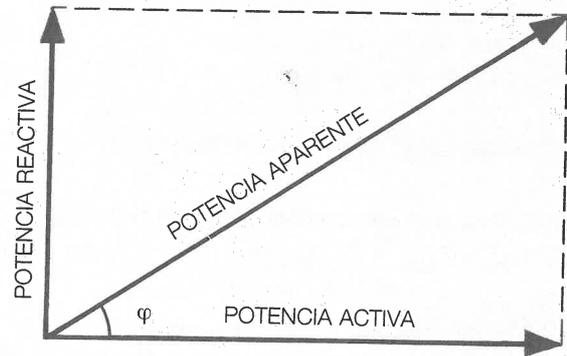
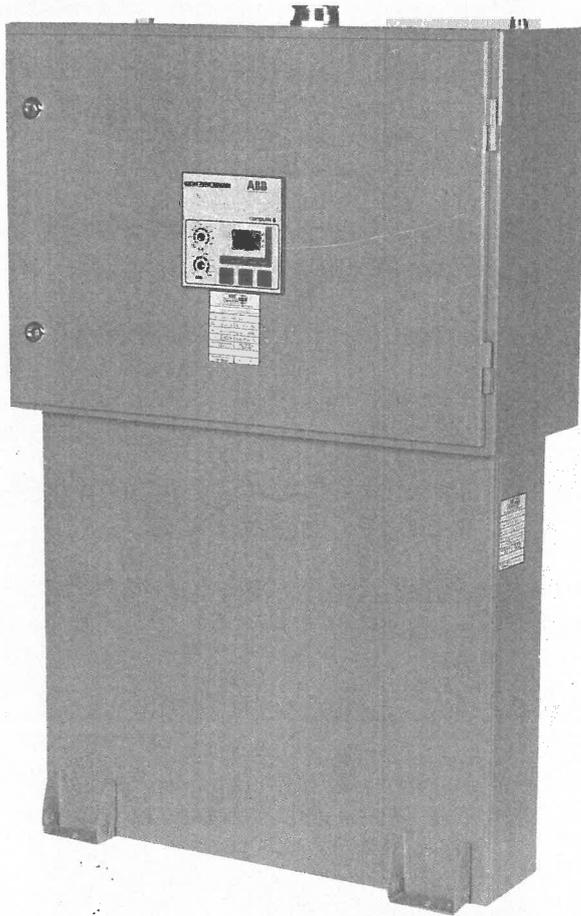


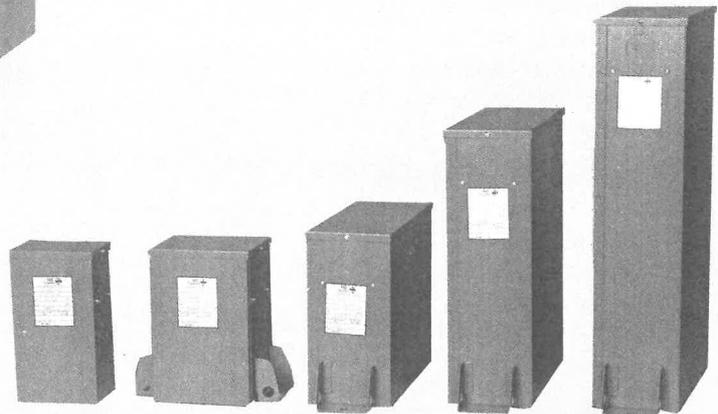
AC 4971 Sp

Edición 2 1991-02

Divulgación técnica



COS φ



CONTENIDO

Pág.

Pág.

