidades fueron fabricadas para potencias mayores o cuando fueron conectados en paralelo, ocurrió una importante disminución del tiempo de vida así como una reducción de capacitancia durante su tiempo de vida.

En 1971 un vasto programa de investigación fue iniciado con la ayuda de IRISA (Instituto Belga para Ayuda a la Investigación Científica Aplicada a la industria y la Agricultura). Este estudio fue llevado sin interrupción hasta 1975 y permitió a algunos fabricantes entender y mas tarde controlar los diversos parámetros de desmetalización (pérdida de capacitancia) y aumentar el tamaño y voltaje de los capacitores.

En 1975, la variedad de unidades fueron aumentadas de 10 a 50 kVAR. Un año después en 1976, la potencia máxima por unidad llegó de 75 kVAR hasta 110 kVAR en 1978 y ahora se tienen hasta 130 kVAR.

Los voltajes también han aumentado, de 230 Volts en 1971, hasta ahora que se están produciendo capacitores de película metalizada para 660 Volts.

El término "capacitor seco" usado aquí significa un capacitor cuyo recipiente no contiene líquido libre. El término "seco" es también usado cuando los bobinados (Fig. 2.5) contienen muy poca cantidad de líquido impregnante (tan poco que no puede escurrir, aún si la unidad se destruye).

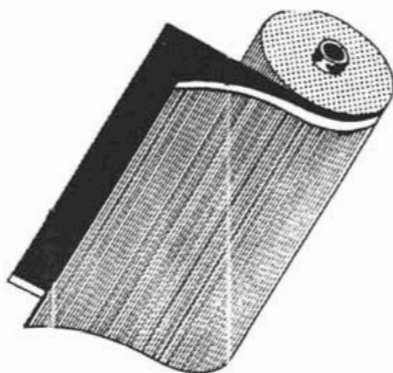


Fig.2.5. Bobina (elemento) para potencia

2.2.2 PRINCIPIO

Un capacitor consiste en dos placas conductoras adyacentes separadas por una hoja aislante. El valor de la capacitancia es directamente proporcional al área de las placas e inversamente proporcional al espesor del material aislante llamado dieléctrico.

$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi e} \dots\dots\dots(18)$$

Obtenemos para un capacitor embobinado:

$$C = 0.175 \frac{\xi S}{e} \times 10^{-6}$$

En donde:

C = Capacitancia en μf

ξ = Constante dieléctrica

S = Área de los electrodos (cm^2)

e = Espesor del dieléctrico (cm.)

Podemos ver que la capacidad, y así por ejemplo la potencia del capacitor está directamente relacionada con el espesor del dieléctrico.

Recordemos el hecho de que el material aislante posee partículas conductoras, por lo que es necesario usar al menos dos capas aislantes (ver figura 2.6), la segunda capa debe ser capaz de resistir totalmente las tensiones cercanas a una falla.

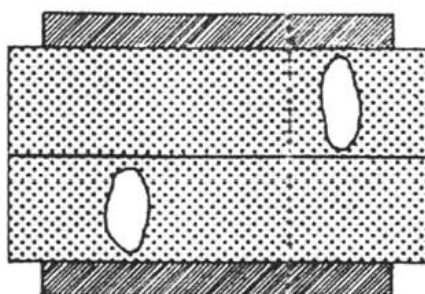


Fig.2.6. Capa doble y la distribución de una falla.

Hemos visto que las partículas conductivas, provocarían que el capacitor entrara en corto circuito en este caso.

Por lo tanto, fue necesario diseñar y construir un capacitor que se autoreparará así mismo.

2.2.3 FABRICACIÓN

Un recubrimiento metálico extremadamente fino es depositado en una cara de una película plástica cuyo espesor esta entre 4 y 12 μm (10^{-6}m) de acuerdo al voltaje.

El metal es usualmente aluminio o zinc con un espesor menor a 1/100 de una micra, o sea, 10 Ångström (Å).

Se usa cinta adhesiva durante la metalización para evitar que se deposite metal en ciertas partes, dando así distancias de fuga adecuadas, las cuales separan las dos capas conductoras.

Las dos capas conductoras son enrolladas concéntricamente a fin de crear una bobina cilíndrica.

Se rocía Zinc líquido sobre cada cara para conectar todas las vueltas del mismo electrodo. Esto es conocido como rociado.

Con esto, se ha construido el núcleo del capacitor de potencia.

2.2.4 PRINCIPIO DE TRABAJO

Supongamos que hay una falla en un polipropileno metalizado. Esta puede ser causa por ejemplo, por una partícula conductora en el material aislante.

Una considerable corriente fluirá en los electrodos.

Como la placa conductora tiene un espesor extremadamente fino, la densidad de corriente resultante es muy alta.

El conductor se fundirá y el metal se evaporará, con el resultado que la falla es automáticamente interrumpida y aislada.

Esto significa que una autorreparación ha tenido lugar y el capacitor puede reiniciar su trabajo normal.

La figura 2.7 nos muestra una falla en las placas del capacitor, así como la evaporación de la capa delgada de metal y su autorreparación.

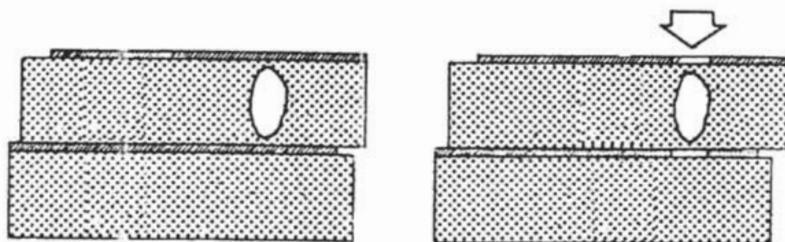


Fig. 2.7 Principio de autorreparación

La perforación hecha en el dieléctrico es muy pequeña del orden de un micrón y el área desmetalizada por el proceso de autorreparación es de unos pocos milímetros de diámetro (ver figuras 2.8 y 2.9).

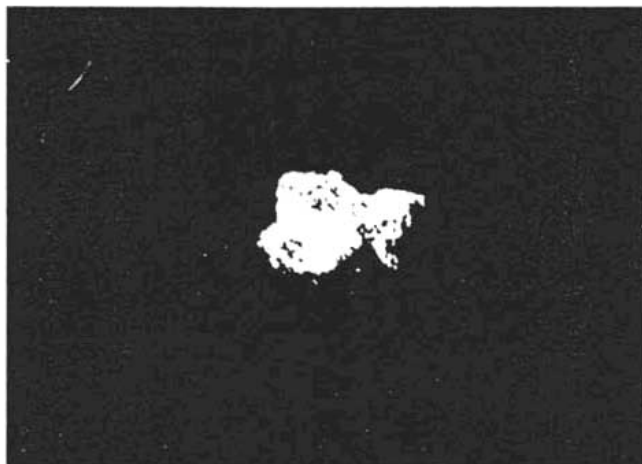


Fig.2.8. Fotografía mostrando una falta autorreparada (aumenta 10 veces)



Fig. 2.9. Fotografía del centro del área autorreparada (aumentada 15, 000 veces)

2.2.5 DESMETALIZACIÓN

Una cierta cantidad de metal se evapora durante la autorreparación, reduciendo así el área de electrodos lo cual automáticamente resulta en una caída en capacidad.

El envejecimiento de la película genera también autorreparaciones las cuales son un fenómeno presente durante la vida entera del capacitor.

La capacidad del elemento será así disminuida de acuerdo al tiempo que esté en servicio. Este fenómeno es afectado por la temperatura, voltajes e impulsos transitorios.

La reducción en la capacidad es mínima cuando la construcción es satisfactoria.

2.2.6 PÉRDIDAS

Los capacitores causan pérdidas, como todo aparato eléctrico.

Las pérdidas son expresadas en términos de valor de $\text{tg } \delta$.

La siguiente fórmula es usada para calcular las pérdidas en un capacitor.

$$\lambda \text{ ó } p = \omega C V^2 \times \text{tg } \delta \dots\dots\dots(19)$$

en donde:

$\lambda \text{ ó } p$ = pérdidas en watts

$\omega = 2\pi f$

C = capacidad en faradios

V = tensión en volts

$\text{tg } \delta$ = factor de pérdidas

Note que ωCV^2 representa la potencia reactiva del capacitor, las pérdidas pueden también calcularse usando:

$$p=Q \operatorname{tg} \delta \dots\dots\dots(20)$$

En donde:

λ ó p = pérdidas en watts

Q = potencia del capacitor en Var.

$\operatorname{tg} \delta$ = factor de pérdidas

Las pérdidas provienen de:

- A) El dieléctrico: partículas ionizadas (+) o (-), o dipolos (+-) que existen en el dieléctrico. El campo eléctrico alterno causa que esas partículas se muevan y la fricción a la que ellas están sujetas causan calentamiento y por consecuencia pérdidas de energía. Las pérdidas en el polipropileno son 1/10 de aquellas que hay en papel y no son influenciadas por el voltaje ni por la frecuencia.

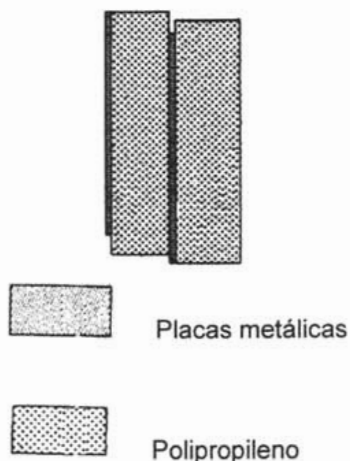


Fig. 2.10. Capacitor de plástico metalizado.

B) Placas conductoras o armaduras. Las pérdidas resultan de la resistencia de las placas metálicas o armaduras. El ángulo de pérdidas se estima 3×10^{-4} en temperatura de trabajo normal. Consideremos un ejemplo de lo que este valor representa.

Tomemos un capacitor de $66 \mu f$ a 400 volts y 50 Hz.

$$\text{Potencia del capacitor} = 3.14 \times 66 \times 10^{-6} \times 400^2 = 3.315 \text{ kVAR}$$

$$\text{Pérdidas} = 3.3 \times 10^3 \times 3.0 \times 10^{-4} = 1 \text{ watts } (\lambda = Q \times \text{tg } \delta)$$

En otras palabras = 99.97% de eficiencia.

NOTA: En un capacitor completo no olvide sumar pérdidas por fuera del elemento mismo.

Por ejemplo:

- Pérdidas en los contactores (bobinas y contactos)
- Fusibles y porta fusibles
- Cables
- Caja de conexiones.

2.2.7 OTROS DISEÑOS.

Mientras tengamos en mente el principio del capacitor autorreparado en el cual las placas son extremadamente delgadas, existirán diferentes tipos de construcción en el mercado.

a) Capacitor Impregnado.

Con el fin de facilitar el uso de un desconector al final de la vida de trabajo, algunos fabricantes colocan la bobina en un recipiente sellado herméticamente, el espacio entre la bobina y el contenedor es llenado con aceite impregnante (ver figura 2.11).

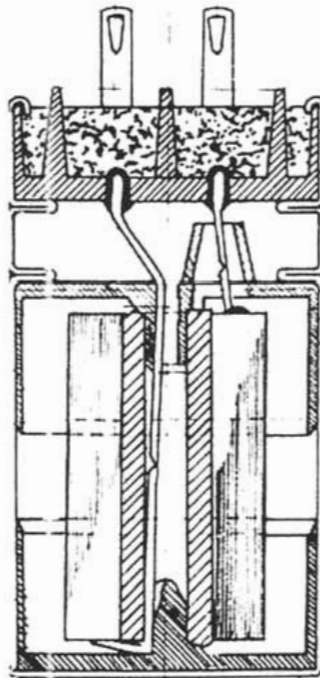


Fig. 2.11. Capacitor con aceite.

- Existe una posibilidad que la fuga pueda ocurrir debido al pobre sellado o a través de una perforación causada por un daño mecánico o por oxidación (ver figura 2.12). Tal fuga hará imposible continuar usando el capacitor y al final de su vida de trabajo no será seguro su uso.

- Riesgos de una combustión elevada.

El capacitor "SECO" no tiene estas fallas.



Fig 2.12. Podemos trabajar sin fugas

b) Dieléctrico de papel (figura 2.13)

Un capacitor metalizado que usa un papel dieléctrico tiene las dos siguientes desventajas.

- Pérdidas ($\text{tg } \delta$) cerca de 10 veces más grandes que con polipropileno.

- Requiere un capacitor impregnado la cual es una técnica antigua.



Fig 2.13 Capacitor con dieléctrico de papel

c) Dieléctrico combinado (figura 2.14).

El dieléctrico está con doble espesor. Una hoja de plástico (polipropileno) y una hoja de papel.

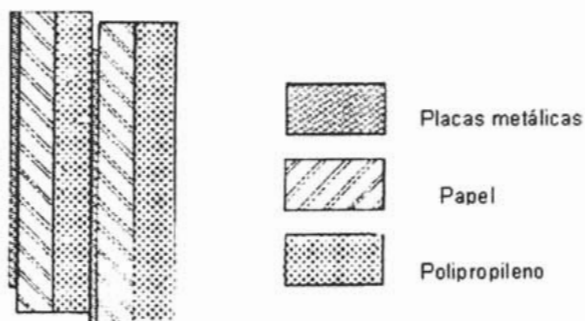


Fig. 2.14. Capacitor con dieléctrico combinado

d) Placa de papel metalizado (figura 2.15).

El polipropileno es el dieléctrico y la placa o armadura, es papel metalizado en ambos lados, la cual no actúa como dieléctrico.

Esta es una construcción de bajo voltaje muy cara, ya que el capacitor debe ser impregnado.

Sin embargo, facilita una técnica de metalizado para alcanzar voltajes nominales mas altos del elemento.

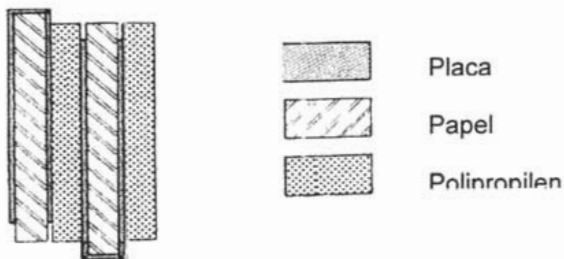


Fig. 2.15. Capacitor con armadura metalizada doble.

2.3 TRANSITORIOS DE CONMUTACIÓN

2.3.1. PRINCIPIOS

En un capacitor la corriente y el voltaje están en de fase, esto significa que cuando un capacitor es energizado en la red, un fenómeno transitorio aparecerá. Este fenómeno transitorio resultará en un considerable aumento en la corriente de

energización, este aumento alcanzará un valor máximo cuando la conmutación sea hecha en el voltaje máximo.

El circuito puede ser representado por un generador, un capacitor, una inductancia (reactancia de cables y barras de distribución), y una resistencia (cables, fusibles y contactos) tal como se muestra en la figura 2.16.

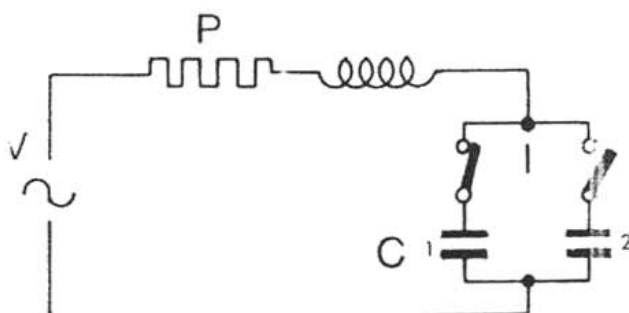


Fig. 2.16 Circuito básico

En la práctica la resistencia del circuito es muy pequeña, tanto como:

$$\rho = 2 \cdot \frac{\lambda}{C} \dots\dots\dots(21)$$

Por lo tanto el transistororio es oscilatorio (ver figura 2.17 y 2.18).

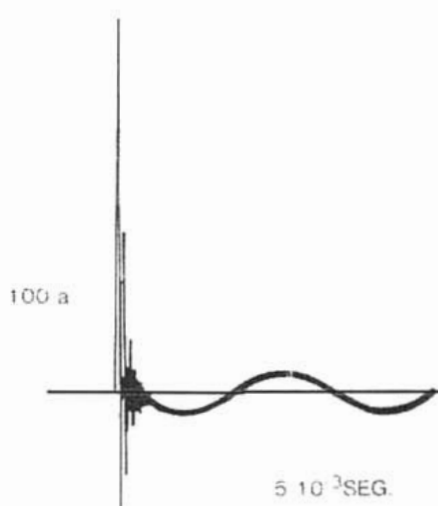


Fig. 2.17 Registro oscilográfico mostrando la conmutación de un capacitor de 10 Kvar a 400 V usando un contador EH22.

La fórmula de onda de corriente es oscilatoria y la frecuencia (f_0) está dada por:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{\lambda C} - \frac{\rho^2}{4L^2}} \dots\dots\dots(22)$$

Sin considerar la reducción de la frecuencia bajo la influencia de la resistencia, obtenemos:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \lambda C} \dots\dots\dots(23)$$

La amplitud de corriente disminuirá exponencialmente con una constante de tiempo.

$$\tau = \frac{2\lambda}{\rho} \dots\dots\dots(24)$$

La corriente transitoria varía de acuerdo a la fórmula:

$$i = I \frac{\omega_0}{\omega} e^{-\frac{t}{\tau}} \dots\dots\dots(25)$$

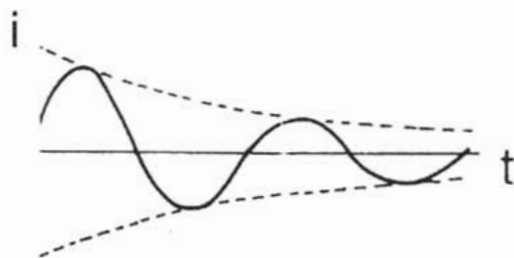


Fig. 2.18. Transitorio oscilatorio amortiguado.

Si la disminución en la corriente durante el primer cuarto del periodo no es considerada, obtenemos para la corriente pico.

$$i = I \frac{\omega_0}{\omega} \dots\dots\dots(26)$$

2.3.2 EXPERIMENTOS PRÁCTICOS

El valor de la frecuencia resonante puede ser determinado usualmente con un osciloscopio (nota: se debe usar una conexión inductiva en paralelo). Es sin embargo, muy difícil de registrar la máxima corriente pico. Ya que el instante de energización será aleatorio con respecto al ángulo de fase de voltaje (debemos considerar el pico de corriente obtenido cuando el voltaje está en su valor máximo durante el período).

En experimentos prácticos cuando se energiza un capacitor en la red, se registran frecuencias transitorias de 1700 Hz y la corriente es 34 veces el valor nominal.

La corriente máxima de pico está dada en este caso por:

$$I_{max} = \frac{P}{\sqrt{3}V} \times \sqrt{2} \times \frac{f_0}{50} \dots\dots\dots(27)$$

Donde:

I_{max} : Corriente a 50 Hz

$\frac{P}{\sqrt{3}V}$: Valor Pico

$\sqrt{2} \times \frac{f_0}{50}$: Corriente en función de la frecuencia

$$I_{max} = 700A$$

$$\tau = 7.10^{-4} \text{ segundos (medidos)}$$

El ejemplo que consideraremos se refiere a la energización de un capacitor en la red. En bancos automáticos, por lo tanto, y donde al menos un paso es conectado antes, es importante recordar que la impedancia instantánea de la fuente (generador),

será mucho mayor. De hecho, el primer capacitor conectado antes, puede descargarse a través de las conexiones de los siguientes pasos. Esto significa que la resistencia y la inductancia del circuito serán muy bajas.

Consideremos el ejemplo previo de nuevo, pero con un capacitor de 20 kVAR conectado previamente. En este caso una frecuencia transitoria de 14000 Hz ha sido registrada es decir, 8 veces más alta que cuando conectamos a la red.

La corriente de pico aumentará de acuerdo y aproximadamente a un valor cercano a los 6000 A (con $\tau = 9 \times 10^{-5}$ seg.).

Esta corriente puede incrementarse aún más si durante la conmutación repetida el capacitor no está cargado completamente. En el peor de los casos, la corriente puede duplicarse.

No es siempre práctico proteger un capacitor de una conexión y una rápida reconexión a la red. En la práctica esta situación puede ocurrir en cualquier lugar con un capacitor conectado a la red.

Con el capacitor de nuestro ejemplo la corriente máxima puede ser de 1400 A.

En bancos automáticos de capacitores por el contrario, es posible tener muy rápidas desconexiones y reconexiones de los pasos del capacitor.

En este caso una duplicación de la corriente dará enormes valores, esto puede evitarse ajustando el regulador de VAR's para dar un retardo de tiempo entre la desconexión y la reconexión.

Con los resultados obtenidos en la sección anterior, ahora es posible determinar la impedancia y así la potencia instantánea en la red.

Conexión de un capacitor en la red.

$$\text{Valor de la inductancia: } \lambda = \frac{1}{(6.28 \times 1700)^2 (200)(10^{-6})} = 44 \mu H_y$$

$$\text{Valor de la resistencia: } P = \frac{2 \times 44 \times 10^{-6}}{7 \times 10^{-4}} = 0.13 \Omega$$

La impedancia de la inductancia es casi despreciable; la corriente de corto circuito de la red, en este punto, está dada por:

$$\frac{400}{0.22} = 1.818 \text{ A (RMS)}$$

La corriente que fluye a través del capacitor corresponde al 40% de tal corriente.

Conectándose con un capacitor previamente conectado a la red (20 kVAR)

Valor de la inductancia

$$\lambda = \frac{1}{[(6.28)(14.00)]^2 (133)10^{-6}} = 1 \mu H_y$$

La impedancia inductiva es casi despreciable y el valor de la corriente de corto circuito instantáneo es igual a 10 kA (RMS), la cual corresponde otra vez a la mencionada arriba.

2.4 DISPOSITIVOS DE DESCARGA

2.4.1. PROPOSITO.

Cuando un capacitor es desconectado de la red, éste permanece cargado. Debido a sus excelentes propiedades de aislamiento, esta carga permanecerá atrapada por un largo tiempo después de la desconexión. Hay un riesgo sustancial de una descarga eléctrica.

Esta es la razón de que en diferentes normas nacionales e internacionales haya reglamentaciones de por qué un capacitor debe estar provisto con un dispositivo de descarga adecuado. La sección apropiada de la publicación 70 del IEC (1967) se explica a continuación.

Cada capacitor será provisto con un dispositivo de descarga conectado directamente. a menos que esté conectado directamente a otro equipo eléctrico proporcionando un camino de descarga sin tener el interruptor desconectado, corte de fusibles o capacitores en serie interpuestos.

El dispositivo de descarga, reducirá el voltaje residual del valor de cresta del voltaje nominal V_n a 50 V ó menos, en un tiempo dado después de que el capacitor sea desconectado de la fuente de alimentación. Este tiempo es 1 minuto para capacitores con voltaje nominal hasta 600 Volts, y 5 minutos para capacitores de voltajes nominales arriba de los 660 V.

NOTA: Cuando los capacitores están conectados en serie, el dispositivo de descarga instalado en cada unidad, puede no ser adecuado para cumplir con esta cláusula por el efecto acumulativo de voltajes residuales.

Si la fuente de voltaje es tan alta que esto ocurre, entonces será necesario un dispositivo de descarga extremo adicional y debe estar directamente conectado al banco de capacitores.

Como los capacitores pueden ser conectados o desconectados en intervalos muy cortos, se harán arreglos de tal modo que el momento de reaplicación de voltaje, el voltaje en las terminales de capacitor no será mayor al 10% de voltaje nominal RMS.

Un dispositivo de descarga no es un sustituto para corto circuitar las terminales juntas del capacitor, y para aterrizar éste antes del manejo manual.

NOTA: Una carga residual, algunas veces puede estar en las interconexiones de los capacitores conectados en series debido a fusibles fundidos, en conexiones internas interrumpidas, o debido a un comportamiento no lineal del dieléctrico resultado de las sobretensiones. Estas interconexiones deben ser por lo tanto, cortocircuitadas a tierra antes de la manipulación.

2.4.2 DECARGA DE UN CAPACITOR.

El voltaje sobre las terminales de un capacitor se descarga a través de una resistencia y disminuye exponencialmente con el tiempo (ver figura 2.19).

Matemáticamente, la expresión de esta disminución esta dada por:

$$V_f = V_o e^{(-t/RC)} \dots\dots\dots (28)$$

En donde: V_f = Voltaje sobre las terminales en el tiempo t .

V_o = Voltaje en el instante de desconexión ($t=0$)

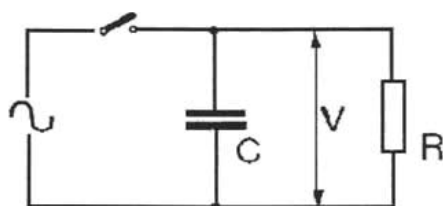


Fig. 2.19 Circuito de descarga

2.4.3. VALOR DE RESISTENCIA.

Para incluir el efecto de la tolerancia en los valores de voltaje y resistencia, el voltaje nominal debe aumentarse en un 10%.

Aplicando la fórmula de la sección 2 y las regulaciones del IEC, publicación 70, obtenemos:

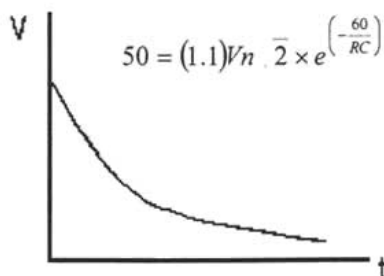


Fig. 2.20 Máxima disminución de voltaje de 50 V después de 1 minuto.

La fórmula da el producto de la resistencia y la capacitancia como una función de voltaje:

230 V	RC = 30.5	500 V	RC = 21.9
400 V	RC = 23.8	600 V	RC = 20.5
415 V	RC = 23.5	660 V	RC = 19.9
480 V	RC = 22.2		

Con C expresada en μfd R será expresado en Mohm.

Ejemplo: Suponga que necesitamos determinar la resistencia por fase para un capacitor trifásico, de 43 kVAR/415 V/50 Hz.

Cálculo de C por fase:

$$Q = 3WCV^2 \dots\dots\dots(29)$$

$$C = \frac{Q}{3\omega V^2} = \frac{43,000}{3 \times 2 \times 3.14 \times 50 \times 415^2}$$

$$C = 265 \mu\text{fd}$$

$$R = \frac{23.5}{265} = \text{Max.} 0.089 \text{ M}\Omega \text{ ó } 89 \text{ K}\Omega$$

NOTA: Si la tolerancia de la resistencia es del 10% el valor máximo de la resistencia de descarga en nuestro ejemplo debe ser $89 \times 0.9 = 80.1 \text{ k}\Omega$.

Hemos visto que es lo más común usar una resistencia por fase, por ejemplo tres resistencias en una unidad trifásica.

Sin embargo, para simplificar las conexiones internas en una unidad, es algunas veces ventajoso usar solo dos en lugar de tres resistencias para estimar el valor de la resistencia, escogemos como valor de capacidad tres veces la capacidad por fase. En otras palabras, el valor de la resistencia cuando usamos dos resistencias debe ser 1/3 de aquel cuando usamos tres.

Potencia de las resistencias.

En el campo habrá pérdidas óhmicas en las resistencias de descarga. Cuando calculamos la potencia de la resistencia es necesario considerar las fluctuaciones normales del voltaje en el voltaje de la red.

La potencia disipada es igual a:

$$P = \frac{(V \times 1.1)^2}{R} \dots\dots\dots(30)$$

En donde: P = Potencia en Watts (W)

V = Voltaje en la red (V)

R = Resistencia ($Ohms$)

La relación de la resistencia para el capacitor en el ejemplo anterior deber ser:

$$P = \frac{(415 \times 1.1)^2}{89,000} = 2.3 W$$

2.4.4. DESCARGAS RÁPIDAS DE BANCOS AUTOMÁTICOS

En un banco automático, los capacitores son conectados y desconectados regularmente. Los intervalos entre esas operaciones son una función de las características del regulador de VAR.

Usualmente este tiempo es muy corto, del orden de los 12 seg. o algo así.

Para evitar conectar los capacitores aun cargados, lo cual puede causar muy altas corrientes transitorias⁽⁴⁾, es común equipar los bancos automáticos con resistencias para descarga rápida.

Para hacer esto, se pueden usar los dos contactos auxiliares (normalmente cerrados) del contactor. Con estos contactos auxiliares es posible conectar dos resistencias de descarga a través del capacitor cuando se desconecta el voltaje (ver figura 2.21).

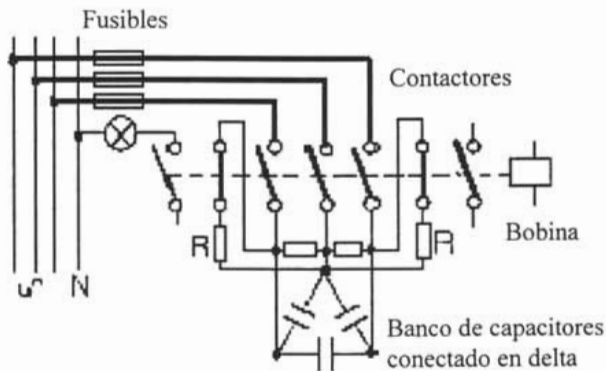


Fig. 2.21 Conexión de resistencia de descarga rápida

⁽⁴⁾ Las corrientes transitorias son corrientes que sobrepasan los valores nominales de los equipos energizar o desenergizar dicho equipo, por un tiempo muy corto, por lo que estas se tratan de eliminar para evitar dañar el equipo en cuestión.