1 - ¿Qué es el factor de potencia?	3	10 - Selección de condensadores	12
2 - ¿Cómo medir el factor de potencia?	3	10.1. Valor de los condensadores para motores de inducción.	
A - Medida en un Sistema Monofásico.		10.2. Valor de los condensadores para los transformadores.	
B - Medida en un Sistema Trifásico Equilibrado		10.3. Cálculo de condensadores en convertidores de corriente continua.	
C - Medida en un Sistema Trifásico Desequilibrado.		11 - Influencia de los armónicos de la línea sobre los condensadores ..	15
3 - Factor de potencia de los principales aparatos eléctricos	4	11.1. Resonancia serie.	
A - Motores asíncronos.		11.2. Protección contra resonancia.	
B - Motores síncronos.		11.3. Eliminación de los armónicos.	
C - Alumbrado		11.4. Telemando en la red.	
D - Hornos y Aparatos de Caldeo.		12 - Transitorios a la conexión de condensadores	19
E - Máquinas de Soldar.		13 - Resistencia de descarga	19
F - Transformadores de Potencia.		13.1. Descarga lenta.	
4 - Inconvenientes de un $\cos \varphi$ bajo	5	13.2. Descarga rápida.	
5 - Ventajas de un buen factor de potencia	6	14 - El transformador de intensidad. Cálculo. El totalizador	21
6 - ¿Cómo mejorar el factor de potencia?	7	15 - Dimensionado del aparellaje eléctrico	22
7 - ¿Hasta qué valor es necesario mejorar el factor de potencia?	8	15.1. Fusible.	
8 - ¿Dónde y cómo se deben instalar los condensadores?	8	15.2. Contactores.	
A - Compensación individual.		15.3. Transformador de maniobra.	
B - Compensación de grupo.		15.4. Cables de los circuitos de maniobra.	
C - Compensación central.		15.5. Cables de los circuitos de potencia.	
D - Compensación combinada.		15.6. Seccionador general.	
9 - Conexión de los condensadores	11	16 - Refrigeración	23
9.1. Motores de inducción en arranque directo.		16.1. Cálculo de las pérdidas.	
A - Después de la protección térmica del motor.		16.2. Superficie de la disipación.	
B - Antes de la protección térmica del motor.		16.3. Cálculo del incremento de temperatura.	
C - Antes del arrancador. Conexión permanente.		17 - Cálculo práctico de la potencia de los condensadores necesarios para la corrección del factor de potencia	24
9.2. Arranque de motores en estrella-triángulo.		17.1. Partiendo de la potencia instalada (kW).	
9.3. Conexión de condensadores en motores freno. (Aparatos de elevación).		17.2. Partiendo del recibo de la compañía suministradora o lectura de contadores.	
		18 - Análisis de rentabilidad	26
		19 - Unidades SI de interés	30

1. ¿QUE ES EL FACTOR DE POTENCIA?

Por definición el factor de potencia (también llamado $\cos \varphi$ de un aparato) es igual a la relación entre la potencia activa P y la potencia aparente S.

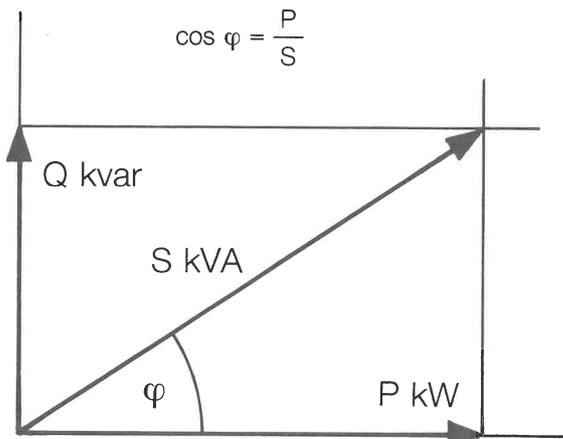


Fig. 1

Considerando el diagrama vectorial de potencias (Fig. 1) se puede ver que:

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

en donde la Potencia Aparente S viene expresada en (VA) o bien (kVA), la Potencia Activa P en (W) o (kW) y la Potencia Reactiva Q en (var) o también (kvar).

En este mismo diagrama se pueden deducir una serie de fórmulas tales como:

$$P = S \cdot \cos \varphi$$

$$Q = S \cdot \sin \varphi$$

con lo cual

$$\frac{Q}{P} = \operatorname{tg} \varphi$$

entonces sustituyendo los valores de $\cos \varphi$ por sus equivalentes

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

$$\cos^2 \varphi = \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}$$

esta última expresión viene calculada en la TABLA XI de la pág. 26 para mayor comodidad.

En el caso de una red trifásica, como sabemos que

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

entonces la Potencia Activa será

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

y la Potencia Reactiva

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

Cada una de las dos potencias activa y reactiva se pueden calcular a partir de los consumos de Energía Activa (kWh) y Reactiva (kvarh) obtenidos mediante contadores.

2. ¿COMO MEDIR EL FACTOR DE POTENCIA?