Estas resistencias se deben diseñar para dar la descarga deseada en máximo 20 seg. Teniendo en mente que hay solo dos resistencias, obtenemos:

$$230V \quad RC=4$$

$$400 V \quad RC = 3.1$$

$$415 V \quad RC = 3$$

$$480 V \quad RC = 2.9$$

$$500 V \quad RC = 2.8$$

$$660 V \quad RC = 2.5$$

En donde C es la capacitancia de fase.

En relación a la potencia nominal de estas resistencias, es común seleccionar un valor cerca de la mitad del usado para una resistencia conectada permanentemente para las resistencias que nunca están energizadas. Ellas sólo disiparán la energía de descarga de los capacitores.

2.4.5. DESCARGA POR BOBINA DE INDUCCION.

Algunas veces, es necesario obtener una descarga muy rápida, sin necesidad de usar contactos auxiliares.

Por lo tanto, se debe colocar una fuerte impedancia en CA (para consumo bajo) y una resistencia débil en CD (para descarga rápida) en las terminales del capacitor.

Esto es una bobina de inducción, la cual puede estar constituida por el circuito primario de un pequeño transformador, con el secundario sin carga. Hay también inductancias fabricadas especialmente en el mercado. Debe tenerse cuidado de asegurar que la energía disipada por los ciclos de descarga del capacitor sea menor que la disipación térmica de la propia inductancia.

2.4.5.1 PRUEBAS DE FABRICACION

Para los que no son especialistas, la fabricación de capacitores involucro solamente placas y dieléctricos que juntos forman una bobina. Muchas firmas se iniciaron haciendo justamente esto, y aún ahora lo continúan haciendo. Pero los especialistas, por otro lado, saben lo difícil que es hacer buenos capacitores.

Desde que aparecieron las películas de polipropileno de unos micrones de espesor y sobre las cuales se pueden obtener recubrimientos metálicos del orden de 1 /1 00 de micrón, con gradientes de trabajo de 50 a 70 kV por mm., el problema de la fabricación de capacitores es aún más delicado que en el pasado.

La fabricación es una cuestión de saber cómo, de cuidados y de respetar un gran número de puntos claves, todos muy importantes.

La fabricación empieza con la película de polipropileno, cuya calidad verificada (espesor, partículas conductoras, balance catalizador, etc.) y aptitud para la metalización son dos factores determinantes.

La metalización es de primordial importancia, ya que cualquier irregularidad con áreas más gruesas, redundará en una pobre "autoregeneración" en los capacitores terminados. En el caso opuesto, puede haber reducción anormal de capacidad cuando

esté en servicio. Esta es la razón del por qué algunos fabricantes metalizan sus películas ellos mismos, en anchos grandes.

En la figura 2.22 y 2.23 se muestra, respectivamente, un esquema y unas fotografías de una maquina metalizadora.

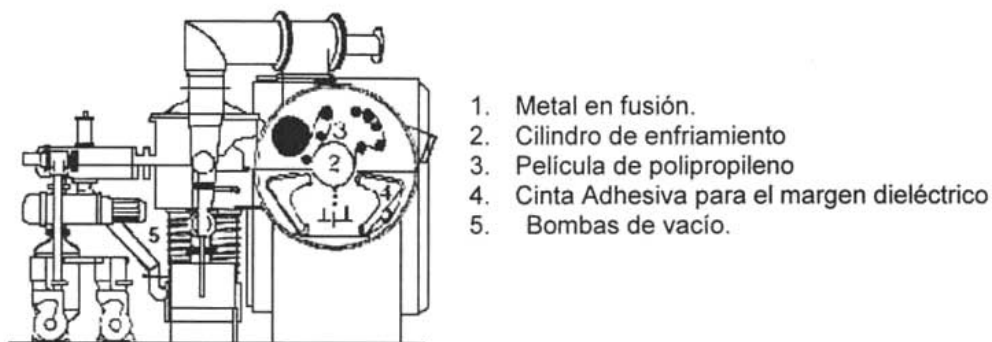


Fig. 2.22 Máquina Metalizadora

En las técnicas de fabricación de capacitores metalizados, se utilizan generalmente dos clases de metal: Aluminio o Zinc. Algunos fabricantes prefieren usar el zinc porque éste tiene gran resistencia a la desmetalización (pérdida de capacidad con el tiempo) comparada con el aluminio.

La primer área de trabajo con atmósfera controlada es aquella donde se realiza el corte.

Las partículas de polvo son enormes comparadas con el espesor del dieléctrico usado, por lo tanto, son necesarios filtros absolutos.

El corte debe ser limpio y regular (Hecho con una navaja de afeitar).

La película es almacenada en vacío después del corte, protegida del polvo y la humedad.



Fig. 2.23 Máquina Metalizadora. Vistas externa e interna.

El segundo lugar de trabajo con ambiente controlado se usa para el embobinado. El polvo, la humedad y temperatura están controladas. El embobinado también requiere máquinas adaptadas especialmente a la tecnología de polipropileno metalizado delgado, las cuales deben garantizar una reproducción real y automática de todos aquellos parámetros seleccionados inicialmente (tensión de la película, velocidad de aceleración, velocidad de desaceleración, sobreflujo, empaque de protección, etc.). En la figura 2.24 observamos una fotografía de una máquina bobinadora. Un embobinado mal ejecutado puede ocasionar una desmetalización excesiva y dificultades de rociado, lo cual en muchas ocasiones, resultará en una disminución de la vida esperada.

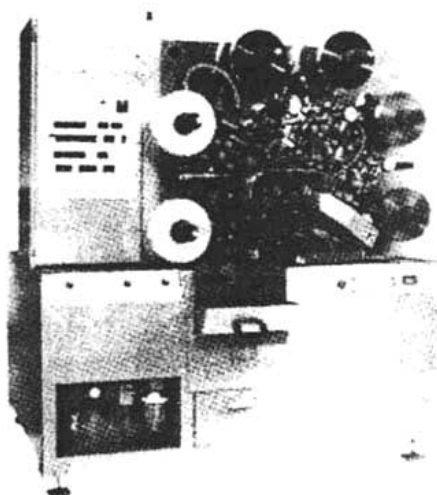


Fig. 2.24. Máquina Bobinadora.

Veamos ahora la operación de rociado. Esta consiste de un rociado de Zinc (o una aleación conteniendo estaño) en fusión sobre los extremos metalizados de la película. Es aquí donde estará un buen contacto entre la placa metalizado y el circuito externo. Muchos parámetros están involucrados a fin de obtener un contacto óptimo, y estos son particulares para una instalación dada. La fusión, velocidad del aire, distancia, forma del circuito de succión, etc. cuando esos elementos han sido determinados, deben de permanecer fijos a fin de garantizar una reproducción correcta (ver figuras 2.25 y 2.26). Esta operación puede parecer simple, pero se considera como muy delicada, aún imposible, sin una máquina altamente sofisticada y controlada automáticamente.

Uno debe cambiar los ajustes, de acuerdo a la geometría de las bobinas del capacitor.

En esta etapa, la bobina del primitivo capacitor de potencia, debe ser tratada de nuevo, para eliminar posibles puntos débiles por medio de la autoregeneración de energía controlada. Finalmente, dos operaciones importantes que en seguida se explican, son llevadas a cabo:

- 1.- Tratamiento térmico de las bobinas para eliminar toda la humedad y para comprimir la película lo más apretada posible sobre sí misma.
- 2.- Colocación en un recipiente sellado para evitar contacto con la atmósfera. El recipiente es llenado con una resina termo fija.

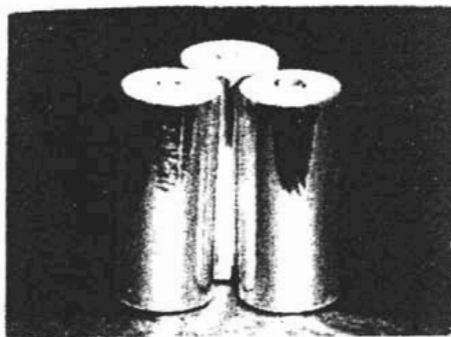


Fig. 2.25. Bobinas Rociadas.

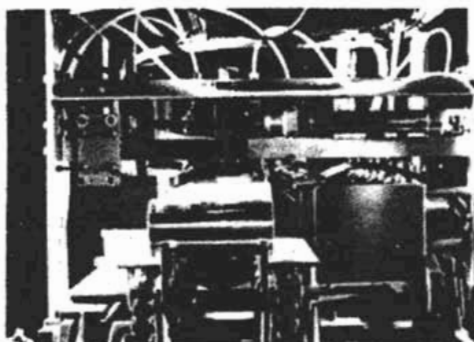


Fig. 2.26. Línea de formación y prueba

El capacitor elemental de potencia (CEP) en esta etapa, forma la base de fabricación de la unidad completa. Completamos la fabricación de nuestro capacitor colocando los elementos en un contenedor metálico y agregando dos elementos:

1.- Los espaciadores-enfriadores los cuales reducen la temperatura de los capacitores. Esos enfriadores también sirven para prevenir que una unidad defectuosa caliente a las unidades próximas a ella. También proporciona espacios libres para el llenado con, un producto compresible, no combustible, el cual tiene propiedades de aislamiento eléctrico excelente, "vermiculita" (construcción protegida por patente). Este producto llena los espacios libres entre las unidades elementales que en el caso de falla en el elemento, la vermiculita neutraliza el riesgo de una explosión o de fuego en el contenedor y por lo tanto es una medida de seguridad.

Los fabricantes de capacitores y usuarios saben que un número importante de factores influyen en la calidad del producto. Inicialmente la verificación de la materia prima (pruebas de aceptación y chequeo de la película, fluido de impregnación, etc.). Después, es la inspección del proceso, o sea, con respecto a la especificación de fabricación (chequeo de la etapa, tensión de la película, temperatura de tratamiento,

etc.). El equipo debe también ser inspeccionado: Normas de prueba, dispositivos de prueba automática, limpieza, etc.

Normas nacionales e internacionales definen las pruebas que se deben hacer en elementos o unidades (una unidad se define como un ensamble de elementos capacitores).

Las pruebas dadas a continuación están tomadas del reporte No. 33 del Comité Electrotécnico Internacional fechado en Abril de 1984; y son los siguientes:

- a) Pruebas individuales. Estas deben ser llevadas a cabo por el fabricante en cada capacitor antes de surtirlo.
- Medición de la capacidad y cálculo de la potencia.
La capacidad no debe desviarse de la capacidad nominal en más de - 5 a + 15% para potencias hasta 100 kVAR y de 0 a + 10% para valores de potencia mayores.
 - Medición de la tangente delta.
Esta no debe exceder el valor especificado por el fabricante. Las pérdidas indicadas deben incluir el total de pérdidas de los dieléctricos, placas, fusibles, resistencias de descarga, conexiones, etc.
 - Rigidez dieléctrica en C.A.
El capacitor debe ser probado con un $1.75 V_n$ con una fuente de C.A. por 2 segundos (la tendencia es regresar al valor de $2.15 V_n$, prescrito en la publicación IEC-70).
No debe haber perforación permanente o deformación.
 - Prueba de aislamiento.

Un voltaje de 3 kV es aplicado entre las terminales interconectadas y el recipiente durante 10 segundos, o 3.6 kV durante 2 segundos.

No debe haber perforación o deformación.

- Prueba del dispositivo de descarga.
Este debe ser verificado, midiendo la resistencia o midiendo el tiempo de descarga.
- Prueba de hermeticidad.
Esta prueba puede ser omitida (como en nuestro caso), el capacitor no contiene materiales líquidos.

Existen otras pruebas requeridas como "pruebas tipo". Los títulos se dan a continuación:

- Prueba de estabilidad térmica.
- Medición de $\tan \delta$ a temperaturas altas.
- Prueba de rigidez dieléctrica con una fuente de C.A. (Prueba de aislamiento entre terminales).
- Prueba de impulso de rayo.
- Prueba de descarga en corto circuito. (Prueba de autoreparación).
- Prueba de envejecimiento.
- Prueba destructivo.

Mientras que la mayoría de estas pruebas son ahora clásicas, las dos últimas de la lista han sido objeto de discusiones internacionales por muchos años.

Algunos fabricantes consideran esas dos pruebas extremadamente importantes y van más allá de los requerimientos de norma llevando a cabo las siguientes pruebas suplementarias:

Pruebas de resistencia o aguante a las corrientes transitorias de energización; (realizadas individualmente en nuestra planta al 100%, sobre cada elemento capacitor terminado).

Las mediciones son hechas considerando la capacidad del elemento capacitor para resistir picos de varios miles de amperes aplicados cientos de veces. El valor de la corriente de pico está determinado considerado el caso práctico menos favorable. El elemento es rechazado si muestra una ligera falla en esta prueba.

2.4.5.2 PRUEBAS DESTRUCTIVAS.

El fin del ciclo de vida es simulado por una aceleración del proceso de destrucción, un tercio de la potencia nominal es hecha fallar. El capacitor es entonces conectado a una red de alimentación de alta potencia (una potencia de 16 MVA de corto circuito) protegida con fusibles de 400 Amps. En ningún caso el recipiente debe romperse, ni puede haber inicio de fuego o partículas encendidas.

Esta es una prueba tipo, pero debe llevarse a cabo periódicamente.

El problema de la seguridad al final del ciclo de vida es particularmente serio en el caso de capacitores con dieléctrico metalizado. Se ha hecho un gran esfuerzo para crear una prueba que represente el final de la vida de trabajo del capacitor.

**ESTA TESIS NO SALI
DE LA BIBLIOTECA**

2.4.5.3. PROYECTO IEC. Reporte No. 33 del Comité de Estudio.

Un documento preliminar fue publicado en abril de 1984. La prueba se puede resumir como sigue:

La prueba será realizada entre las dos terminales de un capacitor unitario (comprendiendo uno o más elementos) sin resistencia de descarga. El principio es hacer fallar los elementos con aplicación de corriente directa y entonces checar el comportamiento del capacitor bajo corriente alterna (ver figura 2.27).

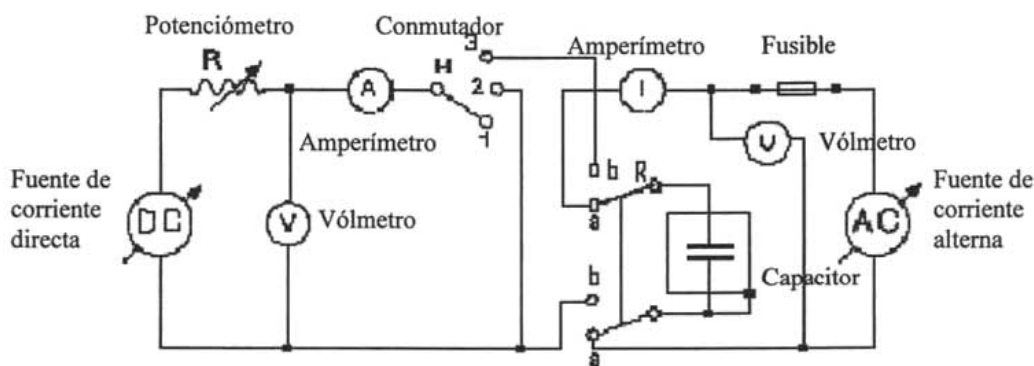


Fig. 2.27. Diagrama de la prueba destructiva.

El capacitor será llevado a la máxima temperatura aplicable para su categoría.

El capacitor se deberá perforar a $V_t = 10 V_n$ de corriente directa a 300 mA. El capacitor será entonces conectado a una fuente de C.A. de $V = 1.3 V_n$, siendo la corriente de corto circuito de 2000 A, por un período de 3 minutos. La prueba será repetida hasta que 1/3 de los elementos hayan sido destruidos.

Siguiendo esas pruebas, el recipiente debe estar intacto, puede estar deformado pero no dañado, y no debe haber ninguna fuga de fluido. El aislamiento entre las terminales y el contenedor debe ser mayor que 1 500 V en C.A.

2.4.5.4. NORMA USA-UL 810 - NOVIEMBRE DE 1984



El capacitor será cortocircuitado en C.D. de acuerdo al método IEC, pero debe ser llevado a 100°C. Después de esta prueba, el capacitor estará en cortocircuito pero no desconectado.

Entonces, se aplicará una corriente en C.A. de amplitud constante, la prueba será realizada a voltaje nominal y a diferentes valores de cortocircuito de la fuente de corriente (2.5, 5, 10, 30, 60, 100, 500, 10,000 A). El factor de potencia del circuito será cercano a la unidad. Por cada valor de I (los valores mínimo/máximo serán escogidos por el fabricante), se probarán tres capacitores con dimensión mínima y 3 con dimensión máxima. Cuando la corriente se cancele, se aplicará el voltaje por 5 minutos. Si alguna cosa sucede, el voltaje será aplicado por 2 horas.

Después de las pruebas:

- Rigidez entre terminales y contenedor a $1000V+2V_n$, 1 minuto.
- Rigidez entre terminales a 1.5 el voltaje nominal (V_n).
- Sin fuego, fuga de líquido o ruptura del recipiente.
- U.L.: Underwriters Laboratories Inc.

2.4.5.5. CANADÁ CSA-C22,2 N° 190. M-1985

Esta es prácticamente equivalente a la prueba IEC temperatura de prueba: 46°C.

2.4.5.6. JAPON JIS C4908

El capacitor será destruido por la aplicación de un voltaje entre 1.6 y 2 veces el valor nominal durante 8 horas a una temperatura nominal máxima del capacitor.

Esto corresponde a la antigua publicación IEC 566 (capacitores para iluminación).

2.4.5.7.OTRAS PRUEBAS.

Ciertas pruebas fragmentadas están en existencia.

2.5. DISEÑO CON DIELECTRICO COMBINADO

El dieléctrico combinado fue previamente usado para todos los tipos de capacitores de potencia, pero ahora este diseño es principalmente usado en aplicaciones de voltaje medio y alto.

Dos métodos principales son ahora de uso común para la protección de unidades de capacitores individuales (ver figura 2.28).

a) Fusibles internos:

El capacitor, puede ser hecho sin fusibles, con fusibles internos o externos, pero de cualquier manera es construido de un gran número de elementos capacitores (bobinas). En un capacitor protegido internamente cada uno de los elementos capacitores está equipado con su fusible por cada elemento, sólo este elemento se desconecta por el fusible y la reducción en la potencia de la unidad capacitadora es muy pequeña.

b) Fusible externo:

Cuando un fusible externo opera, desconecta la unidad completa a la cual fue conectado.

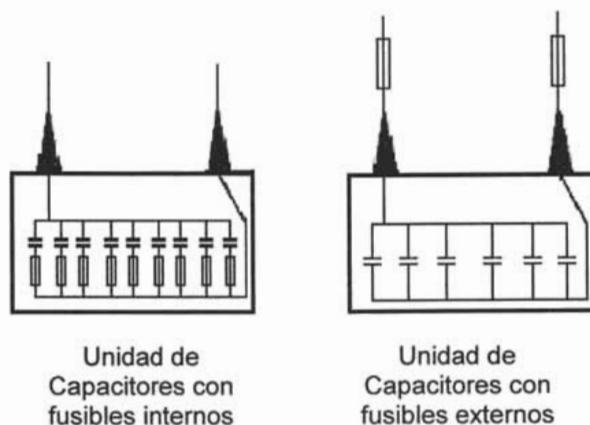


Fig. 2.28 Protección por medio de fusibles.

Los fabricantes han estado usando capacitores en baja tensión con fusibles internos, por más de 40 años. Desde los años cincuentas los usaron para capacitores de voltaje medio y alto.

Entre las diferentes ventajas y características de los fusibles internos, se debe puntualizar lo siguiente:

- Desconexión instantánea de los elementos del capacitor fallado.

Una falla en un elemento capacitor ocurrirá prácticamente siempre cerca de una cresta del voltaje. La operación del fusible será entonces muy rápida debido a la descarga de la energía almacenada en los elementos paralelos, la desconexión del elemento fallado es asegurada y la operación normal de la unidad capacitadora restaurada en milisegundos.

- Reducción despreciable en la salida de potencia.

Después de la desconexión de un elemento fallado por su fusible, la unidad capacitadora permanece en servicio y continuará entregando potencia reactiva con una reducción de nivel sin importancia (la disminución es del orden de un pequeño porcentaje) debido a la gran cantidad de elementos. Cuando un fusible externo opera, la unidad capacitadora completa es desconectada.

- Ningún fuego en el bote.

El fuego en el bote es generalmente causado por la expansión por sobrepresión, debido a los gases desprendidos en el arco. La probabilidad de ruptura del bote es mostrada en las curvas NEMA. Con la desconexión instantánea de los elementos fallados, obtenida con los fusibles internos, ningún arqueo interno será prolongado dentro de la unidad capacitadora, eliminando así el riesgo de fuego en el recipiente.

- Unidades capacitadoras más grandes.

El fusible interno del elemento desconecta una muy pequeña parte de una unidad capacitadora y la operación puede continuar sin interrupciones. No hay por lo tanto, límite para el tamaño o la potencia de las unidades capacitadoras. Esto simplifica y permite el tamaño de la unidad más económica a ser elegida para cada aplicación.

A = Zona de seguridad
 B = Zona de Riesgo
 C = Zona de operación de Fusibles interno

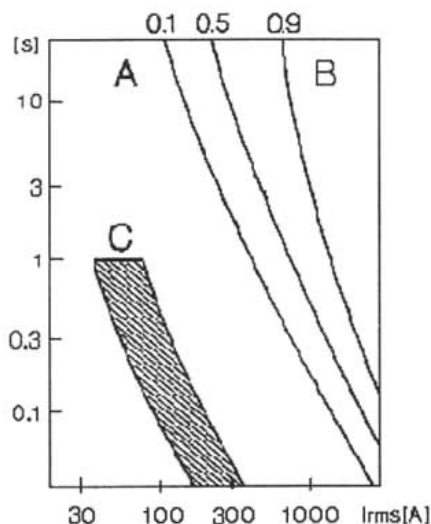


Fig. 2.29. Curvas de la ruptura del bote para los capacitores de acuerdo a los estándares NEMA(National Equipment Manufactured Asociation).

2.6. CAPACITORES CON DIELECTRICO METALIZADO

Este tipo de capacitor con dieléctrico metalizado es usado inicialmente para unidades de bajo voltaje.

2.6.1. CAPACITORES CON DIELECTRICO METALIZADO

Desde el punto de vista de la protección, existe una gran diferencia entre los dos tipos de capacitores y ésta se encuentra en el espesor de las placas. En los capacitores con dieléctrico combinado, las placas son hojas de aluminio de un espesor de alrededor de 5 μm . En un capacitor con dieléctrico metalizado por otro lado, el espesor de las placas es del orden de 0.01 μm . La resistencia eléctrica del electrodo es por lo tanto, significativamente más alta. Siguiendo un análisis y dependiendo del número de capas de película involucrada, la resistencia eléctrica variará en un rango grande. En la práctica, se han medido valores entre unas pocas décimas de ohm y cercanos a los mil ohms .

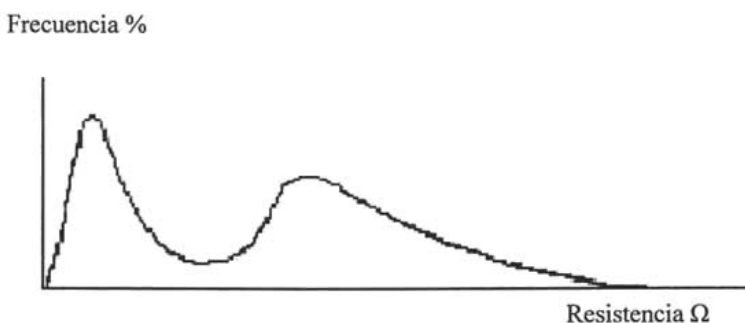


Fig. 2.30. Resistencia entre placas cerca del final de vida.

La figura 2.30 muestra la probabilidad del valor de resistencia al final de vida.

Se pueden definir tres zonas:

Zona 1 ó destrucción tipo 1. Caracterizada por un gran número de defectos dando una resistencia interna muy baja (mucho menor a 1 ohm).

Zona 2 ó destrucción tipo 2. Caracterizada por algún pequeño número de defectos y originan un valor intermedio de resistencia interna (unas decenas de ohms). El dieléctrico será destruido térmicamente en un tiempo corto. Seguida de una descomposición química.

Zona 3 o tipo 3. Destrucción caracterizada por una resistencia interna alta (varios cientos de ohm). Destrucción térmica y química más lenta.

2.6.2.- FUNCIONAMIENTO SIN PROTECCIÓN.

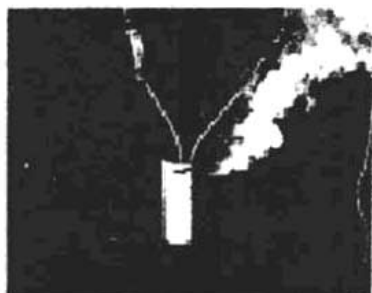
Examinemos el funcionamiento en los tres tipos de destrucción (ver figuras).



Tipo 1



Tipo 2



Tipo 3

Fig's. 2.31,2.32, 2.33 Fotografías del fin de vida de los elementos de acuerdo al tipo de defectos.

En el tipo 1, el alto flujo de corriente libera una considerable cantidad de energía. Sin protección, esto resulta en una explosión del elemento causando la explosión del recipiente ("bote").

En el tipo 2, el flujo de corriente es alto pero insuficiente para causar una explosión. La temperatura interna del elemento se incremento rápidamente por la cantidad de la energía liberada. El dieléctrico plástico se descompone y libera una considerable cantidad de gas, el cual provoca fuego en presencia de aire y temperatura alta. La aparición de fuego resultará en una falla rápidamente.

En el tipo 3, la degradación es lenta, con descarga de gas. Después de varias horas, ocurrirá la destrucción del tipo 1 ó tipo 2. Frecuentemente, sin embargo, el gas liberado se acumula lentamente, presiona sobre el rociado y desconecta la bobina, aislando así el elemento defectuoso.

En conclusión, es muy peligroso usar capacitores metalizados sin protección. Esta es la razón del por qué las regulaciones y los fabricantes responsables proponen proteger a los capacitores.

2.6.3. VERMICULITA.

Algunos fabricantes ha elegido un método de diseño de capacitores de potencia de bajo voltaje, en donde los elementos capacitores individuales, no están protegidos por sí mismos contra fuego o explosión al final de su tiempo de vida. Los elementos del capacitor individual son colocados en un contenedor metálico y protegidos en el ensamble. La protección se completa agregando las siguientes partes:

1 . Espaciadores/enfriadores los cuales reducen la temperatura de los elementos del capacitor (CEP). Los enfriadores son también diseñados para proteger las unidades vecinas del calor de una unidad defectuosa. Ellos también guardan los elementos del capacitor en su lugar y proporcionan suficiente espacio libre ente los mismos.

2. Vermiculita, un aislante eléctrico excelente, no flamable, compresible; se agrega entre los espacios libres de los elementos del capacitor -CEP-(patentado). Este último producto llena todos los espacios libres entre los elementos del capacitor. En caso de falla de la unidad, la vermiculita elimina el riesgo de fuego o explosión.

En caso de falla del tipo 1:

(Resistencia interna baja, destrucción violenta del capacitor). La compresión de vermiculita absorbe la energía del shock: La unidad capacitadora es desenergizada por ruptura de los extremos rociados, las otras unidades capacitadoras permanecen en servicio.

En caso de falla del tipo 2:

(Nivel intermedio, resistencia interna, destrucción del medio rápidamente). Como la vermiculita llena el espacio libre dentro del recipiente, la cantidad de oxígeno remanente es pequeña. Consecuentemente el fuego interno no puede ocurrir o en su caso es parado en un tiempo muy corto. La vermiculita actúa como un poderoso extintor. La resistencia interna aumenta rápidamente y la unidad capacitadora es desconectada de la red. Todo ello ocurre en el recipiente, sin efecto externo.

En la figura 2.34 se muestra como se encuentra el ensamble de los elementos de un capacitor, protegidos con vermiculita.

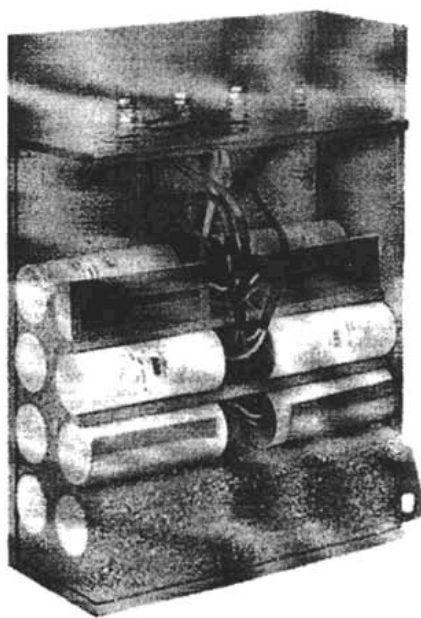


Fig. 2.34 Ensamble de elementos protegidos con vermiculita.

En caso de falla del tipo 3:

(Alta resistencia interna, destrucción lenta, con o sin producción de gas). Es imposible tener el recipiente presurizado. El gas se filtra a través de la vermiculita y escapa hacia afuera. La desconexión de la unidad capacitadora se retarda algunas veces, por varias horas.

Este diseño fue aprobado por el UL en U.S.A., tal aprobación fue previamente considerada "imposible" para capacitores no llenados, con aceite.

2.6.4. PROTECCIÓN SECUENCIAL (IPE)

La gran dificultad al proteger un elemento metalizado está en los valores de alta impedancia interna durante el corto circuito final. Por el contrario, un capacitor de placa sólida da una baja resistencia al final de su vida lo cual facilita usar una protección con fusible.

Algunos fabricantes han desarrollado un capacitor "combinado" por esas razones. Una pequeña parte está constituida con un capacitor de placa sólida, colocada en paralelo con una unidad metalizada.

El capacitor metalizado es un elemento especial, en el sentido que facilita la coordinación de la protección al final de vida dentro de la bobina (ver figura 2.35).

Tres acciones paralelas facilitan que esto sea realizado, y por lo tanto, obtener un alto grado de confiabilidad.

Sabemos que:

- La duración de vida depende de la temperatura.

- a) El calor generado por el capacitor (el cual no es importante, pero existe) se disipa por las superficies externas. En los enfriadores usados, los fabricantes sacan el calor que se va a través de las superficies laterales. La temperatura es más alta en el núcleo de la bobina. Esto es donde sucederá la falla final estando todos los otros parámetros constantes.
- b) La corriente fluye a través de las placas y causa pérdidas por efecto Joule. El perfil de la placa es tal, que la pérdida máxima en promedio, es generada a la mitad de la bobina.
- La duración de vida depende del espesor de la metalización.
- c) Los fabricantes han asegurado que el valor más bajo ocurre a la mitad del recorrido de la bobina. Como el punto donde el daño ocurrirá puede predecirse, gracias a esta invención, es posible colocar un detector apropiado para la falla en ese punto.

Cuando las películas de polipropileno se están embobinando, la línea media de la cinta, entre las áreas en donde el espesor promedio de las capas de metal es menor, se enrolla en un plano que está en ángulo recto a la línea central de la bobina. Por lo tanto, todo lo que tienen que hacer, es colocar una banda de detección alrededor de la bobina extendiéndola sobre el ancho total del plano perpendicular antes dicho, y asegurarse que el ancho total de la banda sea un poco mayor que el ancho de la cinta que tiene un ancho normal de superficie metalizada. Esta banda de detección es de hecho un pequeño capacitor creado por medio de una vuelta completa de una placa (o armadura) como se ve en la figura 2.36.

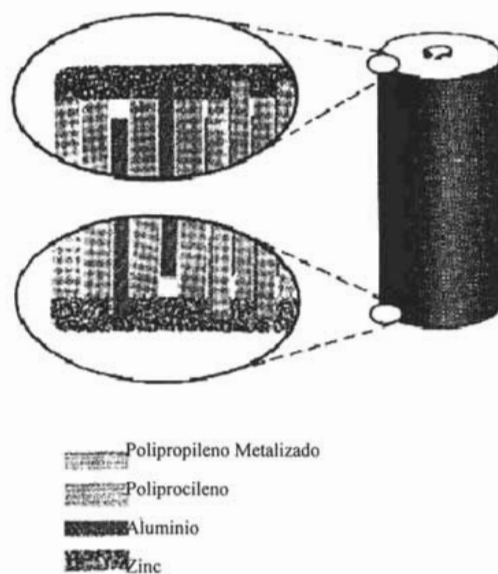


Fig. 2.35. Principio de una protección secuencias.

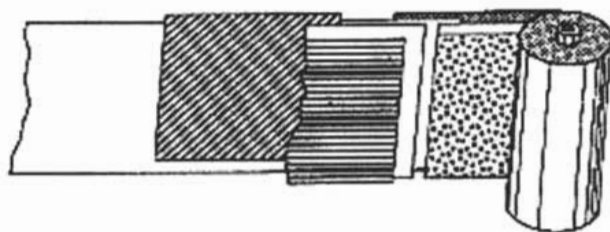


Fig. 2.36 Construcción de un elemento con protección secuencial (IPE).



Fig. 2.37 Principio de trabajo.

Resistencia en relación al tiempo para los 3 tipos de zona de falla (figura 2.37).

Cuando una falla final aparece:

Si es del tipo 1, la resistencia es baja y podemos usar fusible de protección.

Si es del tipo 2 ó 3, es localizada al centro de la bobina. El calor tiene que pasar a través del bobinado metalizado y hacer contacto con el capacitor de armadura sólida. El dieléctrico se destruye y el segundo capacitor se rompe. En este caso, sin embargo, esto ocurre con una resistencia baja y por lo tanto, es posible la protección con fusible. El tiempo requerido para obtener esta resistencia de fuga es rápido y en relación a la energía generada por la falla.

Este tipo de construcción proporciona todas las ventajas del sistema metalizado para ser disfrutada durante la totalidad de su vida normal, junto con la ventaja que la

protección es proporcionada para los capacitores de armadura sólida al final de su vida o en el caso de impulsos de energía accidentales.

En la figura 2.38 se muestra como es denotado un capacitor con protección secuencial.



Fig. 2.38 Símbolo denotando un capacitor con protección secuencial.

3. EL BANCO AUTOMATICO DE CAPACITORES

3.1 PROPÓSITO.

Debido a que la potencia reactiva requerida no es completamente constante durante las 24 horas del día se puede dividir en tres categorías:

a) Requerimiento prácticamente constante.

Este caso se aplica cuando la carga reactiva es constante.

Esto es cierto considerando la compensación de la corriente de magnetización de un transformador de distribución, por ejemplo: Un capacitor fijo puede ser usado.

b) Requerimiento variable.

Este caso puede resultar cuando la carga reactiva total varía durante el día, pero es aún demasiado pequeña para ser compensada individualmente en los objetos de carga diferentes (por razones de costo).

Para este caso uno debe usar un capacitor con potencia reactiva variable con la carga. Esto es un banco automático de capacitores.

c) Requerimientos instantáneos.

Este caso se aplica cuando el requerimiento es significativo en tamaño y es esencial la conmutación rápida (entre 0 y 20 ms). Se pueden emplear capacitores consolados por tiristores.

3.1.1 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN.

Cada banco es construido con un cierto número de capacitores trifásicos colocados en el mismo gabinete (contenedor). Los capacitores pueden ser arreglados en grupos paralelos y conmutados con contactores. El número de capacitores

autónomos está usualmente referido como pasos. El número de pasos son usualmente cinco o seis. La conmutación de los contactores y sus capacitores individuales es controlada por un regulador (vámetro), como se muestra en la figura 3.1

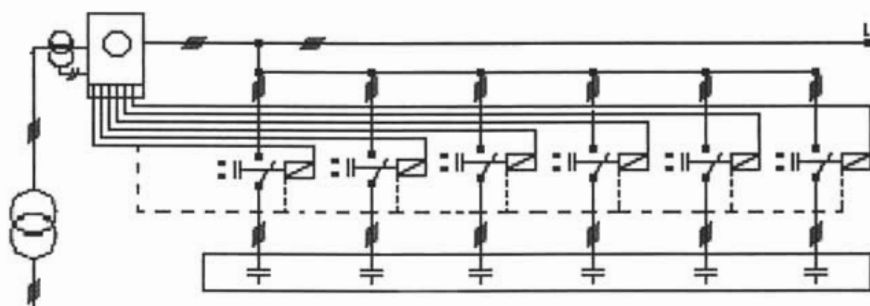


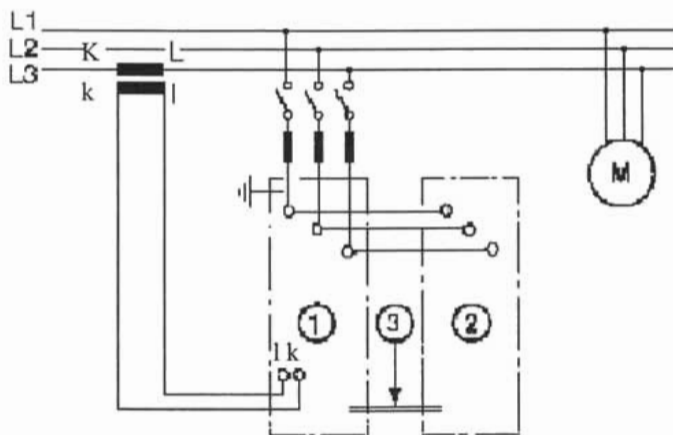
Fig. 3.1. Diagrama esquemático de un banco automático de capacitores.

3.1.2 BANCOS AUXILIARES.

Algunos bancos de capacitores están preparados para grandes rangos de potencia. De hecho, la potencia de cada paso de capacitor se puede duplicar instalando próximo al banco principal, un banco auxiliar con una superestructura conteniendo 6 contactores idénticos a aquellos del banco principal. Esos contactores están conectados a los contactos auxiliares de los contactores principales y conmutarán la segunda unidad simultáneamente con la unidad principal. De esta manera se obtiene una conexión en cascada ver Fig. 3.2.

Es posible multiplicar el número de bancos aún más. El principio es el mismo, es decir, el contacto auxiliar de cada contactor es usado para enganchar los pasos correspondientes en las siguientes unidades auxiliares (ver figuras 3.3 y 3.4).

Los bancos de capacitores auxiliares no están equipados con reguladores de VAR y cada uno aumenta el valor de un paso por un sexto de la potencia adicional conectada.



1. Banco principal
2. Banco auxiliar
3. Cableado de conexión entre bancos.

Fig. 3.2. Conexión de bancos en cascada.

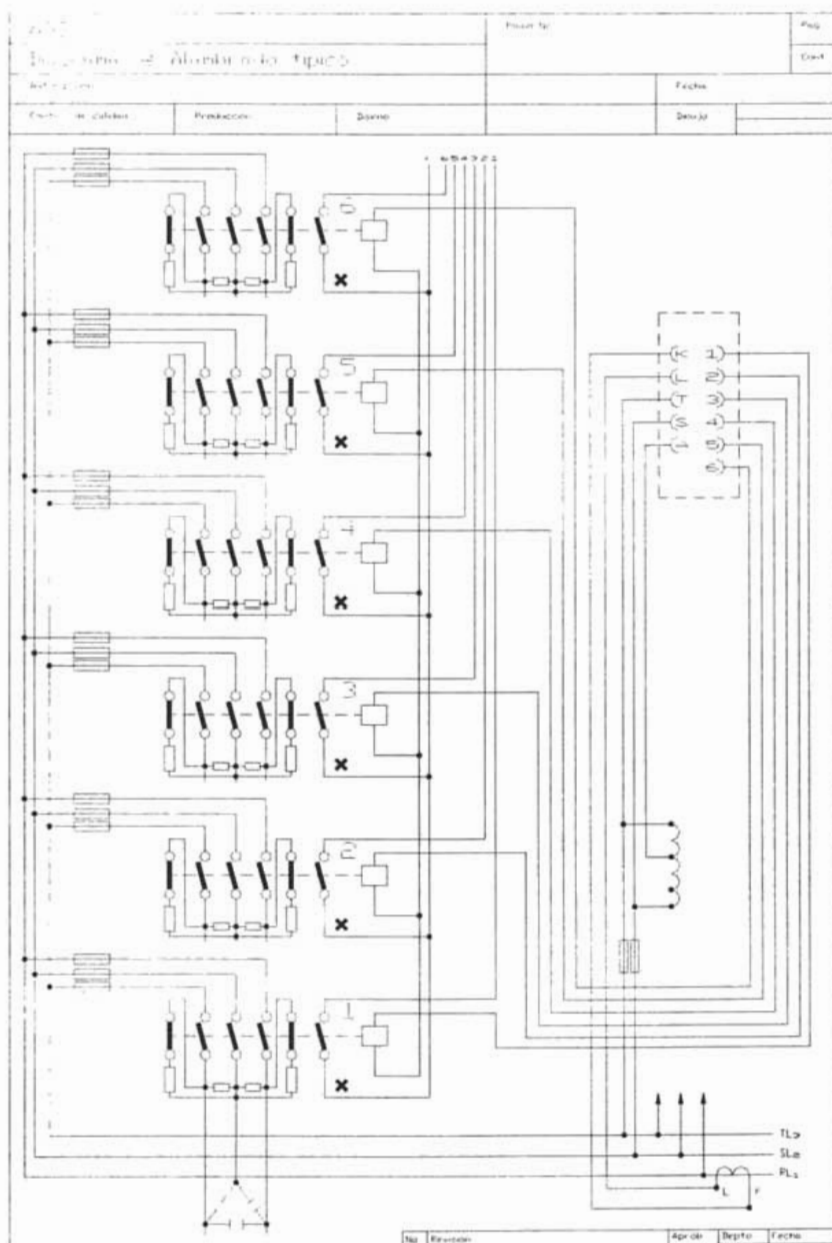


Fig. 3.3. Diagrama de alambrado de un banco de 6 pasos

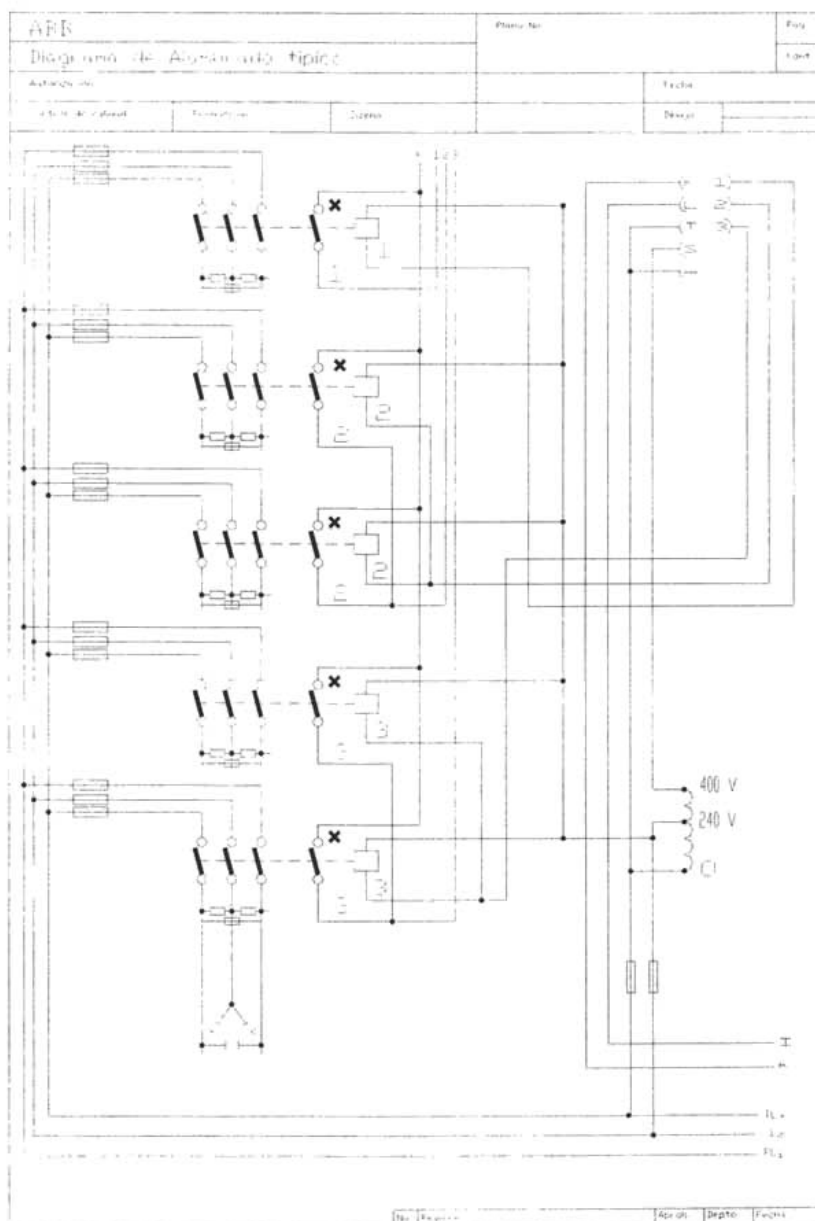


Fig. 3.4. Diagrama de alambrado de un banco de 5 pasos

3.2 EL REGULADOR VAR

Es un dispositivo que mide la potencia reactiva de un nodo y proporciona señales de control para regular parámetros del sistema eléctrico tales como son FP, Tensión, Potencia reactiva etc.

3.2.1 PROPÓSITO

El regulador de Vares tiene 4 funciones distintas que a continuación se describen:

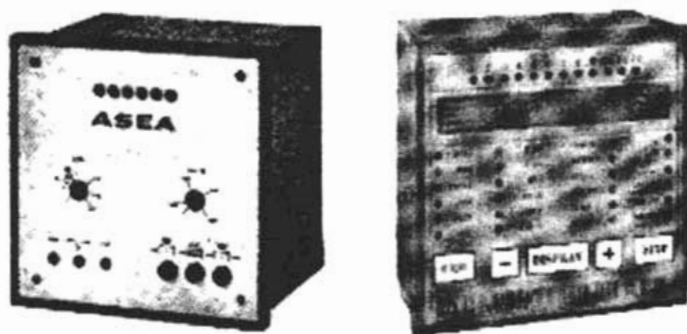


Fig. 3.5. Fotografía de un regulador Var.

- a) Medir la potencia reactiva requerida y controlar la conmutación (conexión, desconexión) de los, diferentes pasos de los capacitores dependiendo del factor de potencia deseado. En la Fig. 3.5. se muestra un regulador de Var.

Esto es hecho de la siguiente manera:

- Determinación del $\cos \varphi$ deseado.
 - Medición del $\cos \varphi$
 - Ajuste de sensibilidad.
 - Control de los pasos del capacitor.
 - Intervalos de conmutación entre dos pasos.
- b) Desconexión en voltaje cero.
- c) Insensibilidad a las armónicas.
- d) Señalización de pasos conmutados.

El regulador de vares fue originalmente construido con relevadores mecánicos; el control electrónico significa que:

- El peso y el costo pueden ser reducidos.
- La confiabilidad es mejorada.
- Las dimensiones pueden ser reducidas.

3.2.2 MEDICIÓN DEL $\cos \varphi$

Las señales de corriente y voltaje se requieren para determinar el valor del $\cos \varphi$.

Si la medición de corriente se hace en la fase R (A), por ejemplo, y el voltaje se mide entre las fases S (B) y T (C), el voltaje resultante estará 90° fuera de fase con respecto a la fase R (A).

Supongamos que el circuito es resistivo ($\cos \varphi = 1$). La corriente en R y el voltaje entre S y T están desviados en 90° . Se debe observar la secuencia de fase a fin de obtener el retraso de corriente con respecto al voltaje ver Fig. 3.6.

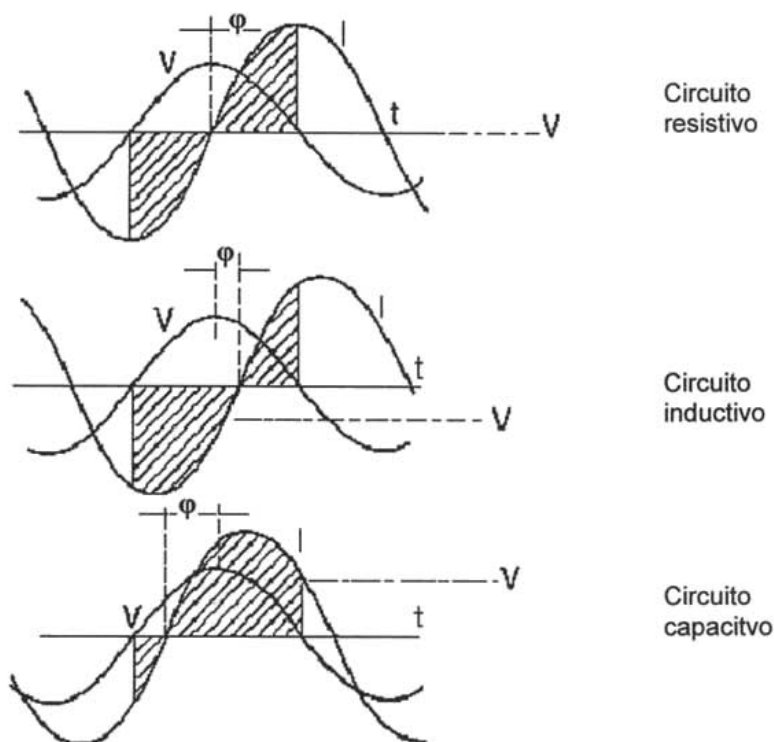


Fig. 3.6. Determinación del $\cos \varphi$, método de integración.

La señal de la función del $\cos \phi$ puede ser obtenida de dos formas.

a) Método de integración.

Determinamos el valor integral de la corriente durante una mitad de onda cuando el voltaje es positivo.

Podemos ver de la primera gráfica, donde la corriente está en fase con el voltaje (no olvidar que tenemos desviado el voltaje en 90°), que el valor integral es idéntico en la zona positiva y negativa, siendo el resultado cero. En las otras dos gráficas donde la corriente se retrasa (circuito inductivo) o se adelanta (circuito capacitivo), puede verse que la resultante no es más grande que cero, teniendo un valor positivo (circuito inductivo) o un valor negativo (circuito capacitivo).

Se puede mostrar que este valor resultante es una función de:

- La corriente (la cual es el flujo de corriente principal en el Transformador de Corriente, TC, si es provisto).
- El desfaseamiento de corriente-voltaje.

b) Método de fase.

Las señales de voltaje y corriente usadas son idénticas a aquellas descritas en el método anterior.

La señal de voltaje alterno es transformada en un impulso de corta duración con amplitud constante y defasada en 90° .

Esta es una señal senoidal, la cual es una función de la corriente de alimentación en un transistor de efecto de campo (FET).

El voltaje de salida será un impulso con amplitud proporcional al valor de la corriente en ese momento, es decir, $I \sin \varphi$. (Ver Fig. 3.7)

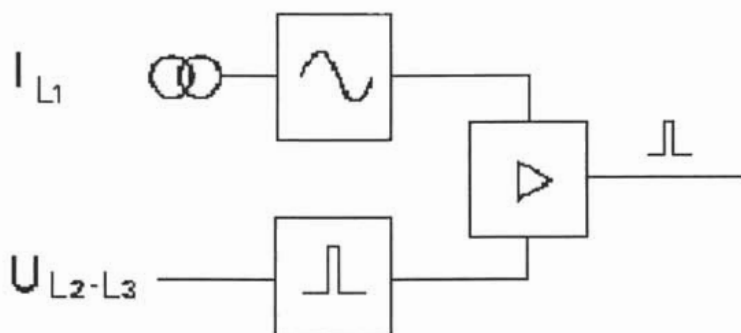


Fig. 3.7. Determinación del $\cos \varphi$, Método de fase.

3.2.3 AJUSTE DEL $\cos \varphi$

Este ajuste es hecho externamente por medio de un potenciómetro graduado en valores de $\cos \varphi$. Actualmente, por medios digitales en el RVQ-RVR y RVK y RVS.

a) Método de integración.

El principio consiste en el defasamiento de la señal de voltaje (usada para medir los valores del $\text{COS } \varphi$) en relación a su fase original la cual es hecha por medio de un circuito RC (ver figura 3.8).

Cuando el valor de la resistencia es cero, el voltaje de salida es igual y en fase con el voltaje en entrada (ver figura 3.9).

Por el incremento del valor de la resistencia, defasamos el voltaje de salida en relación al voltaje de entrada. Como estamos integrando la corriente en función del tiempo donde el voltaje es positivo, el valor del voltaje no tiene importancia, tan sólo la fase es la que importa.

La resistencia es regulada por medio de un potenciómetro graduado en valores de $\text{cos } \varphi$.

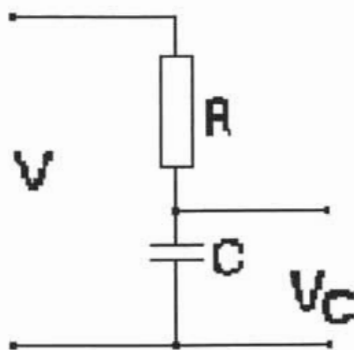


Fig. 3.8. Principio de un puente RC.

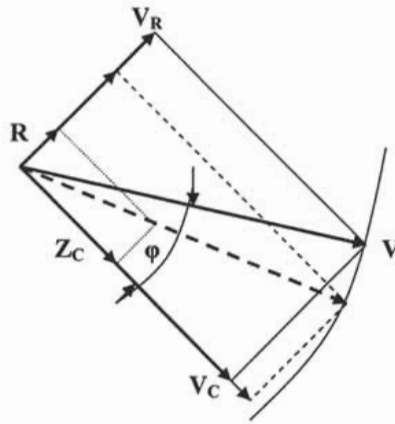


Fig. 3.9. Diagrama vectorial mostrando el cambio de fase entre salida y entrada.

b) Método de fase.

También actuamos sobre el vector de voltaje, por desfasamiento (en avance o retraso) el impulso representa el voltaje, usando un circuito RC en el que la constante de tiempo ha sido cambiada (ver figura 3.10).

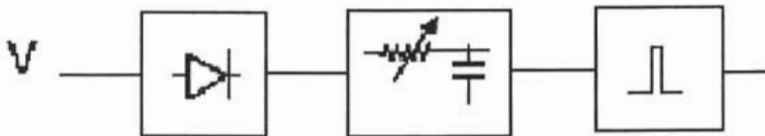


Fig. 3 10. Principio del ajuste de $\cos \phi$

3.2.4 AJUSTE DE SENSIBILIDAD (c/k).

El ajuste de c/k consiste en usar ya sea atenuación de corriente o amplificación de la señal de salida de la medición del $\cos \varphi$ más ajuste.

Determinando el valor del $\cos \varphi$ deseado por medio de la fijación de la potencia reactiva tolerada para un valor de potencia dado.

En otras palabras fijando el $\cos \varphi$ para una corriente activada da por medio de la fijación de la corriente reactiva.

La corriente reactiva es la diferencia entre la corriente resultante de la carga inductiva y la corriente capacitiva. En el caso de un banco automático, la corriente capacitiva aumenta por pasos hasta que alcanza la resultante seleccionada (ver figura 3.11)

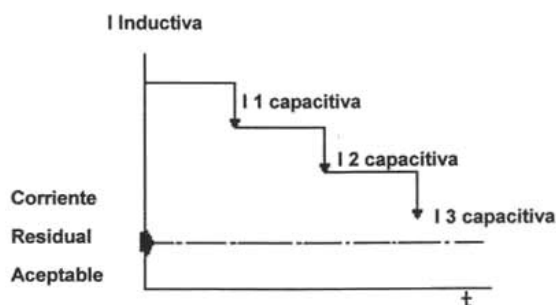


Fig. 3.11 Funcionamiento de un banco automático.

Puede verse de inmediato que es imposible obtener la corriente residual aceptable exacta, y que se debe permitir una tolerancia. Si la tolerancia es insuficiente,

hay un riesgo de "bombeo" es decir; una sucesión continua de conexiones y desconexiones de un paso (ver figura 3.12).

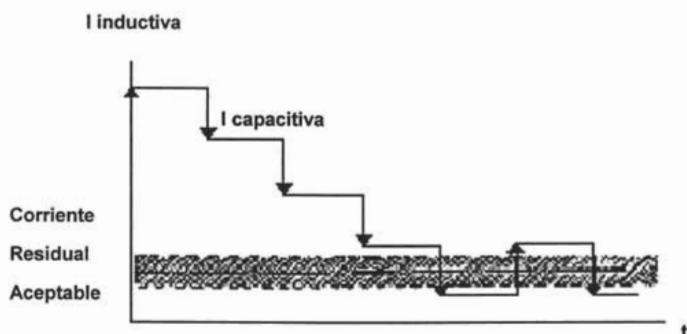


Fig. 3.12. Principio de "bombeo"

Es evidente que el "bombeo" se puede evitar si la tolerancia de sensibilidad total, excede la corriente en un paso de capacitor.

En la práctica, el regulador no está ajustado para reaccionar a cambios muy pequeños en la carga inductiva, sino solamente para cambios correspondientes a 2/3 de la corriente de un paso de capacitor. Debido a que el regulador sensibiliza la corriente del capacitor por medio del transformador de corriente, es importante tomar en cuenta la relación de transformación del transformador. El valor de la variación, también llamada corriente de inicio, es designada por c/k .

El valor de c/k puede ser calculado por la fórmula siguiente:

$$c/k \text{ ó } I_c/k = 0.62 \frac{Q}{V\sqrt{3}k} (10^3) \cong 0.360 \frac{Q}{Vk} \dots\dots(31)$$

En donde:

Q = Potencia nominal de un paso del capacitor en kVAR.

V = Voltaje de la red en V.

k = Relación de Transformación del Transformador de Corriente (TC).

El rango de las escalas del regulador RVK-RVS varía de 0.05 a 1

Ejemplo: Supongamos que tenemos un banco de 1 20 kVAR/400V, construido de 6 pasos, cada uno de 20 kVAR.

La corriente es medida con un transformador de corriente, con rango de 500/5, obtendremos:

$$\frac{C}{k} = 0.360 \frac{20}{400 \times \frac{500}{5}} = 0.18$$

kvar 230 V		6.6		10		13.3		20		26		30		40
kvar 400 V			10		20		30		40		50		30	
Tl	k													
50/5	10	1.00	0.90											
100/5	20	0.52	0.45	0.78	0.90	1.00								
150/5	30	0.34	0.30	0.52	0.60	0.69	0.90	1.00						
200/5	40	0.26	0.23	0.39	0.45	0.52	0.68	0.78	0.90	1.00				
300/5	60	0.17	0.15	0.26	0.30	0.35	0.45	0.52	0.60	0.68	0.75	0.78	0.90	1.00
400/5	80	0.13	0.11	0.20	0.23	0.26	0.34	0.39	0.45	0.51	0.56	0.59	0.68	0.78
500/5	100	0.10		0.16	0.18	0.21	0.27	0.31	0.36	0.41	0.45	0.47	0.54	0.63
600/5	120			0.16	0.15	0.17	0.23	0.26	0.30	0.34	0.38	0.39	0.45	0.52
800/5	160			0.10	0.11	0.13	0.17	0.20	0.23	0.25	0.28	0.29	0.34	0.39
1000/5	200					0.10	0.14	0.16	0.18	0.20	0.23	0.25	0.27	0.31
1500/5	300							0.10	0.12	0.14	0.15	0.16	0.18	0.21
2000/5	400									0.10	0.11	0.12	0.14	0.16
3000/5	600												0.14	0.16

Tabla 3.1. Valor de c/k de acuerdo a los rangos del transformador de corriente y a la potencia reactiva por paso.