A - Medida en un sistema monofásico

En un sistema monofásico el método más sencillo consiste en la colocación de un Watímetro, un Voltímetro y un Amperímetro (Fig. 2).

en donde

$$\cos \varphi = \frac{P}{U \cdot I}$$

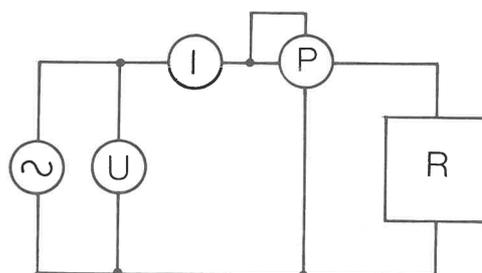


Fig. 2

Otro método es el empleo de un fasímetro monofásico (tipo Brüger) en el que la lectura del $\cos \varphi$ se hace directamente.

B - Medida en un sistema trifásico equilibrado

El método de los dos Watímetros (Fig. 3) es el más usual. Se deberán colocar correctamente siguiendo las instrucciones del aparato. Por ejemplo si la indicación en uno de ellos se desvía en sentido contrario, deberemos cambiar las conexiones en su bobina de intensidad y anotar la lectura como negativa. La suma de ambas lecturas P1 y P2 nos dará la potencia total absorbida por el receptor.

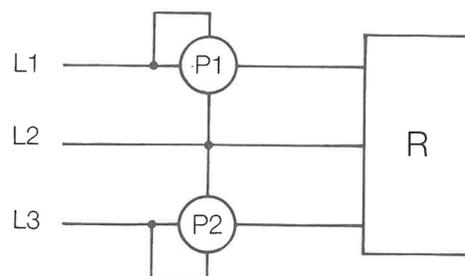


Fig. 3

La relación entre ambas medidas está en función del desfase que existe entre Tensión-Intensidad es decir de φ .

$$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} \frac{P1 - P2}{P1 + P2}$$

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}}$$

En el gráfico de la Fig. 4 se puede ver directamente el $\cos \varphi$ en función de la relación entre las dos lecturas P1 y P2.

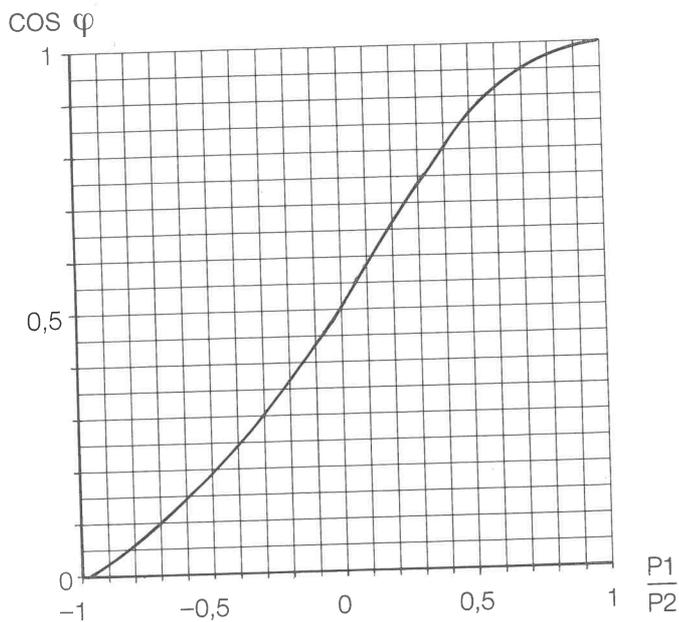


Fig. 4

También se puede medir el factor de potencia mediante un fasímetro trifásico colocado en la red.

C - Medida en un sistema trifásico desequilibrado

En un circuito desequilibrado el $\cos \varphi$ es distinto en cada fase y para conocerlo es necesario medir separadamente la Potencia, la Intensidad y la Tensión en cada una de las fases como si se tratara de un circuito monofásico. Si el neutro es inaccesible o bien es una conexión en triángulo la medición por fase será imposible.

De todas formas siempre se puede conocer el $\cos \varphi$ medio mediante las lecturas del contador de Energía Activa y Reactiva consumidas en un tiempo estimado.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P}$$

3. FACTOR DE POTENCIA DE LOS PRINCIPALES APARATOS ELECTRICOS

A - Motores asíncronos

El valor del factor de potencia de un motor asíncrono está en función de sus características de construcción (nº de polos, bobinados, jaula de ardilla...) y de la calidad de fabricación depende su potencia nominal y su $\cos \varphi$.

En un motor dado, el factor de potencia varía en función de la carga, tanto es así que trabajando en vacío su $\cos \varphi$ desciende muchísimo. Ver el ejemplo de la Tabla I.