El valor de c/k es regulado tomando una parte del voltaje generado por la corriente integrada. Esto se hace usando un potenciómetro graduado en c/k , alimentado por un amplificador en paralelo con un circuito RC.

El voltaje CD en la salida representa así una cierta parte de la potencia reactiva a ser compensada.

Este voltaje de salida controla dos transistores, uno NPN y otro PNP acoplados en paralelo.

Dependiendo de la polaridad del voltaje medido, ya que uno u otro de esos transistores será controlado. Los LED'S (diodos emisores de luz) son conectados en los circuitos del colector del transistor.

Esos diodos indicarán si la corrección a ser realizada es inductiva o capacitiva.

3.2.5 CONTROL DE PASOS.

La señal de salida ajustada por el potenciómetro de c/k proporciona dos indicaciones:

- Si tiene un valor suficiente controlará la operación.
- Si es positivo, esta operación consiste en conectar un capacitor y viceversa.

Por medio de un medidor (circuito integrado) recibiendo la señal, controla los contactores principales por medio de relevadores auxiliares integrados con el regulador de Vares.

3.2.6. SECUENCIAS DE CONEXIÓN.

Existen tres tipos principales:

a) Adición.

El primer capacitor es siempre conectado tan pronto como exista una demanda. El segundo, tercero, etc., son conectados cuando la demanda aumenta y viceversa. Esto es representado como 1.1.1.1.1.

b) Progresión

El banco incluye capacitores con valores diferentes que son múltiples del primer paso, por ejemplo: 1-2-4 etc. El paso 1 está en la primera demanda. Si la demanda aumenta, el paso 2 es conectado y el paso 1 es desconectado.

Un problema puede aparecer por la conexión de un capacitor con 4 veces la unidad de potencia, pero esto puede ser reducido con una secuencia 1-2-2. Actualmente el Regulador RVK-RVS permite la conexión 1: 2: 4 ó 1: 2: 4: 8: y otras.

c) Rotación.

Los métodos anteriores sólo permiten aumentos y ciertos capacitores (por ejemplo el primero), están con mucha mayor frecuencia conectados, con respecto a los otros.

En un intento de restaurar el balance, tendríamos:

Demanda: conecta 1

Nueva demanda: conecta 2

Reducción: Desconecta 1 (no es el 2 como en la secuencia de adición).

El regulador RVK-RVS permite el descanso alterno del primer paso, en caso necesario.

3.2.7 INTERVALOS DE CONMUTACIÓN.

El problema con los intervalos demasiado cortos entre operación de conmutación, es importante cuando c/k es calculado inadecuadamente y puede conducir al efecto previamente mencionado, llamado "búsqueda".

Aún si los capacitores están equipados con resistencia de descarga, es necesario permitir un cierto tiempo después de la desconexión de un capacitor antes que una nueva conexión sea hecha, para permitir al capacitor descargarse a un nivel de voltaje residual bajo.

El capacitor, por lo tanto, no debe ser reconectado a una carga antes que haya sido suficientemente descargado. Un cierto tiempo mínimo debe ser fijado entre la desconexión y la reconexión del paso del capacitor. Este tiempo puede ser obtenido en el contador y es típicamente alrededor de 40 seg.

Esto es suficiente para evitar sobre corrientes extras debido a la conmutación repetida del capacitor.

3.2.8 DESCONEXIÓN EN VOLTAJE CERO.

Para evitar el problema de la auto excitación en un motor, el capacitor debe ser desconectado cuando el voltaje es cortado.

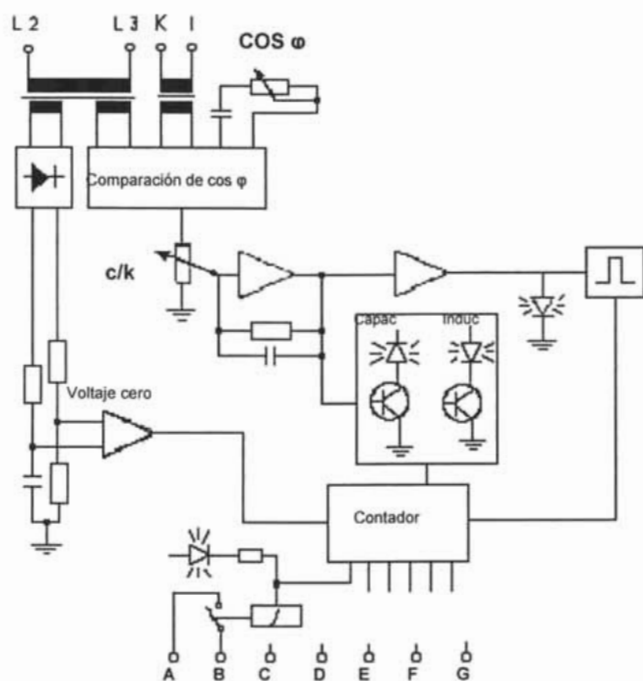


Fig. 3.13. Diagrama en donde se muestra el principio de reguladores Vares funcionando por integración.

Durante un corte principal excediendo en 2 períodos, el medidor es automáticamente puesto a cero. El medidor es reactivado 90 seg.

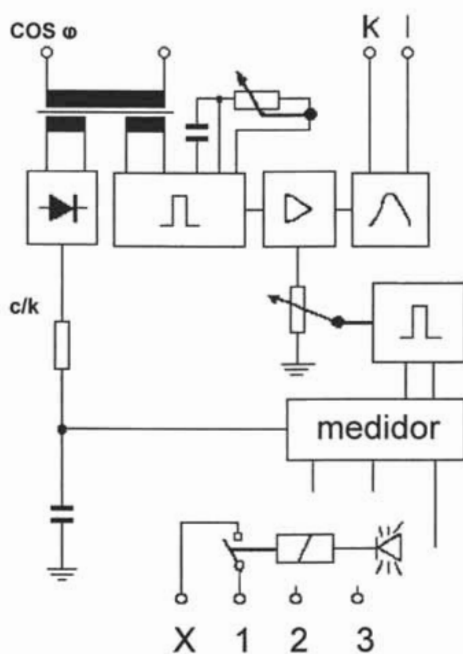


Fig. 3.14 Diagrama que muestra el principio cuando el regulador de Vares está trabajando por comparación de fase

3.2.9 ARMÓNICAS

Las armónicas⁽⁵⁾ son más y más comunes en los sistemas de suministro principales, y es imperativo que el regulador de VARS deba ser insensible a ellas. Durante una alternancia de onda fundamental, la integral de las ondas armónicas pares es cero, pero la integral de las ondas armónicas impares es igual a una alternancia.

paso	Salida					
	1	2	3	4	5	6
	Acoplamiento					
	1	1	1	1	1	1
1	*					
2	*	*				
3	*	*	*			
4	*	*	*	*		
5	*	*	*	*	*	
6	*	*	*	*	*	*

paso	Salida		
	1	2	3
	Acoplamiento		
	1	1	1
1	*		
2		*	
3	*	*	
4		*	*
5	*	*	*

Fig. 3.15 Conexión de los diferentes pasos.

El regulador de VARs trabajando por integración, es insensible a las armónicas pares y sensible a las armónicas impares pero con una atenuación.

de 1/3 para la 3a armónica

de 1/5 para la 5a armónica ... etc.

⁽⁵⁾ Una armónica está definida como una componente senoidal de una onda periódica o como una cantidad de frecuencia que es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental.

El regulador trabajando por examen de fase es altamente sensible a las armónicas, y debe tener un filtro de entrada que permita el paso de la onda fundamental sin modificación y las frecuencias altas atenuadas considerablemente por ejemplo:

1 / 5 para la 2a. armónica.

1 / 10 para la 3a. armónica.

1/20 para la 4a. armónica.

3.2.10 SEÑALIZACIÓN

Lámparas de señales indicando la conexión de los pasos fueron proporcionadas desde el tiempo en que los bancos automáticos fueron introducidos por vez primera, y esta práctica ha continuado. En la figura 3.15 se muestra la conexión de los diferentes pasos.

Hoy día usamos diodos LED'S ya sea en serie o en paralelo en los relevadores internos del regulador de Vares (ver figura 3.16).

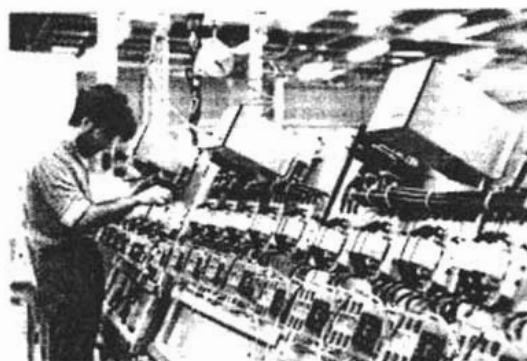


Fig. 3.16. Fotografía que muestra el cableado del tablero de conexiones.

3.3 EL TRANSFORMADOR DE CORRIENTE (TC)

3.3.1. PROPÓSITO

Si queremos un ajuste automático de la potencia reactiva de acuerdo a los requerimientos, se deben instalar bancos automáticos de capacitores. Para determinar la potencia reactiva requerida, es necesaria la siguiente información:

- La secuencia de las fases.
- El voltaje
- La corriente

Los parámetros arriba citados son alimentados al regulador del banco automático como el valor máximo de la corriente de entrada para el regulador es de 5 A, es necesario usar un transformador de corriente (TC).

3.3.2 DATOS PARA EL TC.

La corriente será calculada de acuerdo a la fórmula:

$$I = \frac{Kva}{V\sqrt{3}} \times 1000 \dots\dots\dots(32)$$

El numerador (kVA) debe representar una lectura de potencia de un cuarto de hora. Si aún se requiere potencia más alta, excediendo, por decir algo, 75% del máximo conocido de antemano, la potencia debe ser elegida como la nominal del transformador.

Las siguientes características del TC deben ser seleccionadas siempre:

- Corriente del secundario: 5 A
- Mínimo: 10 VA
- Clase: mínimo 1.0

Ejemplo: Suponga que tenemos un transformador nominado a 500 kVA/400V/50 Hz.

$$I = \frac{500}{400 \times \sqrt{3}} \times 1000 = 722 \text{ A}$$

Una relación del TC de 800/5 cargado con 10 VA y de clase 1.0 se debe elegir para alimentar al regulador.

Relación del transformador:

Esta es la relación entre la corriente principal y la corriente del relevador, por ejemplo, puede estar dada como X/5. Es denotada por la letra k.

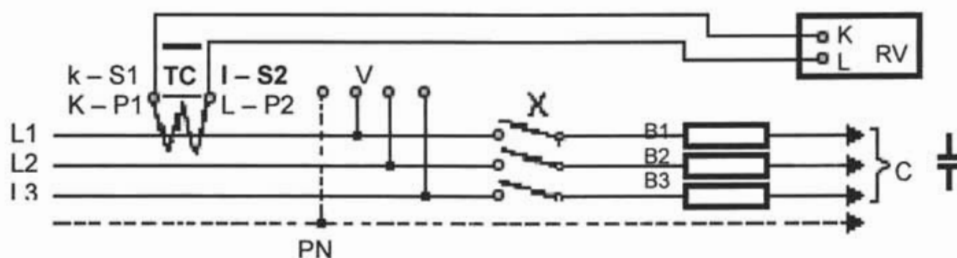
NOTA: La sensibilidad del regulador debe ser ajustada de acuerdo a la relación del transformador k y al tamaño del paso del capacitor C expresado como la relación c/k.

3.3.3 CONEXIONES.

La figura 3.17 muestra la conexión del TC en la red, así como la conexión de los capacitores.

El TC debe ser conectado:

- a) Antes de los capacitores y la carga, así, el flujo de corriente a través del TC debe ser la suma de la corriente de carga y la corriente de los capacitores.



B1,B2,B3 Puntos de conexión para los capacitores

C a los contactores

X interruptor

R a la fuente principal

RV regulador

V a la carga

TC transformador de corriente

K-Pi, marcado (k o Pi) del lado del primario del TC hacia la línea de suministro.

L-P2 marcado (L, o P2) del lado del primario del TC hacia la carga

K-Si Terminales (K, 1) o (S1, S2) del secundario del TC

I-S2 Conexión a las terminales correspondientes del regulador de VAR RV

PN Punto neutral

Fig. 3 17. Acoplamiento del TC.

- b) En la fase R ó A (notación arbitraria), es decir, en la fase que esté ubicada más convenientemente para la conexión del TC.

- c) En la dirección indicada por las letras K y L por atrás del regulador, que en turno debe corresponder a las letras k (o S1) y 1 (o S2) sobre el secundario del TC. El TC debe también ser conectado de tal modo, que el lado primario marcado con k ó P1 dé hacia el lado principal de la red y el lado marcado con L ó P2 hacia el lado de la carga y los capacitores.

3.2.4 TC PARA MEDICIÓN DE SUMA DE CORRIENTE.

En ciertos casos puede ser deseable compensar dos transformadores al mismo tiempo. Los dos transformadores pueden operar en paralelo o pueden alimentar cargas separadas. En cada circuito un TC es colocado para medir la corriente total. Los TC's deben ser colocados en la misma fase.

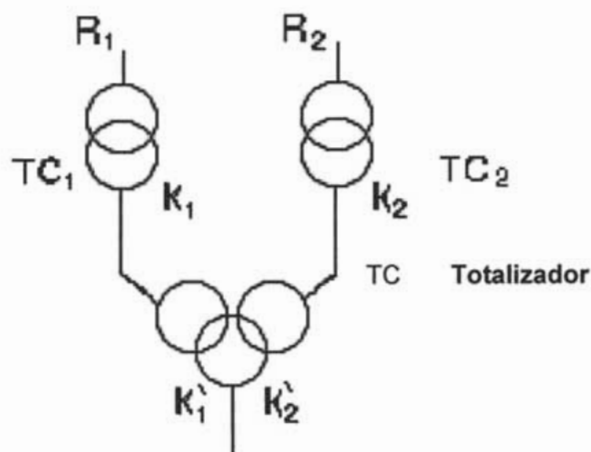


Fig. 3.16 TC Totalizador de Corriente

Permita que el TC1 con una relación K_1 se instale en la fase R1 del primer transformador y TC2 con relación K_2 , se coloque en la fase R2 del segundo transformador.

Para medir la corriente total se requiere usar un tercer transformador, llamado transformador totalizador de Corriente ó TC para medición de suma de Corriente (ver figura 3.16).

Este tiene 2 devanados primarios nominales de, 5A y un secundario de 5A, el cual alimenta al regulador.

Este TC tiene así dos relaciones de transformación: K'_1 y K'_2 que están directamente relacionadas a K_1 y K_2 .

Si las relaciones de transformación de los dos TC's son iguales ($K_1=K_2$) las corrientes de salida influenciarán la suma de corriente del TC de igual manera. Cuando el TC1 registra una corriente de 1 A y el TC2 registra la misma corriente, el TC de adición también registrará una corriente igual a 1 A.

Ejemplo:

Supongamos dos TC's principales que tengan relaciones de 600/5 y 200/5 respectivamente.

El TC Totalizador tiene dos devanados primarios y una relación de transformación de $(5+5)/5$.

La relación de la transformación total será entonces:

$$\frac{600 + 200}{5} = 160$$

Con el valor capacitivo de 20 KVAR/400 V por paso, el valor de c/k es igual 0.11.

$$\text{o sea, } c/k = 0.360 \frac{Q}{V/k} = 0.360 \frac{20000}{400 + 160} = 0.11$$

3.3.5 TRANSFORMADORES EN PARALELO.

En el caso en donde los transformadores estén trabajando en paralelo, se deben tomar precauciones especiales, para los datos transmitidos al regulador de VARS, además de aquellas que normalmente se consideran para este caso.

Cuando dos transformadores idénticos están trabajando en paralelo y sus cargas al máximo sean 50% de su potencia nominal, se pueden usar dos TC's idénticos. Los secundarios de los TC se conectan en paralelo para alimentar el regulador de VARS (ver figura 3.17).

El valor de c/k será el mismo que el calculado con sólo un TC. Note el hecho que la entrada de corriente del regulador de VARS, tolerará una carga adicional del 20% solamente.

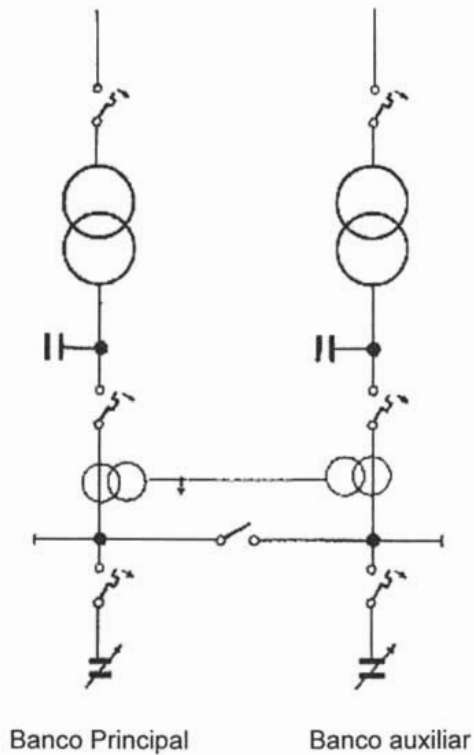


Fig. 3.17. Diagrama que muestra el funcionamiento de dos transformadores idénticos en paralelo.

Cuando dos transformadores diferentes estén trabajando en paralelo, la medición de la corriente se hará ya sea sobre el lado de HV (Alto Voltaje) ó con un TC totalizador de corriente (ver figura 3.18).

La potencia de los bancos principal y auxiliar, está determinada en relación a su propio circuito.

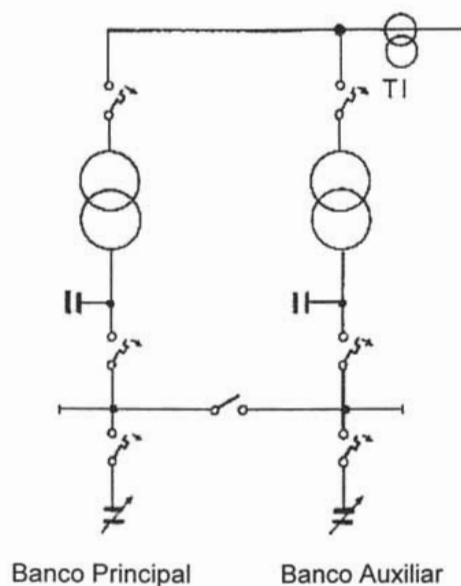


Fig. 3.18. Diagrama que muestra el funcionamiento de dos transformadores diferentes abastecidos de la misma fuente.

Si la fuente de HV para los dos transformadores no es común a ambas, se debe usar un TC totalizador de corriente (ver figura 3.19).

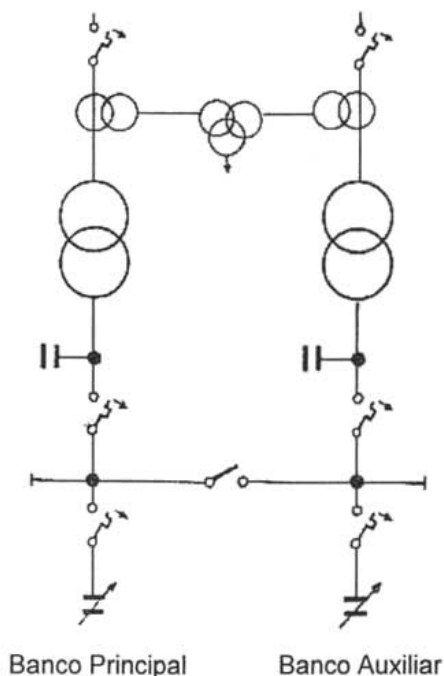


Fig. 3.19. Diagrama que muestra el funcionamiento de dos transformadores diferentes, abastecidos de dos fuentes diferentes.

Un TC nunca debe operar con el circuito secundario abierto si no está siendo usado, la salida secundaria debe ser cortocircuitada (ver figura 3.20).

En cada caso tenga mucho cuidado de checar la dirección de fase, y no olvidar que el voltaje debe estar cambiado 90° en relación a la corriente cuando el $\cos \varphi$ es igual a 1.

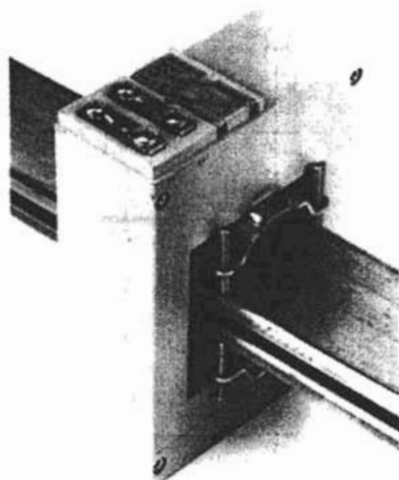


Fig. 3.20 Fotografía de un TC (Transformador de corriente)

3.3.6 CONTACTORES

El contactor está controlado por el regulador de Vares y su propósito es conectar y desconectar el capacitor por pasos; ésta es una regla importante que requiere un alto nivel de:

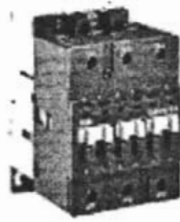
- Confiabilidad mecánica.- Para tener gran cantidad de conexiones y desconexiones.
- Confiabilidad eléctrica.- Para resistir la corriente de conexión transitoria.

Otra propiedad muy importante es el valor de las pérdidas técnicas en la bobina y los contactores, por esas pérdidas aumenta el calor interno en la tablilla de control del contactor.

Nuestros reguladores varimétricos son proporcionados con un dispositivo que retarda la reconexión del capacitor después del corte. No es necesario por lo tanto, proveer de resistencias de descarga rápida; el contactor no tiene que tener contactos auxiliares



CONTACTOR SERIE B



CONTACTOR SERIE A Y UA



CONTACTOR SERIE EH

3.3.7 FUSIBLE

Hemos visto que el capacitor está autoprotegido.

El cable de alimentación es más importante que los cables de conexión entre contactor y capacitor. Se recomienda fuertemente que se instalen fusibles individuales (ciertas regulaciones locales requieren esto).

En la figura 3.21 se muestran algunos diagramas de conexión donde aparecen los fusibles.

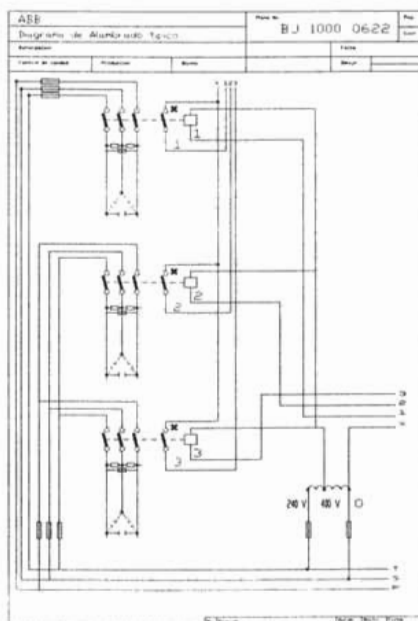
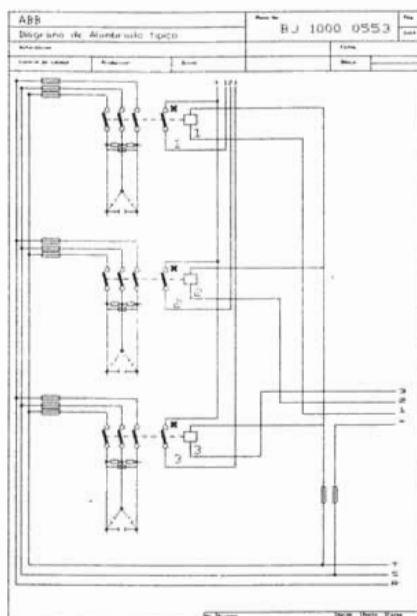


Fig. 3.21. Diagramas de conexión.

Estos fusibles son colocados entre la fuente y los contactores (ver figura 3.22) y están dimensionados por una corriente nominal entre 1.7 y 2 veces el valor de la corriente capacitiva. Este dimensionamiento es necesario, ya que toma en cuenta las posibles armónicas y con el fin de evitar desconexión durante el flujo de la corriente de conexión transitoria. Se usan fusibles de disparo lento.

Un fusible se puede utilizar para proteger dos capacitores en paralelo, y el dimensionamiento debe obviamente tomar en consideración esos capacitores.

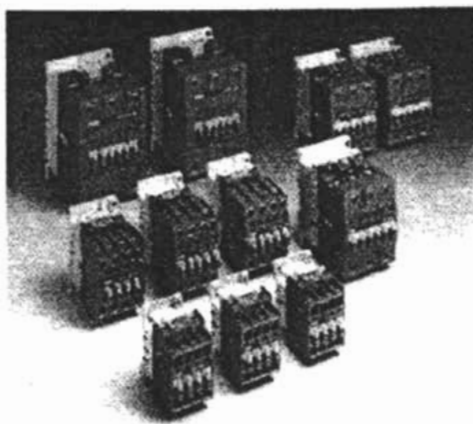


Fig. 3.22 Fotografía de contactores de varios tamaños

3.4 CONTROL DE CAPACITORES POR TIRISTORES

3.4.1 VARIACIONES EN LA POTENCIA REACTIVA.

Un banco de capacitores instalado en derivación, entregará una potencia reactiva constante si el voltaje principal es constante, y es por lo tanto, solamente apropiado en instalaciones en donde el consumo de potencia reactiva es casi

constante. Para variar la potencia reactiva de un banco en derivación es posible conectar y desconectar ciertas partes del banco dentro y fuera del circuito y así obtener una compensación que se adaptará por sí misma en etapas a la necesidad de energía reactiva.

Cada paso es controlado por contactores y el tiempo mínimo para conmutar un paso es del orden de varias docenas de segundos.

Cuando el voltaje principal no es muy potente (por ejem. en los edificios de apartamentos) una rápida demanda para potencia (por ejem. elevador) causa una variación abrupta en voltaje. Este es también el caso en circuitos de potencia donde existe una variación brusca en una carga pesada (en el caso de una máquina laminadora o roladora, por ejemplo).

Una respuesta muy rápida debe, por lo tanto, ser proporcionada a la demanda por la potencia reactiva.

3.4.2 EFECTO DE LA VARIACIÓN DE VOLTAJE.

Debe tenerse en mente que solamente variaciones de voltaje limitadas, se pueden tolerar, por ejemplo en el caso de:

- Ciertos dispositivos eléctricos o electrónicos.

- El ojo humano es particularmente sensible a las variaciones de voltaje, tales como variaciones que causan cambio en la intensidad de la luz de las lámparas. Investigaciones aún mostraron que la sensibilidad del ojo a las variaciones de luminosidad es máxima a las frecuencias de alrededor de 2 - 8 Hz, y que el límite de percepción es una variación de voltaje de cerca del 0.3% (ver figura 3.23).

A fin de evitar esos disturbios, la variación de voltaje relativo debe ser $< 0.3\%$ en punto de conexión de la fuente principal.

Si es conocida la variación máxima permitida a $\Delta V/V$, se puede determinar aproximadamente la potencia reactiva de cada paso de capacitor por medio de la ecuación $A_{Oc} = S_k \Delta V/V$ en la que S_k es la potencia de cortocircuito en el punto crítico.

En donde S_k es la potencia de corto circuito en ese punto (Punto Crítico).

Cuando se conoce el tamaño de los pasos del capacitor, el número de pasos es calculado a fin de obtener la potencia reactiva total necesaria para la compensación.

Variaciones de voltaje

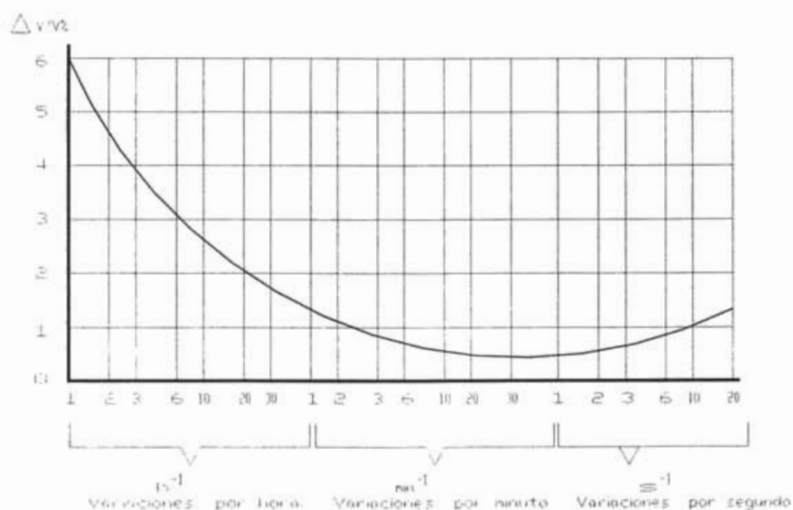


Fig. 3.23 Variaciones de voltaje aceptados por el ojo.

3.4.3 USO DE SEMICONDUCTORES

Solamente los semiconductores pueden trabajar rápidamente, pero ellos son por sí mismos, muy sensibles a sobre intensidad y voltajes excesivos.

Aceptan relativamente bajas variaciones de corriente di/dt y voltaje dv/dt . Los transistores de conexión deben, por lo tanto, ser eliminados, lo cual implica (ver figura 3.24):

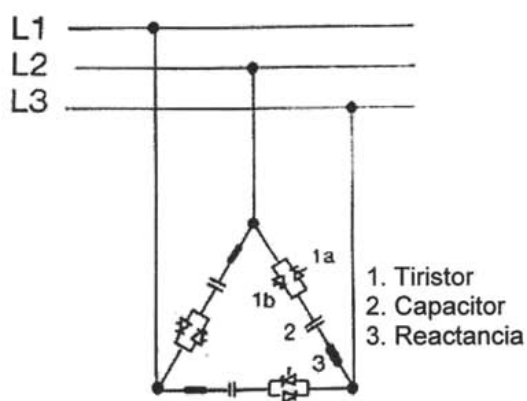


Fig. 3.24. Principio de funcionamiento del banco electrónico.

- Diferencia cero entre el voltaje del capacitor y voltaje instantáneo del suministro:
- Conexión en voltaje máximo.

3.4.4 REALIZACIÓN.

El circuito trifásico es reemplazado por 3 circuitos de una fase acoplados en triángulo (DELTA).

La conexión se puede elegir, por ejemplo, en el momento en que el voltaje de fase alcanza su máximo positivo (o negativo).

Cuando los capacitores no están conectados a la fuente, ellos permanecen cargados al vapor pico de amplitud (positivo o negativo) de la fuente de voltaje. El instante de la conmutación es el momento cuando la fuente de voltaje sobre la derivación respectiva corresponde a la amplitud y la polaridad del voltaje del capacitor, y por lo tanto, al cruce de cero natural de la corriente del capacitor.

La desconexión de los capacitores se hace suprimiendo los pulsos de conducción: de los tiristores, tal como los tiristores⁽⁶⁾ son bloqueados cuando la corriente es cero. El capacitor permanecerá, por lo tanto, cargado a un valor de amplitud pico y está listo para un nuevo pulso de conmutación sin ningún transitorio (ver figuras 3.25 y 3.26).

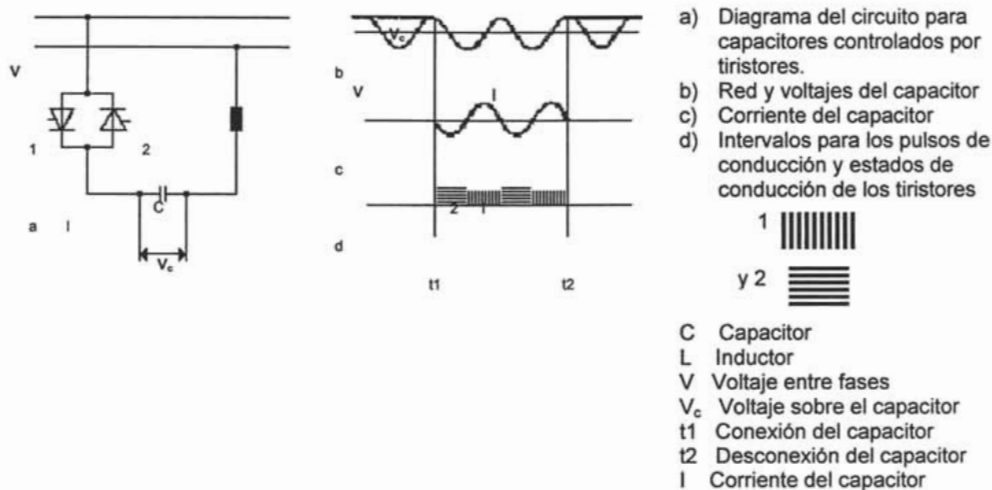


Fig. 3.25. Principio del Control por tiristor de una fase.

⁽⁶⁾ Un Tiristor es un semiconductor sólido de silicio constituido por cuatro capas alternativas tipo PNP. Dispone de tres terminales accesibles denominados ánodo, cátodo y puerta, siendo este último el electrodo de control. Este semiconductor funciona básicamente como un diodo rectificador controlado, permitiendo circular la corriente en un solo sentido.

Si se usa un regulador de VARS, debe dar un comando sin retardo. En el caso de máquinas laminadoras o roladoras, el dispositivo de medición se puede hacer con generadores Hall.

De lo expuesto arriba, se tiene que el tiempo entre un comando de conmutación estando encendido, y la ejecución real de este comando, puede variar entre 0 y 20 ms (a 50 Hz). Si se desea la compensación simétrica, las ramas de la fase individual son conmutadas cuando los componentes de voltaje diferentes corresponden a sus respectivos voltajes de capacitor.

3.4.5 MEDICIÓN E INDICACIÓN DE POTENCIA REACTIVA

La determinación de la potencia de compensación requerida en cada instante, se puede hacer midiendo la potencia reactiva consumida. Si la carga de potencia reactiva varía rápidamente, el sistema de medición debe ser diseñado de modo que la compensación se pueda realizar con un retardo mínimo, es decir, la conmutación de los capacitores se puede hacer en sincronización con las variaciones en la carga de potencia reactiva.

Este dispositivo muy rápido puede realizarse usando generadores Hall. El dispositivo de control es conectado de la misma forma que el varmetro estándar. La señal de salida del generador Hall está compuesta de un voltaje CD y un voltaje CA. El nivel en CD y la polaridad, dan la potencia reactiva, y la frecuencia de la señal CA, es dos veces la frecuencia principal. Se deben usar dos diferentes sistemas de medición e indicación, dependiendo si la carga reactiva es simétrica o asimétrica.

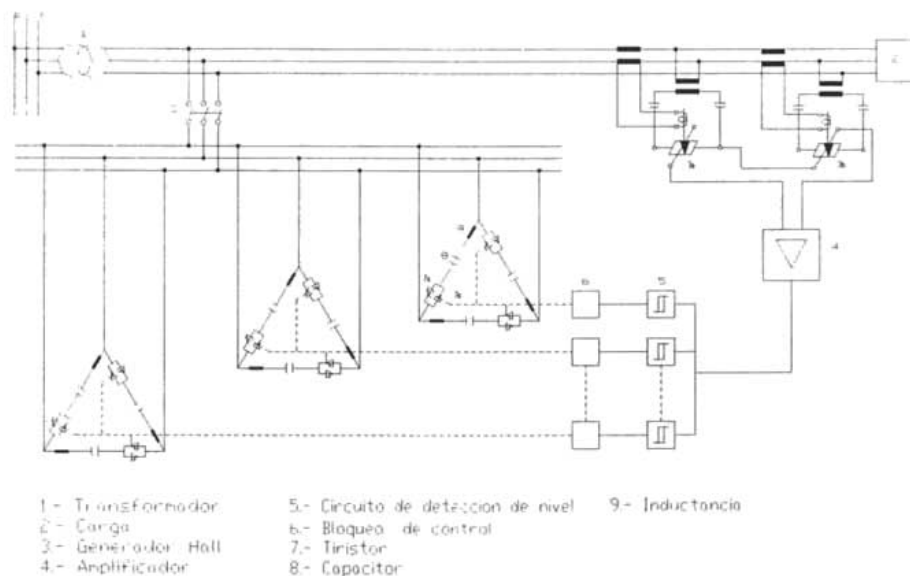


Fig. 3.26 Diagrama de un circuito para un banco de capacitores trifásico controlado por tiristores, conmutado en etapas (o pasos) y con una carga simétrica.

4. CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA

4.1 ANTECEDENTES

Las cargas industriales en su naturaleza eléctrica son de carácter reactivo, a causa de la presencia principalmente de equipos de refrigeración, motores, etc. Este carácter reactivo obliga que junto a la potencia activa (kW) exista una potencia llamada Reactiva (kVAR), las cuales en su conjunto determinen el comportamiento operacional de dichos equipos y motores. Esta potencia reactiva ha sido tradicionalmente suministrada por las empresas de electricidad, aunque puede ser suministrada por las propias industrias. Al ser suministrada por las empresas de electricidad deberá ser producida y transportada por las redes, ocasionando necesidades de inversión en capacidades mayores de los equipos y redes de transporte.

En una carga industrial reactiva su componente de reactividad puede ser controlado y compensado, con amplios beneficios técnicos y económicos.

El hecho de que exista un bajo factor de potencia en su industria produce los siguientes inconvenientes:

Al suscriptor:

- Aumento de la intensidad de corriente.
- Pérdidas en los conductores y fuertes caída de tensión.
- Incrementos de potencia de las plantas, transformadores y reducción de capacidad de conducción de los conductores.
- La temperatura de los conductores aumenta y disminuye la vida de su aislamiento.
- Aumentos en sus facturas por consumo de electricidad.

A la compañía de electricidad:

- Mayor inversión en los equipos de generación, ya que su capacidad en kVA debe ser mayor.
- Mayores capacidades en líneas de transporte y transformadores para el transporte y transformación de esta energía reactiva.
- Caídas y baja regulación de voltajes, los cuales pueden afectar la estabilidad de la red eléctrica.

Una forma en que las empresas de electricidad a nivel nacional e internacional hacen reflexionar a las industrias sobre la conveniencia de generar o controlar su consumo de energía reactiva ha sido a través de un cargo por demanda, facturado kVA, es decir, cobrándole por capacidad suministrada en kVA; o a través de un cargo por demanda facturado en kW pero adicionándole una penalización por bajo factor de potencia kVAR.

Las industrias pueden evitar estos cargos tarifarios si ellas mismas suministran en sus propios sitios de consumo la energía reactiva que ellas requieren, la cual puede ser producida localmente a través de capacitores fijos, capacitores automáticos o motores sincrónicos realizando una inversión menor en comparación de los recargos que la compañía suministradora les cobra en penalizaciones⁽⁷⁾.

4.2 PRINCIPIO DE COMPENSACIÓN

Transformadores, equipo de soldar, hornos de inducción, lámparas de descarga (fluorescentes, de vapor de mercurio, etc.), consumen potencia reactiva inductiva, como lo hacen los motores eléctricos.

⁽⁷⁾ En México actualmente existen empresas que pagan altas penalizaciones. Si estas empresas invirtieran en capacitores recuperarían su inversión en pocos meses y eliminarían pérdidas económicas y en sus instalaciones.

Esta potencia reactiva debe ser generada en algún lugar. Esta es una de las razones para instalar capacitores. Estos no consumen prácticamente potencia activa y pueden producir energía reactiva localmente, compensando así la potencia reactiva inductiva consumida por los elementos arriba mencionados. Para una potencia activa constante, la potencia reactiva transmitida para este grupo de cargas, la carga inductiva y la capacitiva, puede así ser reducida; el factor de potencia en la red ha sido mejorado o "corregido".

Consideremos una carga inductiva demandando una corriente I_1 , la cual retrasa al voltaje por un ángulo ϕ . Esta corriente I , es usada para calcular la potencia aparente. Esta corriente puede ser descompuesta en un componente en fase con el voltaje, I_W , y un componente 90° fuera de fase con el voltaje, es decir, I_R , como se ilustra en la figura 4.1

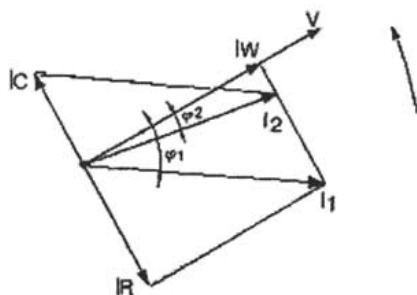


Fig. 4.1. Principio de Compensación

Podemos escribir esto como una suma de vectores: $I_1 = I_W + I_R$

Si se conecta un capacitor en paralelo, absorbiendo una corriente I_C , se podrá observar que las corrientes I_R e I_C están en oposición de fase, una con respecto a la

otra y que la corriente resultante será $I_R - I_C$, es decir, la corriente reactiva se habrá reducido significativamente.

La corriente resultante principal I_2 ha sido también reducida tanto como el ángulo de fase.

El consumo de potencia reactiva ha sido así grandemente reducida (y si $I_C = I_R$ la potencia reactiva será cero).

Otro método de trabajo es el triángulo de potencia, el cual es usado para mostrar la influencia de la capacidad, figura 4.2.

Las gráficas son solamente ilustrativas, no giran. (ver la. Parte, Cap. 4).

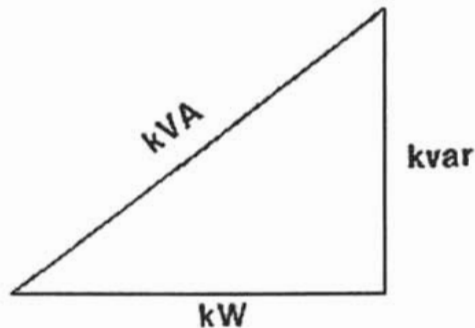


Fig. 4. 2 Triangulo que muestra los valores de potencia.

Cuando un capacitor es conectado en paralelo con una carga inductiva, genera energía, la cual reduce la carga inductiva requerida, como se puede ilustrar en la figura 4.3 del triángulo de potencia.

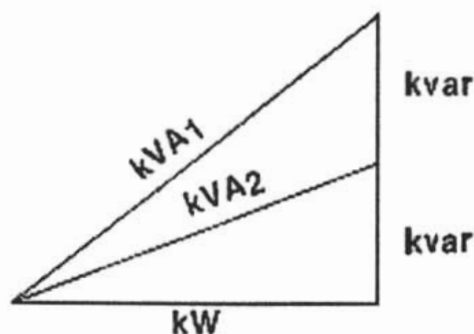


Fig. 4.3. Influencia del capacitor.

4.3 DETERMINACIÓN DEL RANGO DEL CAPACITOR

La determinación puede realizarse con cálculos simples y también es posible usar tablas o nomogramas.

El siguiente nomograma facilita el cálculo para aumentar la potencia requerida.

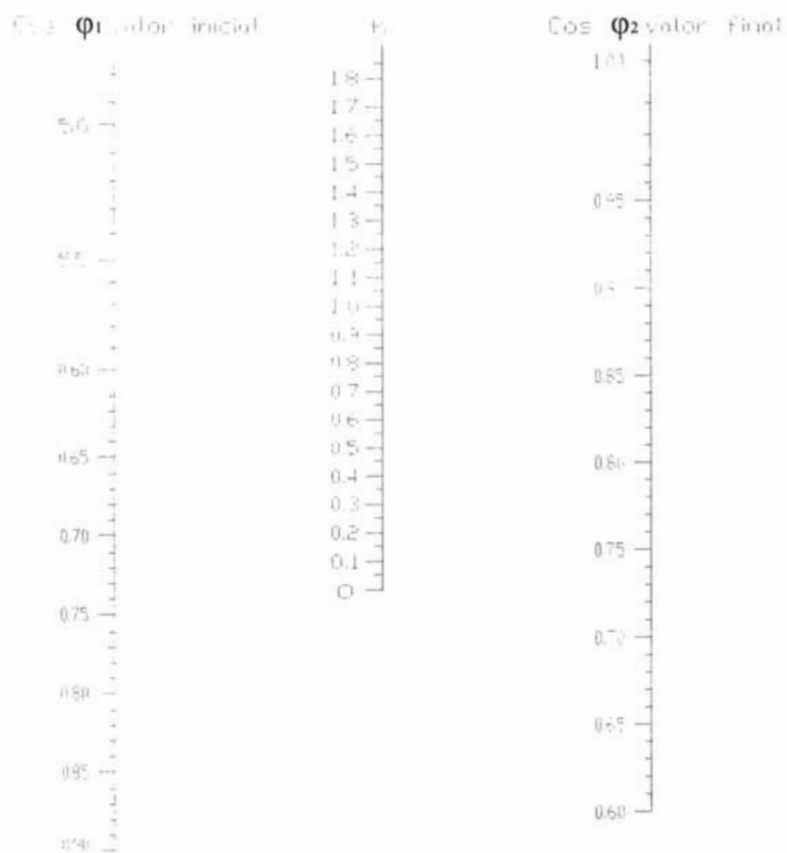
Se traza una línea recta que una el valor $\cos \varphi$ inicial con el valor $\cos \varphi$ final deseado. La columna central proporciona el factor K por la que la potencia efectiva en kW debe ser multiplicada para obtener la capacidad necesaria en kVAR. Figura 4.4

Este nomograma puede ser reemplazado por una tabla de doble entrada, dando el valor del factor K . El $\cos \varphi$ inicial está mostrado como la ordenada, el $\cos \varphi$ deseado como la abscisa. El factor K es leído en la intersección.

Factor de potencia requerido por $\cos \varphi$

$\cos \varphi$	0.70	0.75	0.80	0.82	0.85	0.87	0.90	0.92	0.94	0.95	0.96	0.98	1.00
0.20	3.88	4.02	4.15	4.19	4.28	4.33	4.41	4.46	4.51	4.57	4.59	4.69	4.90
0.25	2.85	2.99	3.12	3.17	3.25	3.32	3.38	3.45	3.50	3.54	3.58	3.66	3.87
0.30	2.16	2.30	2.43	2.48	2.56	2.62	2.69	2.75	2.81	2.85	2.88	2.97	3.18
0.35	1.66	1.79	1.93	1.98	2.06	2.12	2.19	2.25	2.31	2.50	2.38	2.47	2.68
0.40	1.27	1.41	1.54	1.59	1.67	1.72	1.80	1.86	1.93	1.96	2.00	2.08	2.29
0.42	1.14	1.28	1.41	1.46	1.54	1.59	1.68	1.74	1.80	1.83	1.87	1.95	2.16
0.44	1.02	1.16	1.29	1.34	1.42	1.47	1.56	1.62	1.67	1.71	1.75	1.83	2.04
0.46	0.91	1.05	1.18	1.23	1.31	1.36	1.45	1.50	1.56	1.60	1.64	1.72	1.93
0.48	0.80	0.95	1.08	1.13	1.20	1.26	1.33	1.40	1.47	1.49	1.54	1.61	1.82
0.50	0.71	0.85	0.98	1.03	1.11	1.18	1.25	1.31	1.37	1.40	1.44	1.52	1.73
0.52	0.62	0.76	0.89	0.94	1.02	1.08	1.12	1.22	1.28	1.31	1.35	1.43	1.64
0.54	0.50	0.68	0.81	0.86	0.94	0.99	1.07	1.13	1.19	1.23	1.20	1.35	1.56
0.56	0.46	0.60	0.73	0.78	0.86	0.91	1.00	1.05	1.12	1.15	1.18	1.27	1.48
0.58	0.38	0.52	0.65	0.70	0.78	0.85	0.92	0.98	1.04	1.07	1.11	1.19	1.40
0.60	0.31	0.45	0.58	0.64	0.71	0.78	0.85	0.91	0.98	1.01	1.05	1.13	1.34
0.62	0.24	0.38	0.52	0.57	0.65	0.70	0.78	0.84	0.90	0.93	0.97	1.06	1.26
0.64	0.18	0.32	0.45	0.50	0.58	0.63	0.72	0.77	0.83	0.87	0.90	0.99	1.20
0.66	0.12	0.26	0.39	0.44	0.52	0.57	0.65	0.71	0.77	0.81	0.85	0.93	1.14
0.68	0.06	0.20	0.33	0.38	0.46	0.51	0.59	0.65	0.71	0.75	0.77	0.87	1.08
0.70	---	0.14	0.27	0.32	0.40	0.45	0.53	0.59	0.66	0.69	0.73	0.81	1.02
0.72	---	0.08	0.21	0.27	0.34	0.40	0.48	0.54	0.60	0.63	0.67	0.76	0.96
0.74	---	0.03	0.16	0.21	0.29	0.35	0.42	0.48	0.55	0.58	0.62	0.70	0.90
0.76	---	---	0.10	0.16	0.24	0.29	0.37	0.43	0.49	0.52	0.56	0.65	0.85
0.78	---	---	0.05	0.10	0.18	0.24	0.31	0.38	0.44	0.47	0.51	0.59	0.80
0.80	---	---	---	0.05	0.13	0.18	0.26	0.32	0.39	0.42	0.46	0.54	0.75
0.82	---	---	---	---	0.08	0.13	0.21	0.27	0.33	0.37	0.40	0.49	0.69
0.84	---	---	---	---	0.03	0.09	0.16	0.22	0.28	0.32	0.35	0.44	0.64
0.86	---	---	---	---	---	0.03	0.11	0.17	0.23	0.26	0.30	0.39	0.59
0.88	---	---	---	---	---	---	0.06	0.11	0.18	0.21	0.25	0.33	0.54
0.89	---	---	---	---	---	---	---	0.06	0.12	0.15	0.19	0.27	0.48
0.92	---	---	---	---	---	---	---	---	0.06	0.09	0.13	0.22	0.42
0.94	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.03	0.07	0.16	0.36
0.96	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.09	0.28
0.98	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.21

Tabla 4.1. Tabla usada para calcular la Potencia del capacitor.



NOMOGAMA PARA DETERMINAR EL COSENO

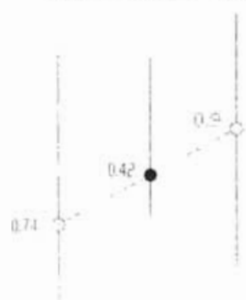


Figura 4.4 Gráfica usada para calcular la Potencia del capacitor.

Para ejemplificar la mencionado diremos que en una instalación, la carga es de 200 [kW] con un factor de potencia de 0.74. Se desea mejorar el factor de potencia a 0.9.

En la tabla 4.1 encontramos $K=0.42$.

El valor del capacitor necesario para obtener este valor deseado es por lo tanto $200 \times 0.42 = 84$ [kVAR].

El nomograma de la figura 4.4 proporciona el mismo cálculo como el hecho previamente.

Por supuesto esos nomogramas son menos precisos que la tabla antes citada. No olvide que la carga eléctrica varía y que el valor de la energía reactiva para ser compensada debe estar en un promedio de los requerimientos.

Hay varios tipos de nomogramas, como el de la figura 4.5 que permite determinar la potencia reactiva (kVAR), si la potencia instalada y el valor de $\cos \phi$ son conocidos.

NOMOGRAMA PARA DETERMINAR EL VALOR DE LA POTENCIA CAPACITIVA

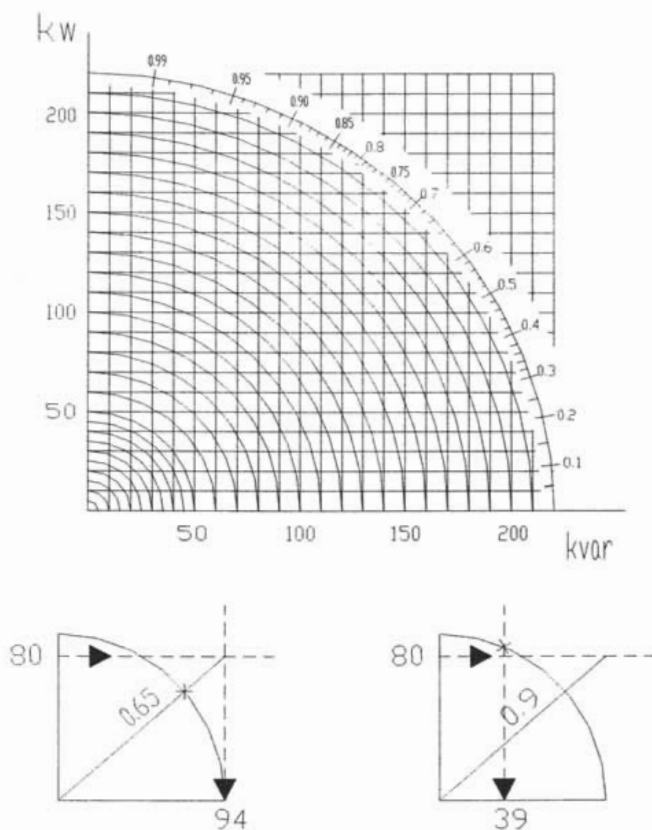


Fig. 4.5 Nomograma para determinar el valor de la potencia capacitiva

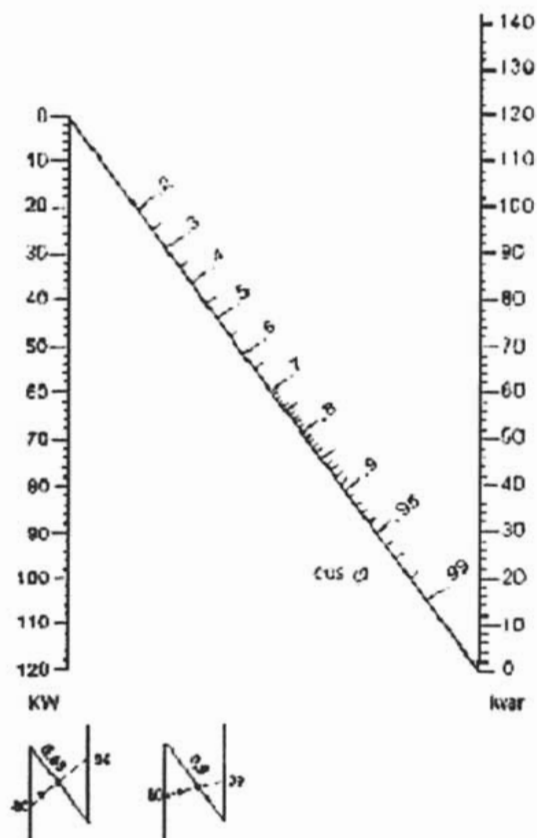
Potencia instalada 80 [kW]

Para nuevamente ejemplificar la mencionado tenemos un factor de potencia 0.65 el cual es requerido para elevar a 0.9

80 [kW] y 0.9 dan 39 [kVAR]

Potencia capacitiva = 55 kVAR

El nomograma de la figura 4.6 también proporciona la relación entre potencias activa y reactiva, para diferentes valores de $\cos \varphi$



Potencia instalada 80 kW.
 Ejemplo: Factor de potencia 0.65
 el cual es requerido elevar a 0.9
 80 kW y 0.9 dan 39 kVAR.
 potencia capacitiva = 55 kVAR

Fig. 4. 6. Nomograma que proporciona la potencia capacitiva

4.4 PROBLEMAS CON MOTORES.

4.4.1 FACTOR DE POTENCIA DE MOTORES ASINCRONOS.

Además de la potencia activa, el motor asíncrono también requiere potencia reactiva para la magnetización de los bobinados. Esta potencia reactiva es

prácticamente independiente de la carga del motor. Ello supone que la relación entre la potencia activa y la potencia reactiva disminuye con la carga al igual que el factor de potencia ver la figura 4.7.

Factor de potencia ★

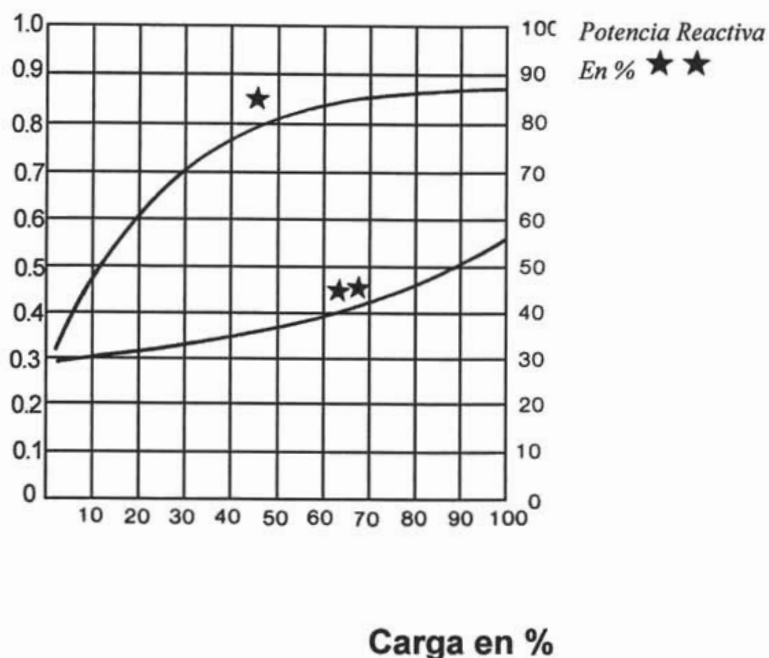
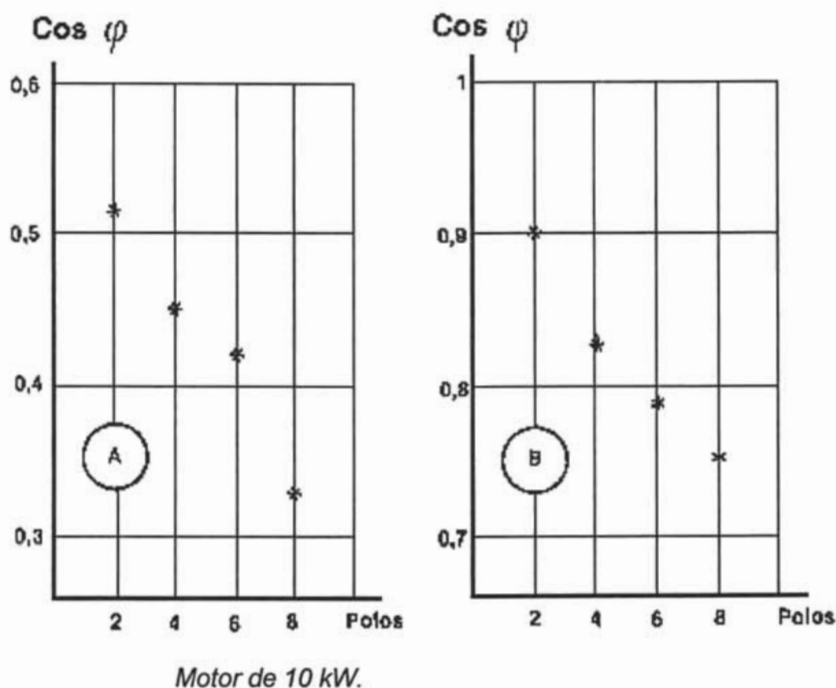


Fig. 4.7. $\cos \varphi$ de acuerdo a la carga

Al mismo tiempo, un aumento en la corriente de magnetización obtenido por el aumento del voltaje aplicado, conducirá a una disminución en el factor de potencia. Por otro lado, para el valor de potencia iguales, un motor operando en baja velocidad demandará una corriente de magnetización alta en relación con un motor de alta velocidad. El motor en baja velocidad (mayor número de polos y mayor torque)

tendrá, por lo tanto, un factor de potencia bajo (figura 4.8 A) en relación con un motor de alta velocidad (menor torque y menor número de polos) (figura 4.8 B).