Porcentaje de la carga nominal	0 (Vacío)	25	50	75	100
$\cos \varphi$	0,17	0,55	0,73	0,80	0,85

Tabla I

Con ello se puede constatar que en un motor asíncrono, trabajando en vacío o en baja carga, se produce una degradación de su rendimiento debida a un mayor consumo relativo de la energía reactiva. En la Fig. 5 podemos ver el ejemplo de un motor asíncrono trifásico de 100 kW. (Ver Tabla II en la pág. 13 para la selección del condensador).

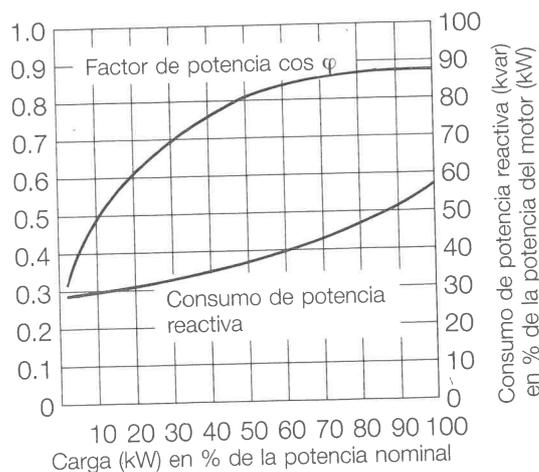


Fig. 5

B - Motores síncronos

Estos motores, en general tienen un excelente factor de potencia.

C - Alumbrado

– Las lámparas de incandescencia tienen un factor de potencia muy alto cercano a la unidad.

- Las lámparas de fluorescencia, en cambio, tienen un bajo $\cos \varphi$ (del orden de 0,5) pero normalmente vienen ya provistas de origen de dispositivos de compensación.
- Las lámparas de descarga (vapor de mercurio, vapor de sodio...) ocurre lo mismo que en los fluorescentes y cuyo factor de potencia, sin dispositivos, oscila entre 0,4 y 0,6.

D - Hornos y aparatos de caldeo

- Los hornos de resistencias presentan un $\cos \varphi$ igual a 1, exceptuando los casos en que la regulación se efectúa con tiristores. El valor del $\cos \varphi$ dependerá, entonces, del ángulo de cebado de los mismos.
- Los hornos de inducción generalmente vienen preparados por el mismo fabricante para una utilización con un factor de potencia superior a 0,85.
- En los hornos de arco el $\cos \varphi$ varía con el ciclo de funcionamiento. El valor medio está cerca de 0,8 excepto en los hornos UHP (Ultra High Power) que oscila entre el 0,7.

Excepto en los hornos de resistencias sin tiristores, los demás generan en la red niveles de armónicos elevados que son debidos a la distorsión de la onda senoidal que provocan.

E - Máquinas de soldadura

- Las máquinas de soldar con resistencias presentan un $\cos \varphi$ satisfactorio (entre 0,8 y 0,9) ya que éste depende solamente de la reactancia del circuito de soldadura.
- En las máquinas estáticas de soldadura por arco el factor de potencia está alrededor de 0,5 salvo si ya vienen compensadas por el constructor.
- Los grupos rotativos de soldadura por arco el $\cos \varphi$ se halla entre 0,7 y 0,9 comparable con los motores asíncronos.
- En la soldadura por arco con corriente continua y debido a los transformadores-rectificadores, el factor de potencia está comprendido entre 0,7 y 0,8 y a causa de la rectificación el nivel de armónicos generados aumenta considerablemente.

F - Transformadores de potencia

Un transformador, no solamente debe proporcionar la energía reactiva necesaria a los aparatos conectados en su secundario sino que además, absorbe de la red otro tanto para asegurarse su propio funcionamiento (potencia magnetizante). El consumo relativo de energía reactiva va creciendo a medida que el consumo de energía activa va bajando. (Ver Tabla III en la pág. 14 para la selección del condensador).

4. INCONVENIENTES DE UN $\cos \varphi$ BAJO

En una instalación con un consumo de energía activa determinado, a medida que el $\cos \varphi$ disminuye, la energía reactiva absorbida crecerá, con lo cual la energía aparente solicitada de la red será más elevada. En la Fig. 6 se puede observar como crece la Potencia Aparente «S» solicitada por una carga a medida que su $\cos \varphi$ va disminuyendo.