1. A- baja velocidad
2. B- alta velocidad

Fig. 4.8 $\cos \varphi$ de un motor como una función de la velocidad

4.4.2 ARRANQUE DE UN MOTOR ASINCRONO

Un motor asíncrono jaula de ardilla puede ser comparado, eléctricamente hablando, con un transformador con el secundario en corto circuito. El resultado es

una corriente absorbida en el arranque muchas veces más alta que su valor de carga. Para motores de baja potencia, este exceso de corriente es tan de corta duración, que el motor puede resistirlo. Para potencias mayores, el voltaje de arranque es reducido, ya sea por acoplamiento estrella de los devanados para arranque, en el caso de motores de media potencia, conectándolos entonces en delta. Para potencias altas, se usan resistencias en serie en el motor. Esta forma de arranque tiene la desventaja de reducir el par de arranque por un valor que es mayor conforme la carga se incrementa. Un auto-transformador de arranque se usa para contrarrestar esta desventaja.

4.4.3 AUTOEXCITACION

Cuando un motor es desconectado, la energía cinética del motor y la carga que conduce, puede ser transformada en energía eléctrica si los circuitos están cerrados. Esto puede ocurrir con motores de Jaula de ardilla asíncronos.

Un capacitor de valor suficiente conectado a las terminales del estator de un motor síncrono o asíncrono cuyo rotor es activado, puede causar auto-excitación de la máquina. A continuación se describen tres casos de arranques:

- a) Motor de arranque directo.

Tomemos el caso en el que el capacitor es conectado directamente al motor (paralelo) para la corrección del factor de potencia.

En la figura 4.9 se muestra un motor conectado en estrella (Y), y en la figura 4.10 se muestra un motor conectado el delta (Δ).

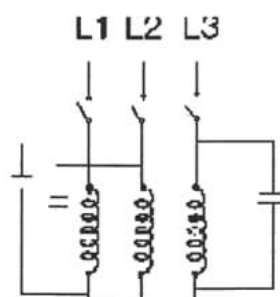
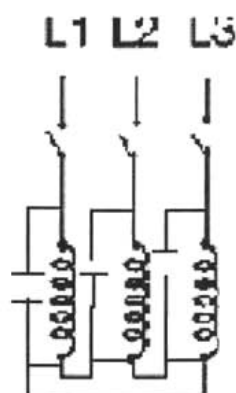


Fig.4.9 Motor conectado en Y

Fig. 4.10 Motor conectado en Δ

El punto de trabajo del motor sin carga (A) (fig 4.11) ocurre justo antes de la región de saturación. Que corresponde al voltaje nominal (V_n) y a la corriente sin carga (I_0). Supongamos que el capacitor elegido para mejorar el factor de potencia compensa al menos la corriente sin carga. Dejemos que esta corriente sea I_c (más grande que I_0) al voltaje V_n .

En el caso de auto-excitación con un interruptor común, el voltaje asumirá inmediatamente el valor dado por A1, que es el punto de intersección de las dos curvas características ver la figura 4.11. Habrá un sobrevoltaje significativo. En este instante, las pérdidas del cobre y del hierro en el motor, demandarán energía y también tendrán una acción de frenado en el rotor. Solamente si hay una pequeña inercia, el sobrevoltaje será de corta duración, porque durante la disminución de la velocidad del rotor, el voltaje disminuirá rápidamente. En la práctica, este problema se puede resolver asegurándose que la corriente del capacitor sea igual o más pequeña que la corriente de magnetización del motor. Un valor común está cercano al 90% de la corriente sin carga.

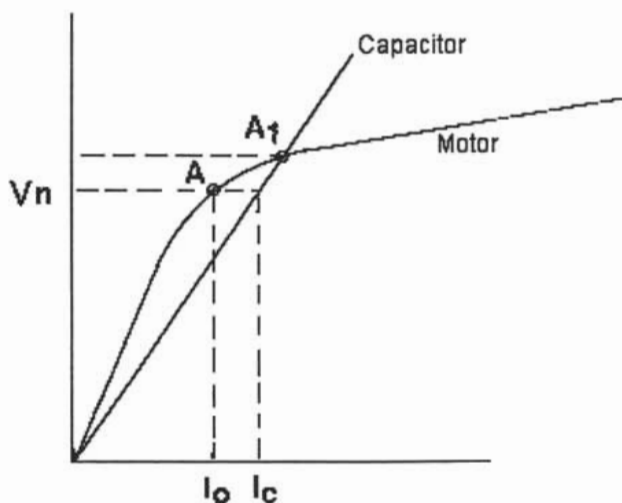


Fig.4.11. Curva de magnetización de un motor con un capacitor conectado

- b) Motor con un arreglo de arranque estrella-delta (ver figura 4.12)

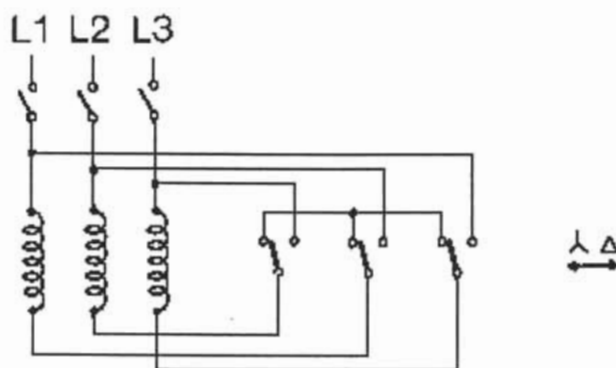


Fig. 4.12. Arreglo de arranque estrella-delta.

El sobrevoltaje arriba discutido puede ser aún más significativo si tenemos un motor con un arreglo de arranque estrella-delta que después de conectarlo a la red deja al capacitor conectado a través de los devanados en conexión estrella. La curva de magnetización para la conexión estrella sigue la curva 2 y la intersección de las curvas características para el motor y el capacitor, A_2 , corresponde al voltaje de 2.5 a 3 veces V_n como se muestra en la figura 4.13.

Para evitar este problema, uno debe usar un arrancador estrella-delta que cuando esté en la posición "paro", tenga los tres devanados completamente aislados, sin conexiones entre ellos mismos o con la red.

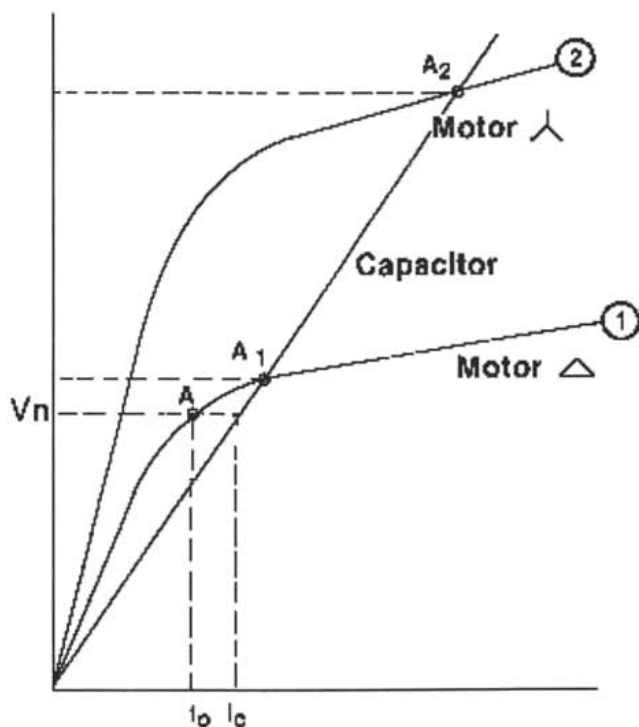


Fig. 4.13. Curva de magnetización de un motor con arreglo de arranque en estrella-delta.

c) Motor con resistencia o con arranque auto-transformador (ver figuras 4.14 y 4.15).

Este caso es similar a aquellos descritos previamente.

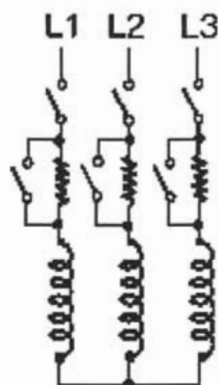


Fig. 4.14. Arranque por medio de resistencias en serie.

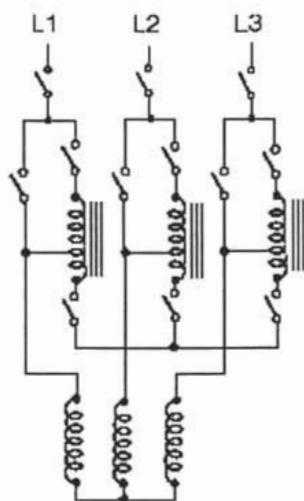


Fig. 4.15. Arreglo de arranque de auto-transformador.

4.4.4 COMPENSACION CENTRAL

El caso más desfavorable ocurre si existe solamente un motor conectado a la red de alimentación. En el instante de conmutación aparece un sobrevoltaje. Este voltaje cae rápidamente a cero y la velocidad del motor y la frecuencia disminuyen.

Es posible que pueda haber resonancia entre la inductancia de fuga y el capacitor en un cierto valor de esta frecuencia variable (en función de la velocidad). Un nuevo sobrevoltaje aparecerá de repente. Este sobrevoltaje puede causar ruptura en el motor, en el capacitor, etc.

En resumen esta demanda de potencia repentina bloqueará el rotor y puede conducir a un daño mecánico. Este sobrevoltaje puede ser reducido considerablemente si la carga tiene un valor suficientemente alto o si existen bobinas saturadas en el circuito. En caso de compensación general con capacitores fijos, es deseable conectar los capacitores a la salida del transformador, o sea, antes del interruptor de bajo voltaje. También es posible diseñar el circuito del capacitor con un relevador de voltaje mínimo o usar bancos automáticos (que en nuestro caso tienen un relevador de voltaje cero) y los cuales serán en cualquier momento adaptables a la potencia capacitiva de acuerdo al requerimiento del sistema evitando así, la auto-excitación de los motores.

4.5 INSTALACIÓN DE CAPACITORES

Veamos el caso de una pequeña fábrica que puede ser como se describe: el propietario quiere incrementar sus beneficios al instalar un capacitor de 50 [kVAR]. Un mes después de haberlo instalado, se da cuenta de que su factor de potencia ha disminuido de 0.4 a 0.18 ¿qué ha sucedido?. Durante las horas de trabajo, el capacitor de 50 [kVAR] ciertamente ha mejorado su potencia, pero durante las horas

restantes, es decir, 16 horas por día ha permanecido conectado y a generado potencia reactiva.

No olvide que algunos medidores de energía reactiva miden tanto energía capacitiva como energía inductiva.

La última meta en la corrección de factor de potencia es reducir ó aún eliminar el costo de energía reactiva en la factura de electricidad. Para hacer esto es necesario distribuir las unidades capacitores, dependiendo de su utilización, en el lado del usuario del medidor de potencia. Los capacitores pueden ser instalados en varios puntos en la red de distribución en una planta. Cuatro tipos principales de instalaciones pueden distinguirse y se mencionan a continuación:

- 1) Compensación individual
- 2) Compensación en grupo
- 3) Compensación central

Cada una de las instalaciones citadas arriba corresponde a una aplicación específica (ver figura 4.17).

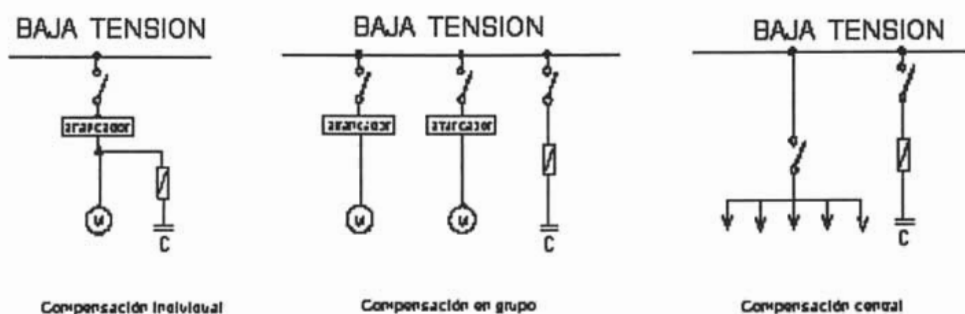


Fig. 4.17 Tres tipos de instalaciones.

4.5.1 COMPENSACION DE MOTOR INDIVIDUAL

La compensación de un motor individual es particularmente útil para motores de inducción, se obtienen las siguientes ventajas:

Instalando los capacitores cerca de la carga, la potencia reactiva es confinada al segmento más pequeño posible de la red.

El arrancador para el motor puede también servir como un interruptor para el capacitor eliminando así el costo de un dispositivo de control del capacitor solo.

El uso de un arrancador proporciona control semiautomático para los capacitores, no son necesarios controles complementarios.

Los capacitores son puestos en servicio solo cuando el motor está trabajando.

Existen diferentes formas de conectar capacitores directos a los motores como son:

a) Conexión de capacitores para motores de inducción con arranque directo.

Existen tres formas de hacer esta conexión:

- 1) Después de la protección térmica del motor. El capacitor es conectado simultáneamente con el motor. Sólo la potencia activa pasará a través de la protección térmica y su valor debe, por lo tanto, ser reducido adecuadamente. La potencia reactiva necesaria para el motor es directamente alimentada del capacitor.
- 2) Antes de la protección térmica del motor y con energización del capacitor y del motor simultáneamente. El valor de la protección térmica del motor no debe ser

reducido; este método es quizás el más útil para conseguir compensación en una planta existente, a bajo costo.

3) Conexión permanente de capacitores a una red de carga. El valor de la protección térmica para el motor no es reducido. Está instalación requiere protección con fusibles o un interruptor para el capacitor solo.

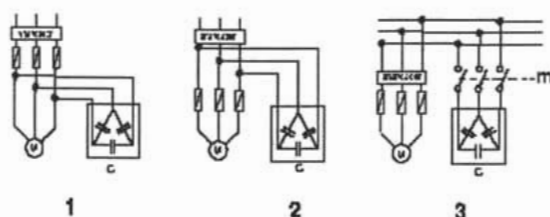


Fig.4.18 Arranque directo de un motor de inducción.

b) Conexión de capacitores para motores de inducción equipados con arrancadores Y- Δ estrella-delta.

Es necesario usar el circuito 3 de la figura 4.18 ó conectar los capacitores en forma monofásica y en paralelo con los devanados del motor de tal modo que los capacitores sean conmutados de estrella a delta (de Y a Δ) simultáneamente con los devanados del motor.

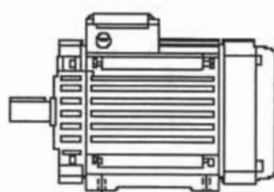
c) Rango del Capacitor.

La Compensación individual de motores no es generalmente utilizada para cuando los valores de los motores sean menores de 10 [kW]. La potencia del capacitor a conectar directamente con el motor puede ser calculado de acuerdo a uno de los siguientes cinco métodos:

1) El valor del motor expresado en hp es multiplicado por 1/3 para dar el rango del capacitor en kVAR, 40% del valor en [kW] puede ser tomado.

Ejemplo: Un motor de 30 hp debe ser compensado con 10 [kVAR]

Un motor de 50 [kW] debe ser compensado con 20 [kVAR]



2 polos 3000 r/min		4 polos 1500 r/min		6 polos 1000 r/min		8 polos 750 r/min	
*	**	*	**	*	**	*	**
0.12	0.73	0.18	0.66	0.25	0.62	0.055	0.6
0.18	0.78	0.25	0.67	0.37	0.63	0.09	0.63
0.25	0.81	0.37	0.69	0.55	0.66	0.12	0.65
0.37	0.82	0.55	0.73	0.75	0.67	0.13	0.53
0.55	0.84	0.75	0.75	1.1	0.69	0.18	0.56
0.75	0.86	1.1	0.78	1.5	0.7	0.37	0.57
1.1	0.87	1.5	0.79	2.2	0.71	0.55	0.58
1.5	0.88	2.2	0.8	3	0.71	0.75	0.6
		3	0.81			1.1	0.64
4	0.9	4	0.83	2.2	0.77	1.5	0.66
5.5	0.9	5.5	0.84	3	0.8	2.2	0.66
7.5	0.91	7.5	0.85	4	0.8	3	0.66
				5.5	0.8		
11	0.9	11	0.83			4	0.76
15	0.9	15	0.84	7.5	0.79	5.5	0.74
18.5	0.91			11	0.8	7.5	0.74
		18.5	0.84				
22	0.91	22	0.85	15	0.8	11	0.75
30	0.91	30	0.85	18.5	0.78	15	0.76
37	0.91	37	0.85	22	0.8	18.5	0.74
45	0.92	45	0.84	30	0.86	22	0.76
55	0.92	55	0.88	37	0.83	30	0.74
75	0.94	75	0.87	45	0.81	37	0.76
90	0.95	90	0.9	55	0.83	45	0.75
100	0.93	110	0.87	75	0.84	55	0.72
132	0.94	132	0.87	90	0.83	75	0.78
160	0.94	160	0.86	110	0.85	90	0.77
200	0.93	200	0.87	132	0.85	110	0.79
250	0.92	250	0.87	160	0.86	132	0.77
280	0.95	315	0.89	200	0.88	160	0.78
				250	0.87		

Fig.4.19. Características con cargas de motor 4/4 de carga.

* Potencia en Kw (1 Kw = 1.34 h.p.)

** Factor de potencia.

El motor en baja velocidad (mayor número de polos y mayor torque) tiene, un factor de potencia bajo (ver figura 4.19) en relación con un motor de alta velocidad (menor torque y menor número de polos).

2) La corriente capacitiva no debe exceder 90% de la corriente sin carga. La corriente sin carga en hojas de datos o catálogos de los fabricantes de motores. Puede también ser medida directamente sobre un motor sin carga. Una buena estimación es usualmente obtenida tomando 1/3 de la corriente nominal.

Ejemplo: Un motor trifásico de 11 kW se alimenta de una red de 380 V, 50 Hz. La corriente sin carga es 7.5 A.

Corriente capacitiva igual a $0.9 \times 7.5 \text{ A} = 6.75$

A Valor del capacitor

$$Q = \frac{\sqrt{3}VI}{1000} = \frac{1.73 \times 380 \times 6.75}{1000} = 4.44 \text{ KVAR.}$$

3) La evolución del $\cos \varphi$ puede ser examinada cuando las características del motor sean conocidas (ejemplo de M. Vanhentenryck). un motor de 150 hp, 110 [kW], 1435 r.p.m. 50 Hz voltaje 380/660 V, corriente 207/119A, $\cos \varphi = 0.86$.

Potencia Aparente $S = \sqrt{3}VI = 1.73 \times 380 \times 207 = 136.2 \text{ KVA}$

Potencia Activa $P = PAX \cos \varphi = 136.2 \times 0.86 = 117 \text{ KW}$

Pérdidas del motor $P = 117 - 110 = 7 \text{ KW}$

Eficiencia

Potencia reactiva absorbida (a 380 V)

$$P_R = PX \operatorname{tg} \varphi = \frac{110}{117} = 0.94$$

$$\text{Si } \operatorname{tg}^2 \varphi + 1 = \sec^2 \varphi \quad ; \quad \operatorname{tg}^2 \varphi = \sec^2 \varphi - 1 \dots\dots\dots(33)$$

$$\therefore \operatorname{tg} \varphi = \sqrt{\sec^2 \varphi - 1} = \sqrt{\frac{1}{\operatorname{Cos}^2 \varphi} - 1}$$

\therefore

$$\text{Substituyendo } \sec \varphi = \frac{1}{\operatorname{Cos} \varphi} = 1.163 \text{ en } \operatorname{tg} \varphi = \sqrt{\frac{1}{\operatorname{Cos}^2 \varphi} - 1}$$

$$\text{Obtenemos: } \operatorname{tg} \varphi = \sqrt{(1.163)^2 - 1} = 0.593 \quad \therefore \quad P_R = (117)(0.593) = 69.423 \text{ KVAR.}$$

Dibujemos una gráfica para 117 kW (ordenada) tenemos 69.4 (abscisa). Unamos este punto con el origen; nos da $\cos \varphi = 0.86$. A 80% de carga, la potencia será 93.5 kW, $\cos \varphi = 0.8$ es encontrado en la misma forma (ver figura 4.20).

Para una carga de 60% $\cos \varphi = 0.71$. Si un valor de \cos de 0.85 es requerido en esta carga, triángulos nuevos son dibujados (en líneas punteadas).

Necesitamos 25 kVAR capacitivos para ello. Una puede entonces checar que $\cos \phi$ a 80% de carga es igual a 0.9 y 0.94 a 100%.

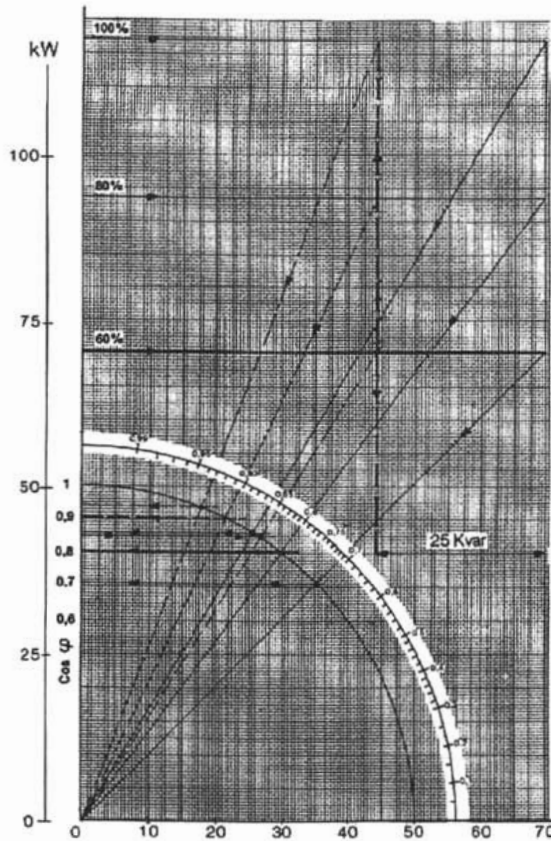


Fig. 4.20 Ejemplo que proporciona compensación para un motor de 117Kw. Y verificación del $\cos \phi$

5) Uso de una tabla.

kW	2 polos	4 polos	6 polos	8 polos
3	0.6	1.4	1.5	2.3
4	1	1.6	2	2.4
5.5	1.5	2.3	3	3.5
7.5	2.2	3	4.4	5
11	2.9	6	6	7.2
15	4.2	7	7.8	8.8
18.5	4.7	7	8.5	11.5
22	5.6	8.1	11.2	12.5
30	7.9	10.7	14	15
37	9.4	13.4	15.5	18.5
45	10.1	17	19	22
55	12	19	23	29
75	12.5	23.5	32	39
90	17	27	37	46

Fig. 4.21 Valor del capacitor para compensación de un motor trifásico.

Para utilizar la tabla de la fig. 4.21 es necesario conocer los datos del motor, por ejemplo si tengo un motor de 3 kW de 2 polos necesito 0.6 kVAR para compensar el factor de potencia.

4.5.2 COMPENSACION DE UN TRANSFORMADOR INDIVIDUAL

La carga de un transformador de distribución es usualmente desconocida; varía y puede aún ser cero (por ejemplo, durante la noche) y la compensación de potencia reactiva es, por lo tanto, usualmente limitada a la potencia consumida por el mismo transformador.

Esta potencia reactiva varía con el tipo y diseño del transformador. Si el medidor de kVAR es sensible a las corrientes inductiva y capacitiva, el valor del capacitor para ser instalado en el transformador debe ser determinado con cuidado. Una regla general es elegir un valor entre 1.5 y 2.5% del valor nominal del transformador.

Si el medidor en kVAR es solo sensible a las corrientes inductivas, el valor del capacitor es usualmente escogido entre 4 y 6% del valor nominal del transformador. Para evitar problemas de resonancia con las armónicas, uno debe checar que la frecuencia de resonancia entre la inductancia de fuga del transformador y el capacitor de compensación esté lo suficientemente alejada de las frecuencias armónicas más comunes (3', 5', 7', etc.). La frecuencia resonante puede ser calculada de la siguiente fórmula:

$$f = f_0 \sqrt{\frac{P_{cc}}{Q}} \dots\dots\dots(34)$$

En donde

f = Frecuencia resonante

f_0 = Frecuencia de fundamental del sistema

P_{cc} = Potencia de corto circuito del transformador

Q = Potencia del capacitor

Si la frecuencia obtenida está muy cercana a la de una armónica, el valor del rango del capacitor debe ser modificado.

4.5.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS CON DIFERENTES COMPENSACIONES

METODO DE COMPENSACION	CARACTERISTICAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Individual	Aplica a los dispositivos bajo condiciones de carga continuas, cada uno conectado a un capacitor de valor apropiado.	<ul style="list-style-type: none"> * kVAR producido en el punto. * Reducción de pérdidas de línea y Caídas de voltaje. * Ahorro de un dispositivo de conmutación. 	<p>Varios capacitores pequeños cuestan más que uno de tamaño total equivalente.</p> <p>Bajo factor de utilización del capacitor para dispositivos no conectados con frecuencia.</p>
En grupo	<p>Dispositivos separados son conectados a un capacitor común con su propio interruptor.</p> <p>El capacitor es usado de acuerdo a las veces en que las cargas están en uso.</p>	<ul style="list-style-type: none"> * Reducción de los costos de inversión de para capacitores. * Pérdidas y caídas de voltaje reducidas en las líneas de distribución. 	* Carga no aligerada sobre las líneas de alimentación principales.

Central	Producción de potencia reactiva en un punto solamente. En casos sencillos, el banco es conectado en el inicio y desconectado al final del trabajo.	* Mejor utilización de la capacidad de los capacitores. * Supervisión más fácil. * Puede considerarse control automático. * Mejoría general del nivel de voltaje.	* Carga no aligerada sobre la fuente principal y las líneas de distribución.
---------	--	--	--

Combinado	Compensación individual de dispositivos de carga muy grandes. Compensación central o de grupo para otros dispositivos.
-----------	---

Cuando la potencia reactiva necesaria es variable, la compensación central frecuentemente involucra bancos automáticos de capacitores.

Compensación central es siempre usada para mejorar el factor de potencia en instalaciones existentes.

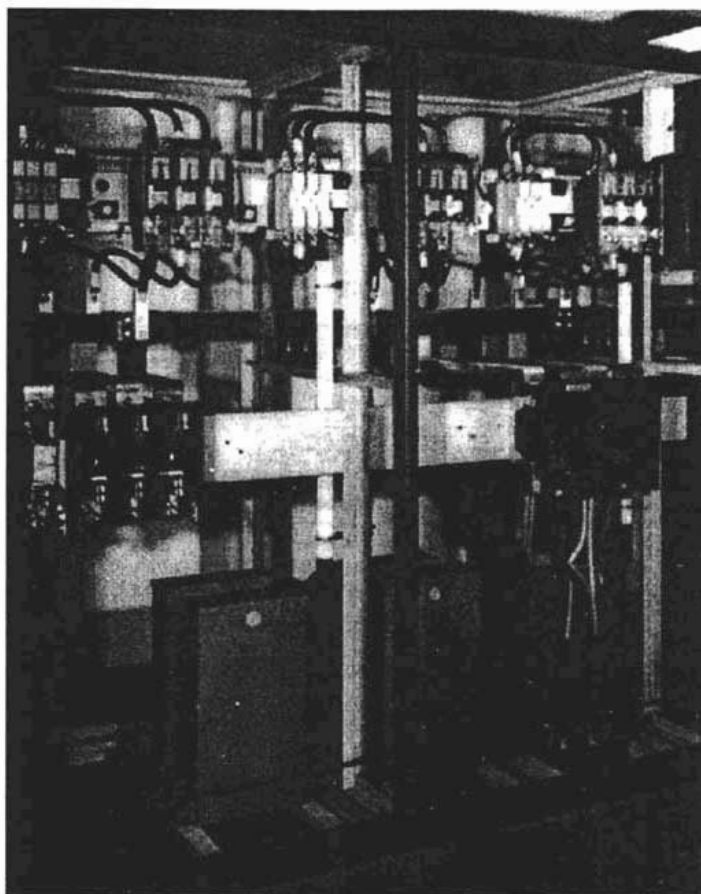


Fig. 4.22. Instalación en Bélgica de capacitores trifásicos

En la figura 4.22 vemos un banco de capacitores trifásico utilizado para compensar el factor de potencia en una planta de Bélgica en donde continuamente están entrando y saliendo en funcionamiento motores, el banco automático consta de varias partes como son:

- capacitores fijos
- Protecciones

- Controlador de factor de potencia
- Contactores para cerrar el circuito de potencia

4.6 EJEMPLO INDUSTRIAL

Tome los datos de las áreas de trabajo mostradas en la figura 4.23, las cuales están en servicio 3,000 horas por año.

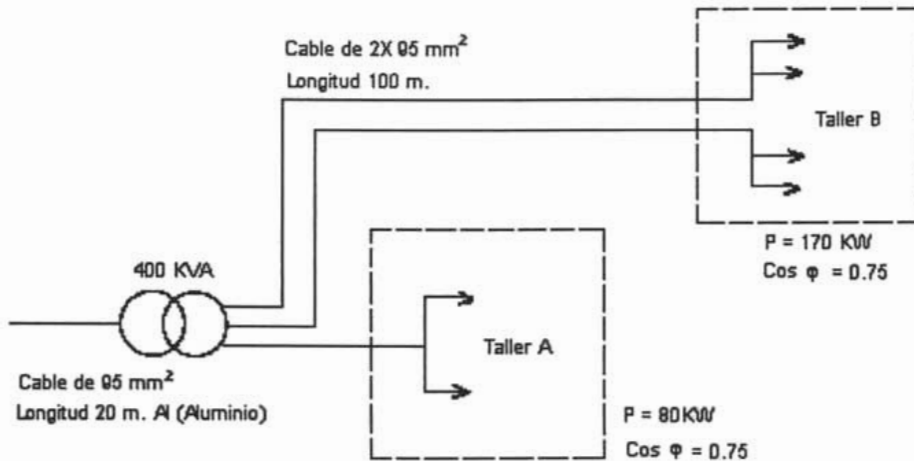


Figura 4.23 Ejemplos de áreas de trabajo

La potencia reactiva requerida por las áreas de trabajo es como sigue:

$$\text{Área de trabajo } A = 80 = \frac{\sqrt{1 - 0.75^2}}{0.75} = 70.5K \text{ var}$$

$$\text{Área de trabajo B} = 170 \times 0.88 = 149.5 \text{ [kVAR]}$$

para un total de 220 [kVAR]

La potencia reactiva del transformador es tomada para propósitos de tarifa fija como del 13% de la potencia usada: 32.5 [kVAR]

Así la potencia total demandada de la fuente es : $220 + 32.5 = 252.5$ [kVAR]

El resultado es:

- Existen pérdidas excesivas de energía activa en el cableado.
- La carga sobre el transformador del distribuidor es muy pesada.
- El costo en la energía reactiva es excesiva.

Por lo tanto, se deben instalar capacitores para reducir el $\cos \phi$, en las áreas de trabajo, por decir algo, 0.9.

Llevando $\cos \phi$ de 0.75 a 0.9, obtenemos $K = 0.4$ (fig. 4.5)

En el área A instalamos $80 \times 0.4 = 32$ [kVAR] y

en el área B instalamos $170 \times 0.4 = 68$ [kVAR]

para un total de $32 + 68 = 100$ [kVAR] ,

Ahora calculamos los ahorros hechos:

a) Pérdidas en los cables.

$$\cos \phi = 0.75$$

Área de trabajo A: 95 mm Al; 1 X 20 m; 80 kW; $\cos \varphi = 0.75$
 del nomograma 1.30 encontramos
 $70 \text{ kWh/año m X } 20 \text{ m} = 1400 \text{ kWh}$.

Área de trabajo B: 95 mm Al; 2 X 100 m; 170 kW; $\cos \varphi = 0.75$
 del nomograma $170/2 \text{ kW} = 80 \text{ kWh/año}$.
 $80 \text{ X } 2 \text{ X } 100 = 16,000 \text{ kWh}$
 para un total = 17,400 kWh.

$$\cos \varphi = 0.9$$

$$\text{Área de trabajo A: } 50 \text{ X } 20 = 1,000 \text{ kWh}$$

$$\text{Área de trabajo B: } 58 \text{ X } 2 \text{ X } 100 = 11,600 \text{ kWh}$$

$$\text{Para un total} = 12,600 \text{ kWh}$$

$$\text{Ahorro} = 17,400 - 12,600 = 5,800 \text{ kWh}$$

Considerar el costo x kWh de la localidad para saber el ahorro anual.

b) En el transformador

Para este tipo de transformador podemos suponer pérdidas en el cobre de 5 kW.

$$\text{Pérdidas con } \cos \varphi = 0.75 \quad 5 \text{ X } \left(\frac{250}{0.75 \text{ X } 400} \right)^2 = 3.5 \text{ KW}$$

$$\text{Pérdidas con } \cos \varphi = 0.9 \quad 5 \text{ X } \left(\frac{250}{0.9 \text{ X } 400} \right)^2 = 2.4 \text{ KW}$$

$$\text{Para un ahorro} = 3.5 \text{ kW} - 2.4 \text{ kW} = 1.1 \text{ kW}$$

2.- Uso eficiente de la energía eléctrica (ASEA Canadá -costo en Dll. Canadienses).
Tomar el siguiente ejemplo:

Potencia requerida: 199 [kVAR]

Consumo: 28,400,kWh

Factor de potencia: 0.85

Queremos obtener un $\cos \phi = 0.96$

Este ejemplo está basado en una planta industrial que trabaja 8 h/día, 5 días / semana. La carga comprende 4 motores de 50 H.P y cargas misceláneas de 4 kW (iluminación, etc.). El recibo de cobro de consumo eléctrico siguiente ilustra los ahorros potenciales:

Con $\cos \phi = 0.85$

costo de energía

28,000 kWh a \$2.147 kWh = \$ 607.76 más

199 [kVAR] a \$7.65/[kVAR] = \$1, 522.35

\$2, 130.11

5% de cargos \$106.50

Impuestos E y H \$111.83

Total \$2,348.44

o sea, un ahorro de 192.35 por mes.

Recibo mensual

(con 60 kVAR instalado) con

$\cos \phi=0.96$

costo de energía

28,400 kWh a 2.14/kWh = \$ 607.76

$$199 \times 0.85 / 0.96 = 176.19 \text{ kVAR}$$

$$176.19 \text{ [kVAR]} \text{ a } \$ 7.65/\text{[kVAR]} = \$1,347.85$$

\$1,955.61

5% de cargas \$97.78

impuestos E y H \$102.66

\$2,156.05

El factor de potencia es corregido cuando son instalados los capacitores.

Este ejemplo se puede representar en forma gráfica, como se muestra en la figura 4.24:

Se puede ver que para $\cos \phi$ de 0.85 corregido a 0.96 los requerimientos por kW instalados son:

Potencia reactiva: 0.33 kVAR/kW

Reducción para potencia aparente: 0.13 kVAR/kW

El promedio de potencia consumida es:

$$\frac{28000}{8_{hrs/dias} \times 5_{dias/sem} \times 4_{sem}} = \frac{28400}{8 \times 5 \times 4} = 178KW$$

Para una reducción de $178 \times 0.13 = 23$ kVA

Lo cual es un ahorro de: 23 kVA a \$7.65 kVA = \$176

Es decir, \$195.00 por mes incluyendo impuestos.

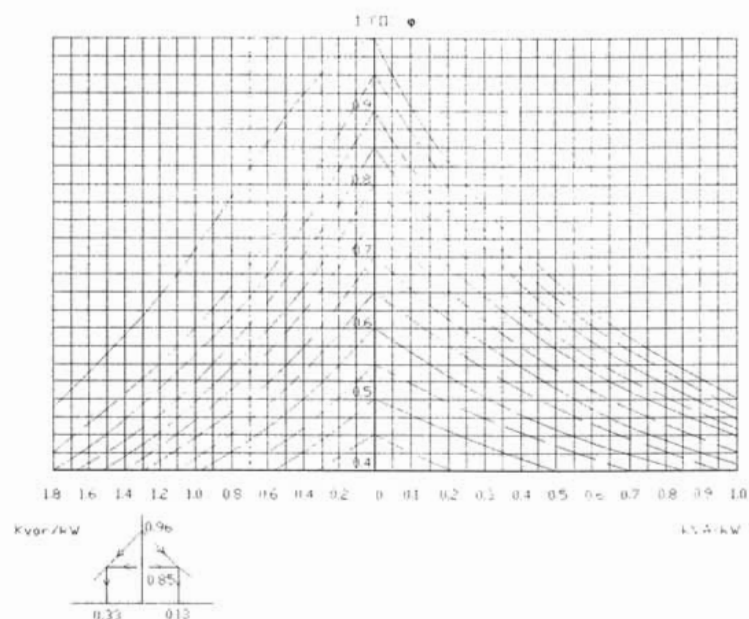


Fig. 4.24. Gráfica que ilustra los requerimientos de energía reactiva y la reducción en potencia aparente en KW de acuerdo a los valores inicial y deseado del $\cos \phi$

3.- Ejemplo de una planta industrial grande.

En la figura 4.25 se muestra la red para una fábrica equipada con un gran número de motores. La compensación central ha sido hecha con capacitores fijos instalados para la carga base y bancos automáticos para las cargas variables ó fluctuantes.

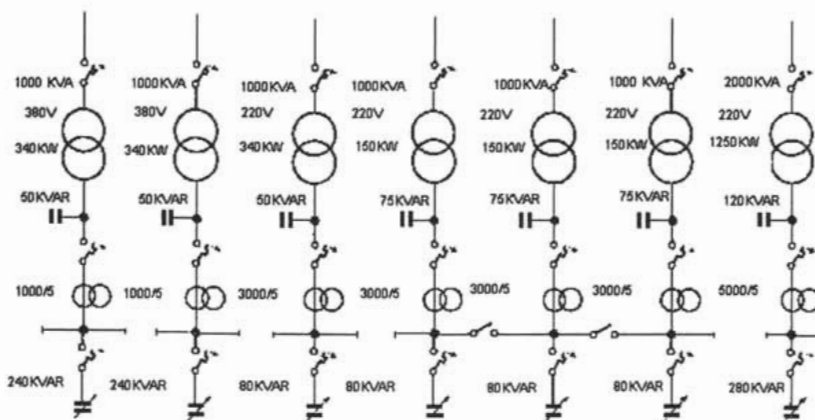


Fig. 4.25

Este ejemplo no es el único en donde la compensación del factor de potencia es hecho con compensación central.

Hemos visto antes las ventajas que se pueden obtener con la compensación individual. Por las razones prácticas siguientes, se ha elegido la compensación central.

- Los transformadores de distribución casi siempre trabajan con carga media o menos. La potencia activa consumida es algunas veces aumentada debido a las pérdidas.
- La compensación individual requiere protección individual. Esto es un ajuste que se lleva a cabo con mucho trabajo.

Por consiguiente, se escogió la compensación central. La compensación individual o combinada se usa solo en plantas nuevas donde la corrección del factor de potencia es vista de antemano desde el principio. Y se usa algunas veces cuando se amplían plantas ya existentes.

4.- Crecimiento de requerimientos

Del documento de 1981 EDF, costos en FF francos franceses

Considere de nuevo el ejemplo No.1 citado antes, donde se requiere instalar equipo adicional. Las máquinas extras a instalarse requieren una potencia activa de 85 kW en trabajo normal, y una potencia reactiva de 74 kVAR.

La potencia para el área de trabajo B tiene que ser aumentada de 170 a $170 + 85 = 255$ kW con un $\cos \phi$ sin cambio = 0.75

Ignorando el problema del factor de potencia, las máquinas nuevas deben ser abastecidas usando:

-- Un cable extra de 95 mm Al, 100 m Long. (la potencia activa permisible en cada uno de los 2 cables existentes en sólo 121 kW). Es decir, un costo de ± 7,000 FF

-- Reemplazo del transformador existente de 400 kVA por uno de 630 kVA, la potencia aparente en la ubicación del transformador aumenta de:

$$\frac{80+170}{0.75} = 333KVA \text{ a } \frac{80+255}{0.75} = 447KVA$$

Es decir, se ha deducido un costo de ± 22,000 FF, al precio de venta del transformador de 400 kVA. Un costo extra de inversión es así $7,000 + 22,000 = 29,000$ FF.

Está también involucrado un aumento sin sentido en el recibo de electricidad, sobre un notable incremento en:

* Pérdidas en la instalación interna, la cual ascenderá a $80 \times 3 \times 100 = 24000$ kW/h año para los 3 cables de distribución del área de trabajo B.

* Consumo de potencia reactiva

Para las áreas A y B tenemos

$$\frac{70.5 + 149.5 \times 255}{170} = 295 \text{ KVAR}$$

Potencia reactiva del transformador

$$0.13 \times 255 = 33 \text{ kVAR}$$

para un total de 328 kVAR.

¿Cuál es la potencia que se debe suministrar a fin de conseguir el mejor resultado posible? Por supuesto, lo mejor sería si colocamos un tercer cable y así evitamos cambiar el transformador. Mientras, al mismo tiempo, dejamos algún cuarto para maniobras para asegurar que la instalación interna existente, no llegue a un punto de saturación total, y poder todavía enfrentarse con picos de nueva producción si es necesario.

A fin de asegurar que los dos cables que alimenta el área B pueda llevar la potencia necesaria ($170 + 85 = 255$ kW) sin sobrecalentamiento, es necesario previamente mejorar el $\cos \phi$.

La potencia reactiva de los capacitores debe ser:

$255 (0.87 - 0.75) = 30.6$ kVAR, pero la potencia aparente total en la estación de transformador será todavía excesiva a 425 kVA.

Para llegar a un valor de potencia aparente aceptable, 380 kVA por ejemplo, los capacitores tienen que ser instalados en el área B que tiene un valor de potencia q tal que:

$$(380 \text{ kVA})^2 = (80 \text{ kW} + 255 \text{ kW})^2 + (70 \text{ kVAR} + 224 \text{ kVAR} - q)^2$$

para $q = 113 \text{ kVAR}$

Redondeando a 110 kVAR, el $\cos \phi$ del área B será llevado a 0.92. Se deben agregar 24.5 (25) kVAR.

Así en total, 135 kVAR pueden útilmente ser instalados en el área B. llevando los requerimientos de potencia reactiva a:

$$224 - 135 = 89 \text{ kVAR.}$$

El costo estará alrededor de 19,000 FF, pero se pueden obtener ahorros considerables.

Primero en costos (o sea $22,000 + 7,000 - 19,000 = 10,000 \text{ FF}$) ya que no hay necesidad de reforzar la instalación interna.

Las pérdidas de energía activa por los cables disminuirá $\pm 1,000 \text{ kWh}$ en relación a lo que estos tendrían sin capacitores y 3 cables.

El ahorro será de $\pm 260 \text{ FF}$ por año.

El consumo de energía reactiva caerá:

$$80 + 255 = 335 \text{ kW durante } 3000 \text{ h} - \cos \phi \text{ de } 0.75 \text{ a } 0.92$$

lo cual da:

$$\frac{335}{0.75} - \frac{335}{0.92} \times 3000 = 247,600 \text{ kVARh por lo menos.}$$

La tarifa, calculada sobre el consumo de energía activa, permanecerá a 460,000 kVARh, o sea, 20,000 kVARh serán bonificados a 260 FF por año, y 247,000 - 20,000 = 227,600 kVARh no se pagarán, teniendo un ahorro anual de 9,180 FF.

Así, además de un ahorro inmediato en costos de inversión, los costos de electricidad debido a equipar el área de trabajo B con capacitores, se reducirá a $260 + 260 + 9,180 = 9,700$ FF por año.

5. Resultados de compensación

De los ejemplos anteriores, puede verse que si uno desea mejorar el $\cos \varphi$ de una instalación:

Los capacitores se pagan por sí mismos en menos de un año .

Los ahorros hechos son divididos como sigue:

- 85/90% por reducción en el precio pagado para energía eléctrica.
- 5/10% por reducción de pérdida de wattaje en cables.
- \pm 5% por reducción en pérdidas del cobre en el transformador.

El beneficio es, por lo tanto, principalmente debido a los ahorros en los costos de tarifa.

En la figura 4.26 se muestra la instalación de un banco de capacitores.

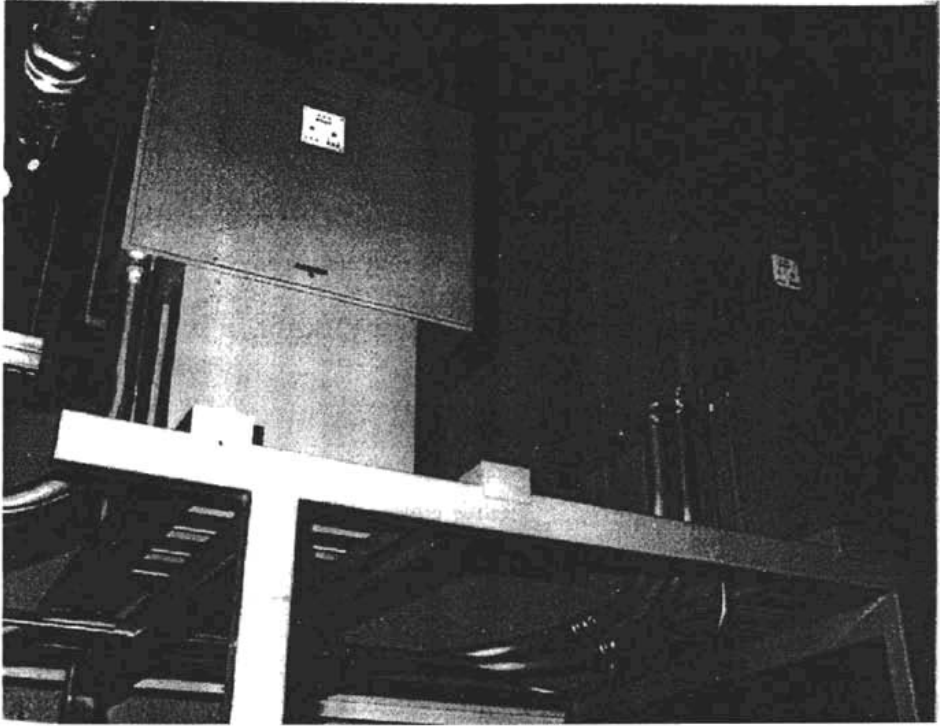


Fig. 4.26. Instalación de un banco automático de capacitores en Canadá

5. ARMÓNICAS

5.1. INTRODUCCIÓN

En un sistema ideal de potencia, el voltaje suministrado y la corriente de carga son dos señales senoidales perfectas. En la práctica, sin embargo, las condiciones nunca son ideales, por lo que existen algunas formas de onda que presentan distorsiones. Esta deformación de la senoidal perfecta usualmente suele expresarse en términos de distorsión armónica⁽⁸⁾ de las señales de voltaje y de corriente.

En los sistemas de potencia la distorsión armónica no es un fenómeno nuevo, ya que los esfuerzos por mantener dicho efecto dentro de valores aceptables han aparecido desde los inicios de los sistemas eléctricos de potencia. En esos tiempos la distorsión fue causada por la saturación magnética de los transformadores o por ciertas cargas de tipo industrial, tales como hornos eléctricos o soldadoras. Los mayores efectos que producen las armónicas, se presentan en las máquinas síncronas y en las de inducción, en los teléfonos provocando interferencia y dañando capacitores de potencia de cualquier sistema eléctrico.

En los modernos sistemas eléctricos de potencia las armónicas acompañan con mucha frecuencia a la utilización de la energía eléctrica, principalmente porque han aumentado enormemente las cargas no lineales que producen armónicas.

Además de los dispositivos generadores de armónicas, el problema algunas veces se ve agravado por la instalación de capacitores en plantas industriales para la

⁽⁸⁾ El término armónicas se originó en el campo de la acústica, en donde se refiere a la vibración de una señal a una frecuencia que es el múltiplo de la frecuencia básica o fundamental. Similarmente para señales eléctricas, una armónica está definida como una componente senoidal de una onda periódica o como una cantidad de frecuencia que es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental.

corrección del factor de potencia o la utilización de capacitores para el control de voltaje en sistemas de distribución.

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

5.1.1. CIRCUITOS LINEALES

Si el circuito usado es lineal, es decir, si tiene la misma impedancia no importa el voltaje (cuando la carga es resistiva solamente) la corriente también será en forma senoidal como se ilustra en la figura 5.1.

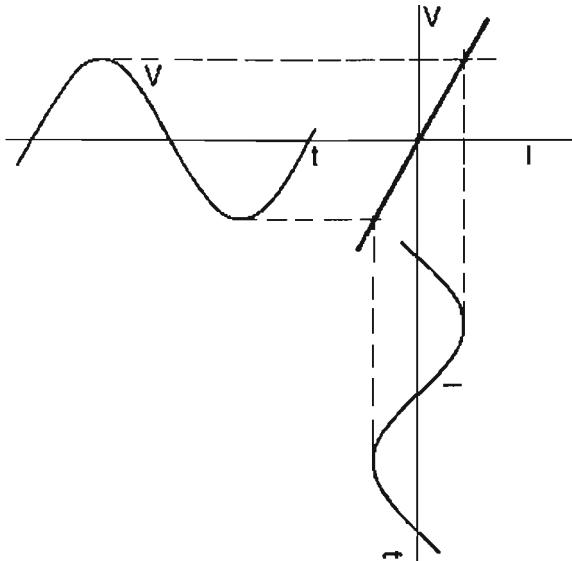


Fig.5.1 Circuito lineal. La corriente es senoidal, como el voltaje.

Si la carga consiste de una inductancia funcionando bien abajo de la saturación, el circuito es también lineal.

Este es también el caso para un circuito capacitivo.

Esto es lo mismo para un circuito monofásico que alimenta un circuito lineal por medio de un rectificador de doble alternancia (positiva y negativa).

5.1.2. CIRCUITOS NO LINEALES

a) Circuito de inducción

Un circuito de inducción consiste en un circuito magnético alrededor del cual está devanado una cierta cantidad de alambre enrollado conocido como vueltas.

La corriente fluirá a través de esas vueltas creando un cierto campo magnético. Esta curva está desafortunadamente lejos de ser lineal. A mayor inducción, la curva de magnetización es deformada más y la corriente resultante de la aplicación de un voltaje senoidal es entonces deformada ver figura 5.2.

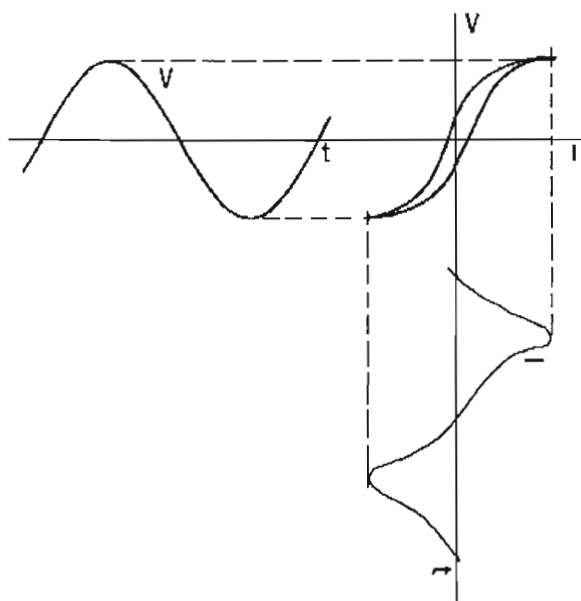


Fig. 5.2 Circuito no lineal de una inductancia saturada

Puede ser visto, por lo tanto, que aunque el voltaje es CA y senoidal, la corriente que fluye en el circuito no es absolutamente senoidal.

b) Circuito de lámparas de descarga.

El ciclo de trabajo de una lámpara de descarga, ya sea fluorescente, de vapor de mercurio, o de vapor de sodio, se distingue por los siguientes elementos.

- El voltaje debe alcanzar un cierto punto antes de que la corriente inicie el flujo en el tubo. Este es el voltaje de arranque.
- Inmediatamente después este voltaje en las terminales del tubo disminuye y permanece constante para cualquier corriente que fluye en el tubo. Este es el voltaje de descarga.

- El tubo es entonces apagado.

La corriente entonces tendrá una forma la cual no es senoidal.

Los tubos de descarga son por lo tanto, elementos no lineales.

En la figura 5.3. vemos la deformación de la onda será amplificada si la inductancia de limitación de corriente es saturada.

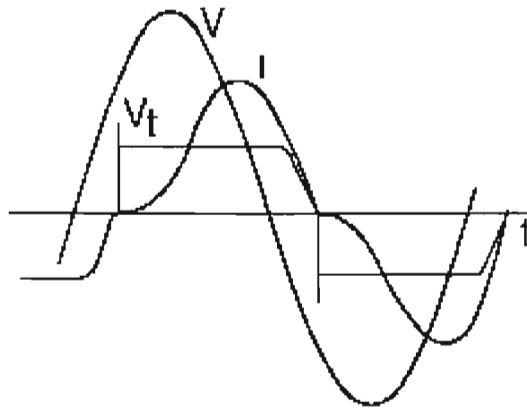


Fig.5.3. Ondas de voltaje y corriente de un tubo de descarga

- c) Rectificadores.

Un elemento rectificador puede ser descrito simplemente como un elemento que permite a la corriente fluir en una dirección y no en la otra. Si un rectificador es colocado en serie con un receptor, una resistencia por ejemplo, puede verse que la corriente fluye sólo durante cada alternancia. La corriente es también muy diferente aquí que una corriente senoidal en C.A como se ilustra en la figura 5.4.

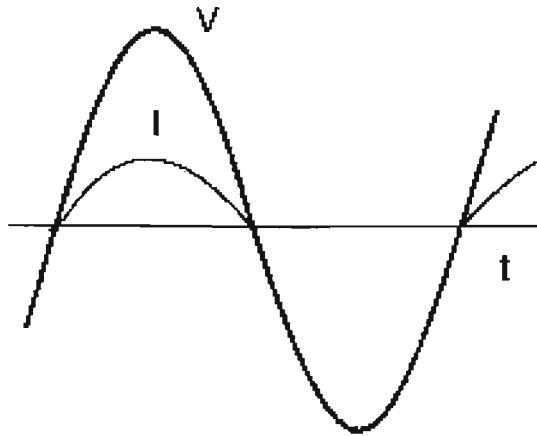


Fig. 5.4. Ondas de voltaje y corriente en un circuito de una Sola fase con rectificador de media onda (una alternancia)

Si por otro lado, colocamos un circuito rectificador de una sola fase con doble alternancia, tendremos un circuito idéntico y senoidal en ambas alternancias, por ende, un circuito lineal.

Si usamos una fuente de 3 fases ya sea en alternancia individual o doble no tomamos toda la corriente en la fase, lo cual significa que la corriente será cortada en cada fase y así, no es senoidal. Puede verse que la rectificación es generalmente un circuito no lineal, creando disturbios en la onda de corriente.

d) El Tiristor.

Este funciona de una manera similar al descrito arriba, excepto que el momento de conducción es variable y es controlado por el usuario (ó algún requerimiento), figura 5.5 y 5.6.

La corriente está también lejos de ser senoidal.

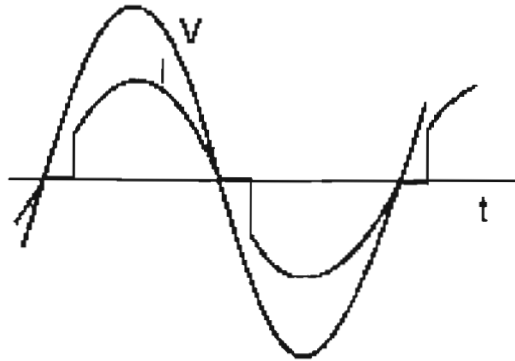


Fig. 5.5. Onda de corriente en conexión simple/doble alternancia

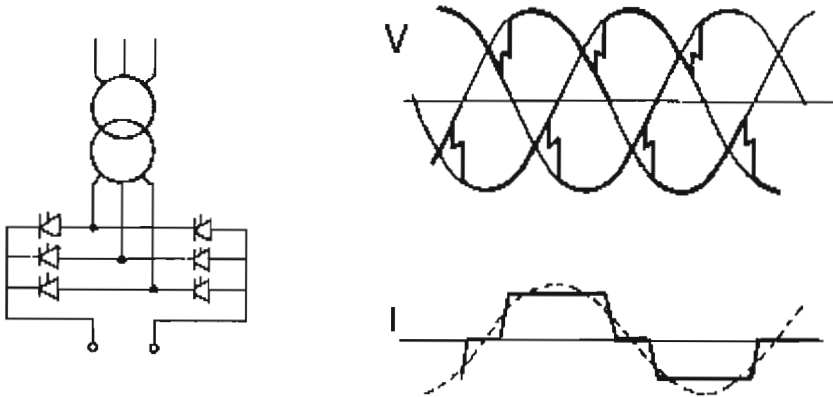


Fig. 5.6. Conexión doble trifásica (hexafásica) y ondas de voltaje y corriente

5.2. SERIES DE FOURIER

Hemos visto que en la práctica las ondas de voltaje y corriente son rara vez senoidales. Al contrario, esas ondas son en general funciones periódicas de tiempo.

Una distorsión periódica de la forma de onda del voltaje o la corriente puede ser expresada en términos de la serie de Fourier como sigue:

$$V(t) = V_1 \cos(\omega t + \theta_1) + V_2 \cos(2\omega t + \theta_2) + V_3 \cos(3\omega t + \theta_3) + \dots(35)$$

$$I(t) = I_1 \cos(\omega t + \Phi_1) + I_2 \cos(2\omega t + \Phi_2) + I_3 \cos(3\omega t + \Phi_3) + \dots(36)$$

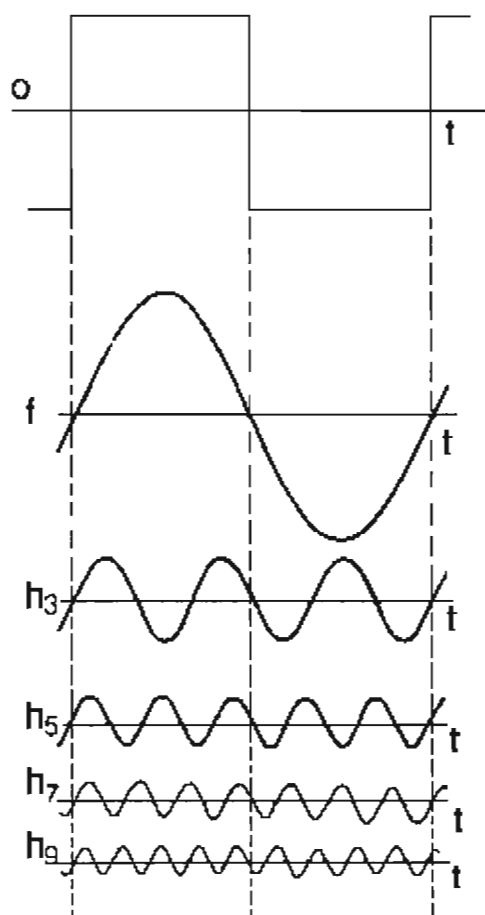
donde:

V_1, I_1	valor del voltaje y corriente de pico fundamental
$V_n, I_n; n = 2, 3, 4 \dots$	valor pico del voltaje y la corriente de la n-ésima armónica
$\Theta_n, \Phi_n; n = 2, 3, 4 \dots$	fase del voltaje y la corriente de la n-ésima armónica

El conocimiento de los parámetros $V_n, I_n, \Theta_n, \Phi_n, n = 1, 2, 3, 4, \dots$ determinan completamente la forma de onda del voltaje y la corriente.

5.2.1. DESARROLLO DE UNA FUNCIÓN PERIÓDICA

En 1812 el matemático francés Joseph Fourier demostró que una función periódica no senoidal puede ser expresada por funciones senoidales, cuyas amplitudes, fases, y frecuencias varían en progresión aritmética. Si el valor promedio no es cero, durante un periodo dado de la función, se debe agregar una constante a la suma de las funciones senoidales como se ilustran en la figura 5.7. En general escribimos:



$$i = I_0 + I_1 \text{ Sen } (wt - \theta_1) \\ + I_2 \text{ Sen } (wt - \theta_2) \\ + I_3 \text{ Sen } (wt - \theta_3)$$

Fig. 5.7. Análisis de una onda periódica en sus armónicas principales.

El término $I_1 \text{ Sen}(wt - \theta_1)$ es el término fundamental de la función I . Los siguientes términos constituyen las armónicas de la misma función.

Por ejemplo: el término $I_3 \text{ Sen}(3wt - \theta_3)$ es conocido como la armónica de orden 3, ó solo la 3a armónica.

Para entender en realidad lo que esto significa, uno debe tener en mente que la curva periódica dada, la curva rectangular de la fig. 5. 7. por ejemplo, será recuperada si a cada momento, uno totaliza la suma de las ordenadas de las curvas, que representan los diferentes términos de las series, es decir, las armónicas.

Casos especiales.

Una onda cuyo valor promedio no es cero contiene un componente continuo, figura 5.8

Una onda cuya forma es idéntica para los valores positivo y negativo contiene sólo funciones Seno y armónicas impares, figura 5.9

Una onda cuya forma negativa es la imagen de la forma positiva contiene sólo funciones coseno, figura 5.10.

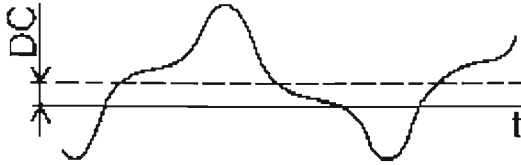


Fig. 5.8. Onda con componente continuo.

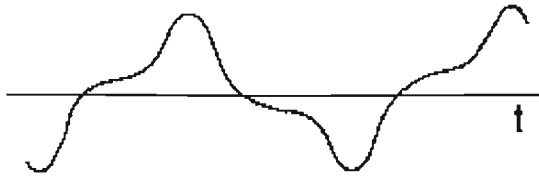


Fig.5.9. Onda con armónicas impares

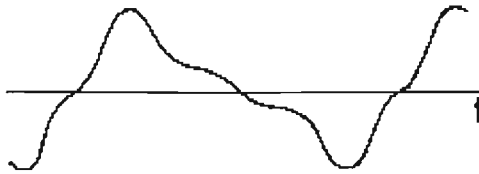


Fig. 5.10. Onda con armónicas pares.

5.2.2. MEDICIÓN DE ARMÓNICAS

Existen aparatos *Analizadores de Armónicas* por medio de los cuales la amplitud y la frecuencia de las diferentes armónicas pueden ser medidas.

Un analizador de armónicas incluye:

- Un circuito de entrada por medio del cual el voltaje suministrado puede ser reducido, o la corriente puede ser transformada en voltaje usando una carga puramente resistiva.
- Una serie de circuitos sintonizados a varias frecuencias de la armónica.
- Un amplificador de calibración, si se requiere.
- Un dispositivo de medición, dando ya sea una medición instantánea o un registro para un periodo dado.

Los avances modernos en electrónica han resultado en reducción de peso (reemplazo de filtros inductivos por electrónica) y reducción en tamaño y costo.

5.2.3. VALOR EFECTIVO CON ARMÓNICAS

Mencionaremos los puntos importantes para conocer el valor efectivo de las armónicas:

a) Medición.

Debe recordarse que una onda no senoidal consiste de numerosas ondas de frecuencia múltiple, figura 5.11.

El aparato de medición, ya sea un voltmetro ó un ampermetro si se diseño para la fundamental (50-60 Hz), tiene curvas de respuesta que tiende a ser malo con los aumentos de frecuencia lo cual significa que existe un riesgo considerable que la lectura este fuera de la realidad. Un buen aparato mostrará sobre su carátula el

valor limite para uso de frecuencia. Debe ser posible al menos medir hasta la armónica 11 como lo ilustramos en la figura 5.12.

Estas observaciones también se aplican al transformador de intensidad y especialmente para la pinza de gancho para medir Amperes. Un probador de gancho ligero y barato no se debe usar en redes que contengan armónicas.

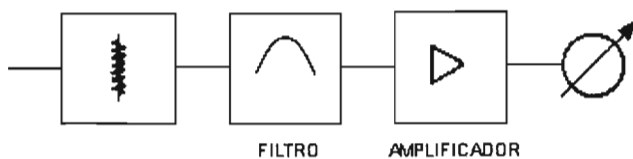


Fig.5.11. Diagrama general de un analizador de onda

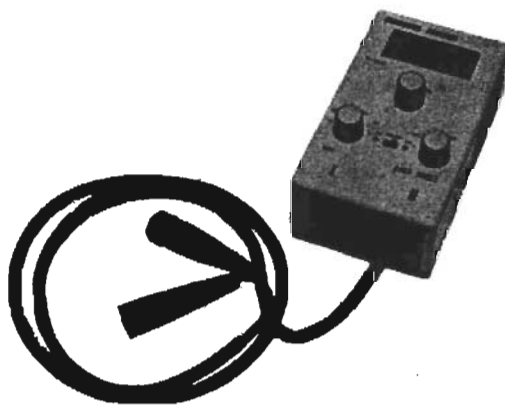


Fig.5.12. Fotografía de una analizador portátil

b) Cálculo

Cuando el valor de la fundamental y los valores (voltaje-corriente) de las frecuencias armónicas son conocidos, el valor efectivo puede ser calculado. Tenemos:

$$I^2 = I_f^2 + I_{h1}^2 + I_{h2}^2 + I_{h3}^2 \dots \dots \dots (37)$$

El cuadrado del valor efectivo es igual a la suma de los cuadrados de la fundamental y los valores armónicos.

La expresión es usualmente analizada agrupando la suma de los cuadrados del valor armónico. Esta es la magnitud de la corriente armónica.

Tenemos:

$$I = \sqrt{I_f^2 + \sum I_h^2} \dots \dots \dots (38)$$

Esta ecuación puede ser dada como una gráfica ver la figura 5.13.

La onda fundamental de corriente y la corriente armónica están en cuadratura (es decir, con una diferencia de fase de 90°).

Si por ejemplo, la corriente armónica es igual al 20% de la corriente fundamental. la corriente total es aumentada en solo 2%.

Aun un buen amperímetro no detectará la presencia de armónicas.

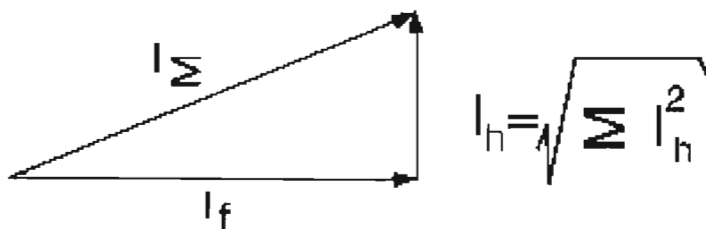


Fig. 5.13. Gráfica de corrientes (o voltajes).

5.2.4. EFECTOS DE LAS ARMÓNICAS

Esquema del circuito

Una instalación eléctrica industrial es muy compleja, desde un punto de vista eléctrico, como se ilustra en un diagrama eléctrico de la figura 5.14.

Para simplificarlo, tenemos:

- La energía distribuida por cables, los cuales tienen una resistencia óhmica (ρ) y una impedancia inductiva (λ).

Estos dos elementos están en serie con la carga o receptor.

- El receptor en sí mismo generalmente consiste de la carga activa (o resistiva) R, la carga reactiva de la bobina (L) y algunas veces un capacitor (C).

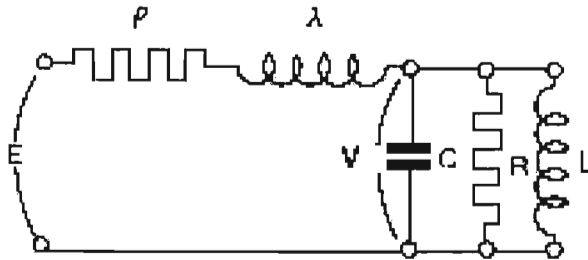


Fig.5.14. Diagrama simplificado de una instalación

A continuación se darán a conocer los problemas que presentan los aparatos del sistema de potencia cuando existe en la red la presencia de armónicas ya sea en el voltaje o en la corriente de la red.

Transformadores

Los efectos de las armónicas en los transformadores son:

- Incremento de pérdidas en el cobre
- Incremento de pérdidas en el hierro
- Posible resonancia entre las bobinas del transformador y la capacitancia de la línea
- Esfuerzos de aislamiento

Máquina Rotatoria

Los efectos de las armónicas en la máquina rotatoria son:

- Incremento del calentamiento debido a pérdidas en el hierro y en el cobre
- Cambios en el par electromagnético que afecta a:

- La eficiencia de la máquina
- Las oscilaciones torsionales de la máquina

El nivel y la importancia de estos efectos dependen directamente del diseño de la máquina eléctrica y de los tipos de fuentes de armónicas.

Bancos de capacitores

La impedancia del capacitor decrece con la frecuencia. Por esta razón, los bancos de capacitores actúan como resumidero de las armónicas. En un sistema con fuentes armónicas distribuidas las armónicas convergerán el banco de capacitores. Como un resultado de esto, los problemas con armónicas se muestran primero en los bancos de capacitores. Cuando el problema de armónicas es muy severo; en el banco de capacitores se manifiesta de inmediato con la operación de los fusibles y fallas en el tanque. De esta forma la presencia de armónicas en el banco de capacitores puede causar:

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

Mecanismos de interrupción

Las componentes armónicas en la forma de onda de la corriente pueden afectar la capacidad de interrupción de tales mecanismos. Los dos efectos que se presentan en los interruptores cuando existen armónicas son:

- Afecta la tasa de variación del voltaje transitorio de recuperación y el valor máximo del voltaje transitorio
- Afectan la operación de la bobina de desconexión

Relevadores de protección

Las armónicas del sistema afectan la operación de los relevadores de manera muy compleja. Un estudio canadiense determina los efectos de las armónicas en los relevadores de protección de la siguiente forma:

- Los relevadores presentan una tendencia a operar mas lento y/o con valores de pickup más altos en lugar de operar más rápido y/o con bajos valores de pickup.
- Los relevadores estáticos de baja frecuencia fueron susceptibles a cambios importantes en sus características de operación
- En muchos casos, los cambios en las características de operación fueron relativamente pequeños en un moderado rango de distorsión esperado durante la operación normal.
- Dependiendo de la fabricación los sobrevoltajes y sobrecorrientes en el relevador presentan varios cambios en las características de operación.
- Dependiendo del contenido armónico los pares de operación se pueden invertir
- Los tiempos de operación pueden variar mucho como función de la mezcla de frecuencias en la cantidad medida
- Los relevadores de impedancia tipo balancín pueden presentar sobrealcance o bajo alcance
- Las armónicas pueden deteriorar la operación rápida de los relevadores diferenciales. Varias pruebas indicaron que los relevadores pueden presentar restricción total.

En general, los niveles de armónicas requeridos para causar mala operación de los relevadores; deberán ser más grandes que los niveles que se pueden considerar como límites máximos aceptables en otros equipos. Por lo regular necesitan niveles armónicos entre el 10 y 20% para causar problemas de operación a los relevadores excepto en circunstancias poco usuales.

Aparatos de medición

Los medidores e instrumentos son afectados por la presencia de voltajes y corrientes armónicas. Aparatos de disco de inducción, tales como wattorímetros y relevadores de sobrecorriente son diseñados y calibrados solamente para la corriente y el voltaje fundamental. La presencia de voltajes y corrientes armónicos generan un par electromagnético adicional en el disco causando operaciones erróneas. Los medidores de estado sólido pueden medir potencia basándose en la forma de onda. En general la distorsión debe ser severa (mayor del 20%) para que se detecten errores importantes.

Equipo electrónico

La distorsión de voltaje y corriente pueden llevar a alterar la operación del equipo electrónico. Estos trastornos pueden dividirse en dos categorías: trastorno en la operación del convertidor y trastornos en la operación de la carga del convertidor. La diversidad de diseños de convertidores y el amplio rango de cargas alimentadas hacen difícil el análisis general de los convertidores.

Aparatos de iluminación

Las lámpara incandescentes son uno de los dispositivos de este grupo de carga muy sensibles a los efectos del incremento de temperatura. Entre mas grandes sean los valores de distorsión la vida de la lámpara se acortará significativamente, y los cambios

en el voltaje fundamental, son relativamente más significativos que los cambios en el factor de distorsión.

5.2.5. CORRIENTES ARMÓNICAS

a) Caso inductivo.

La impedancia de una inductancia aumenta con la frecuencia.

$$Z_L = 2\pi fL \dots\dots\dots(39)$$

Así la corriente decrece con el aumento de la frecuencia a voltaje constante. El resultado es también que la caída de voltaje en la fuente principal, debido a la inductancia, será tan alta como aumenta el rango de la armónica.

b) Caso Capacitivo

La impedancia del capacitor disminuye si la frecuencia aumenta

$$Z_c = \frac{1}{2\pi fC} \dots\dots\dots(40)$$

La corriente que fluye a través del capacitor se eleva conforme se incrementa la frecuencia (o como el rango de la armónica es más alto).

Tome por ejemplo un capacitor alimentado a 380 V y usando una corriente de 20 A, superponemos 40% de la 5ª armónica sobre la onda de voltaje, y el valor de voltaje efectivo será:

$$380 \sqrt{1 + \left(\frac{40}{100}\right)^2} = 409V$$

es decir, 8% mas alto.

El valor de la corriente efectiva será:

$$20 \sqrt{1 + 5^2 X \left(\frac{40}{100}\right)^2} = 44.7A$$

O sea, mas del doble. Si el 40% estuviera en la 7ª armónica, la corriente efectiva habría sido:

$$20 \sqrt{1 + 7^2 X \left(\frac{40}{100}\right)^2} = 59.5A$$

O sea, 3 veces más grande con relación a 20 A. (para el mismo sobrevoltaje).

5.2.6. RESONANCIA EN SERIE

Hemos visto que la impedancia de una inductancia aumenta con la frecuencia, y que es a la inversa en el caso de los capacitores. Si una inductancia es colocada en serie con un capacitor, la impedancia total será igual a la suma de las impedancias inductivas y capacitivas.

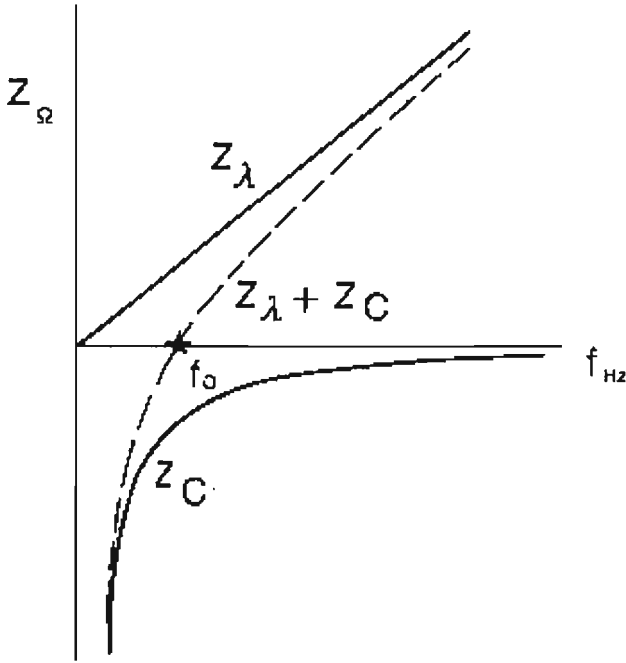


Fig.5.15.Impedancias en relación con la frecuencia.

Así como una aumenta con la frecuencia y la otra disminuye, se entiende que para una cierta frecuencia (f_0) habrá una igualación del valor absoluto de ambas impedancias como se ilustra en la figura 5.15.

Tenemos:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{\lambda C}} \dots\dots\dots(41)$$

Para esta frecuencia, la corriente está limitada solamente por la resistencia (ρ) del cableado de la fuente, y como ésta es usualmente baja, el valor de la corriente será alto.

Esta corriente crea un sobrevoltaje muy alto que fluye a través del capacitor y del circuito.

La relación entre este sobrevoltaje y el voltaje nominal es conocida como Q y llamada el factor de sobrevoltaje o factor de calidad.

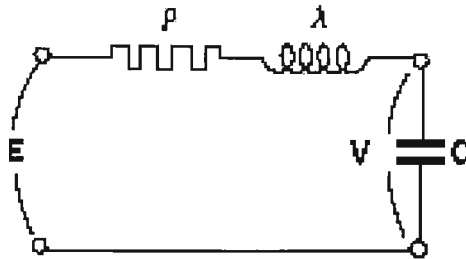


Fig.5.16. Capacitor conectado en una línea sin carga

Transformando la ecuación antes citada en potencia y proponiendo $n = f_0/f$ en el que n es el rango de la frecuencia de resonancia. Tenemos:

$$n = \frac{f_0}{f} = \sqrt{\frac{E}{\omega\lambda}} = \sqrt{\frac{\text{Potencia de cortocircuito}}{\text{Potencia del capacitor}}} \dots\dots\dots(42)$$

El rango de la frecuencia de resonancia puede obtenerse de la raíz cuadrada de la relación entre la potencia de cortocircuito y el rango del capacitor (se asume implícitamente que la resistencia del circuito es mínima).

La atenuación del sobrevoltaje de resonancia ocurre cuando el circuito está cargado.

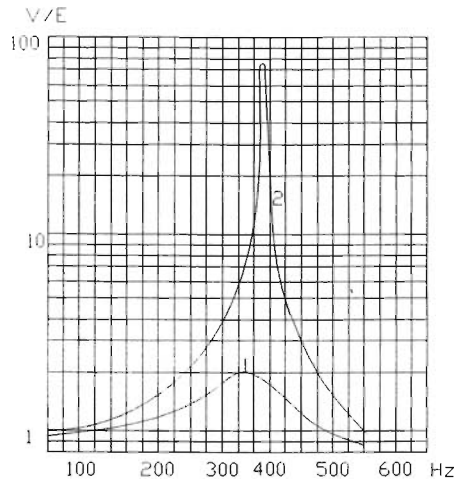


Fig.5.17. Variaciones en el coeficiente de sobretensión de acuerdo a la frecuencia.

- 1= Línea cargada
- 2= Línea no cargada

De la figura 5.17 vemos que la curva 1 representa la línea cargada, mientras que la curva 2 sin carga y el capacitor conectado al final de la línea no cargada, ver figura 5.16.

Para compensación a 50 Hz, el voltaje de entrada de carga es igual al 0.96 X el voltaje de salida, dando una caída de voltaje de 4%.

La relación V/E para las armónicas es mayor que 1.

- a) El valor de V/E bajo carga es 1.87 para una frecuencia de 350 Hz. correspondiendo a la 7a. armónica.
- b) Para la misma armónica, la relación V/E sin carga sube a 5.32 y el máximo ocurre para la frecuencia de 388 Hz con un valor de ¡77! Para el caso considerado, esta frecuencia no corresponde a un múltiplo exacto de la frecuencia fundamental, pero es obvio que si las constantes de la línea fueran modificadas, la resonancia exacta puede ocurrir en la 7a. armónica con un coeficiente de sobretensión también en la región de 77.

Si, por ejemplo, la amplitud de la 7a. armónica es igual al 1 % de la fundamental, encontramos las amplitudes siguientes de esta armónica en las terminales del capacitor:

	VOLTAJE	CORRIENTE
Línea bajo carga	1.87%	13.1%
Línea sin carga	3.32%	37.2%

Esas armónicas, ya sea con o sin carga, son claramente aceptables. Por otro lado, a la frecuencia de resonancia tendríamos, sin carga:

1) Voltaje 77%

2) Corriente 539%

Esto da una corriente resultante de ± 5.5 veces la corriente nominal, lo cual es totalmente inaceptable.

El ejemplo numérico dado arriba, muestra que puede esperarse una resonancia severa principalmente en los periodos cuando un capacitor permanece conectado a la red con muy poca carga.

5.3. PROTECCIÓN CONTRA RESONANCIAS

Hemos visto que si la frecuencia de resonancia entre la red y los capacitores es igual a una armónica, una corriente resultante puede obtenerse en el circuito que puede ser muchas veces la corriente nominal.

5.3.2. PRINCIPIO

Para evitar resonancias entre un capacitor y la red, colocaremos una inductancia en serie con el capacitor. Esta inductancia es calculada de tal forma que el acoplamiento entre capacitor y la inductancia, tenga una impedancia inductiva para todas las armónicas posibles en la red ver figura 5.18.

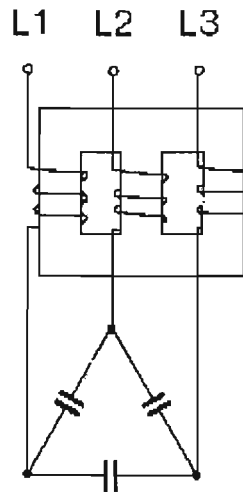


Fig. 5.18. Capacitores protegidos por una inductancia antiresonante.

5.3.3. DIMENSIONAMIENTO DE LA CORRIENTE

Se puede ver que la impedancia proporcionada durante el flujo de la corriente armónica por el ensamble del capacitor y la inductancia, es menor que la ofrecida por el capacitor solo. Las inductancias deben ser, por lo tanto, diseñadas permanentes para resistir corrientes armónicas considerables sin sobrecalentamiento o saturación.

En la práctica, los sobrevoltajes armónicos que crean el flujo de las corrientes armónicas en la inductancia y el capacitor son rara vez más del 5% arriba del voltaje nominal.

5.3.4. VOLTAJE EN LAS TERMINALES DEL CAPACITOR

El voltaje en las terminales del capacitor aumentará debido a la presencia de la inductancia. Elija un capacitor con un voltaje nominal más grande que el voltaje principal.

5.3.5. COMPENSACIÓN DE POTENCIA

La potencia de compensación, vista desde la alimentación, se calcula siendo igual al valor del capacitor, al voltaje a la frecuencia fundamental en sus terminales, reducida por el valor de potencia de la inductancia.

6. CONCLUSIONES

6.1 FACTOR DE POTENCIA.

El capacitor es un elemento que a dejado de ser necesario para convertirse en indispensable y esto se debe a que el costo actual de la energía se ha incrementado considerablemente y el capacitor contribuye a lograr un uso mucho mas eficiente de la misma.

Gracias al capacitor la industria y el comercio, pueden ahorrar energía reactiva que es improductiva y de este modo evitarse el cargo por bajo factor de potencia que cobra la compañía suministradora cuando ella tiene que proveer dicha energía. Al mismo tiempo reciben también ahorros por conceptos de pérdidas (en cables, motores y transformadores) que el capacitor ayuda a disminuir.

Esta plenamente demostrado que la inversión realizada en los capacitores se amortizan en un periodo menor a 8 meses y que además la instalación eléctrica puede trabajar mas eficientemente y prolonga la vida útil de los equipos (cables, motores, transformadores, etc.).

Al instalar los capacitores para la corrección del factor de potencia y obtener un factor de potencia superior al 90%, evita el cargo por compañía de Luz y Fuerza o Comisión Federal de Electricidad. La forma común de efectuarlo es mediante bancos de capacitores fijos, los cuales entregan una potencia reactiva constante sin importar las variaciones de carga del sistema eléctrico.

Lo anterior puede provocar problemas de sobre compensación y el consecuente sobrevoltaje en las líneas, y por lo tanto, en los equipos instalados, tales como: transformadores, motores, balastos, equipos de computo, etc; reduciendo con esto, su

vida útil al envejecer, paulatinamente los aislamientos y pudiendo ocasionar fallas catastróficas.

Dentro de las condiciones de operación de cualquier instalación eléctrica o planta eléctrica sean constantes; durante las horas de descanso: comida, cambio de turno, sábados y domingos, vacaciones, paros por mantenimiento, etc; existen variaciones fuertes de carga, que provocan sobrevoltajes y sobre compensación si no se desconectan los capacitores. Asimismo durante las interrupciones en el suministro de energía eléctrica por parte de la compañía suministradora por cortos periodos de tiempo se presenta este fenómeno.

La solución óptima para la corrección de factor de potencia son los bancos automáticos de capacitores, que mantienen constante el factor de potencia en un valor deseado, aunque se produzcan variaciones de carga.

6.2 CORRIENTES ARMÓNICAS.

Todos los sistemas eléctricos están expuestos a contingencias y diversos problemas causados por fenómenos naturales, accidentes o por la propia operación de la red, lo cual redundaría en el demérito de la calidad de la energía. Los problemas que se presentan en el suministro eléctrico son: interrupciones del servicio, depresiones o impulsos de tensión, variaciones en la frecuencia y generación de armónicas, Este último problema, la distorsión armónica en los sistemas eléctricos provocado por el incremento en la utilización de equipos con componentes electrónicos, actualmente no solo está afectando a los usuarios del fluido eléctrico ya que también las compañías suministradoras reciben en su propia red eléctrica las distorsiones armónicas inyectadas por los propios usuarios que cuentan con equipos desarrollados por la electrónica de potencia y que a su vez afectan a usuarios que no tienen dichos equipos electrónicos, distorsionando las ondas de corriente y tensión que reciben y provocando

sobrecalentamientos en los transformadores de potencia de la empresa suministradora , reduciendo la vida de estos.

Considerando que en la actualidad se tiene una infinidad de equipos desarrollados con la electrónica de potencia que cuentan con tecnología de punta, pero que son extremadamente sensibles a las variaciones de tensión, las compañías suministradoras deben procurar conservar la calidad de la energía, por lo que, es necesario legislar la inyección de corrientes armónicas del usuario al sistema de suministro, como ya existe en otros países, para evitar disminuir la capacidad de las subestaciones del sistema eléctrico nacional y coadyuvar en conservar la calidad de la energía. Por otra parte, todos aquellos usuarios que en sus procesos de producción básicamente utilicen equipos electrónicos, deben realizar estudios de componentes armónicos, para en su caso, determinar los filtros requeridos para evitar altas distorsiones armónicas.

La presencia de las señales armónicas, ocasiona que se produzcan: interferencia en las señales de video y telefonía, sobrevoltajes en los sistemas de potencia, incrementos en la temperatura del dieléctrico de los bancos de capacitores; con la consecuente disminución de su vida útil, daño total o parcial de los bancos de capacitores, distorsión de la forma de onda (calidad), quema de fusibles y deterioro de equipos varios del sistema eléctrico, falsos accionamientos de relés y/o protecciones, influencia en la exactitud de la medición de energía activa, reactiva y factor de potencia, inestabilidad en los sistemas de potencia, incremento de las pérdidas técnicas, excesivo calentamiento en las máquinas rotativas, entre otros.

Debido a la presencia de corrientes armónicas en la red, producidas por cargas que consumen corrientes no sinusoidales, los modos naturales del sistema de potencia pueden ser excitados por alguna componente armónica, cuya frecuencia coincida o pueda estar cerca con este modo natural, produciéndose de este manera, una severa

amplificación de voltajes y corrientes, pudiendo incluso quemar sistemas del sistema eléctrico.

Los bancos de capacitores al interactuar con la red, forma un circuito RLC, ocasionando verdaderas resonancias, dependiendo de las componentes inductivas y capacitivas del circuito.

Las formas de onda de las señales de voltaje y de corriente en un sistema eléctrico de potencia, no son senoidales perfectas, sino que se trata de señales distorsionadas compuestas por señales armónicas.

En los sistemas eléctricos de potencia las armónicas se acompañan por lo regular a la utilización de la energía eléctrica y son creadas por las cargas que presentan un comportamiento no lineal.

Las armónicas en los sistemas eléctricos se definen como una señal senoidal a frecuencia fundamental y la adición de otras ondas similares pero a frecuencia que es múltiplo de la fundamental.

La distorsión armónica es un fenómeno indeseable en los sistemas eléctricos debido a que daña algunos equipos como: transformadores, capacitores, máquinas rotatorias, mecanismos de interrupción, relevadores de protección, aparatos de medición, equipo electrónico, equipo de iluminación y equipo de telecomunicaciones.