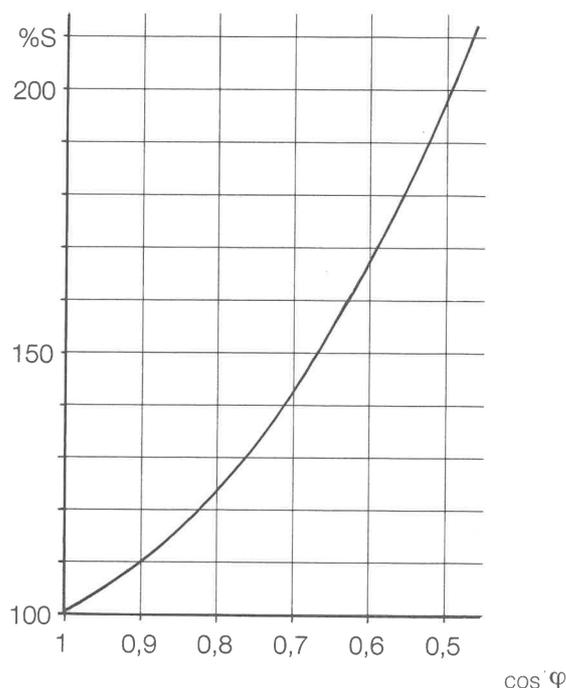


Fig. 6

Por este motivo nos encontramos con un aumento, totalmente inútil, de la corriente total solicitada con los consecuentes gastos financieros. Pero éstos no son los únicos inconvenientes sino que además tendremos:

- Un aumento de las pérdidas por efecto Joule (éstas están en función de la intensidad al cuadrado) que se presentarán en los cables, bobinados de los transformadores, aparatos de ruptura...

Para una misma potencia activa transportada, la reducción de las pérdidas en % viene definida por

$$\left[1 - \left(\frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2} \right)^2 \right] \times 100 \quad [\%]$$

Por ejemplo, partiendo de un $\cos \varphi_1$ inicial de 0,6 hasta un $\cos \varphi_2$ final de 0,8 las pérdidas se reducen un 44%. En la Fig. 7 podemos observar como disminuye el porcentaje de pérdidas con distintos valores de $\cos \varphi$.

% Reducción de pérdidas

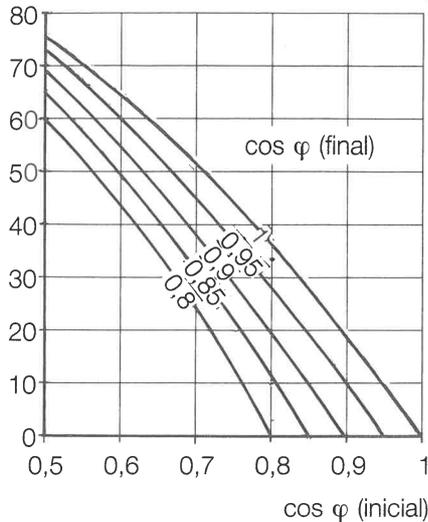


Fig. 7

- Aumento de la caída de tensión en cables, transformadores y circuitos de mando que se traduce en un descenso en la alimentación de los receptores (motores, alumbrado, aparellaje...) lo que provoca un bajo rendimiento de los mismos y de su capacidad.
- Subutilización de la instalación debida a un coste superior de amortización que se refleja sobretodo en los transformadores.

Estos inconvenientes expuestos anteriormente existen también para la compañía suministradora de energía. Es normal, pues, que un mal factor de potencia del consumidor esté penalizado.

5. VENTAJAS DE UN BUEN FACTOR DE POTENCIA

De todo lo expuesto se deduce que para una instalación determinada y a Potencia útil constante, si se mejora el factor de potencia (lo cual significa que el ángulo φ se reduce a φ') la corriente total I_t absorbida disminuye hasta I_t' (Fig. 8).

Desde otra óptica, si se mantiene la corriente total I_t constante, la potencia útil P disponible aumenta al aumentar el $\cos \varphi$. Se observa en la Fig. 9 que si aumenta el $\cos \varphi$ (disminución del ángulo φ a φ_2) la potencia útil disponible P aumenta a P_2 y si reducimos el factor de potencia (el ángulo aumenta a φ_1) la potencia útil disponible P_1 disminuye con lo que se sobrecargan las líneas.

Veamos en la Fig. 10 las curvas de la potencia aparente recuperada por kW de carga, a diferentes $\cos \varphi$.

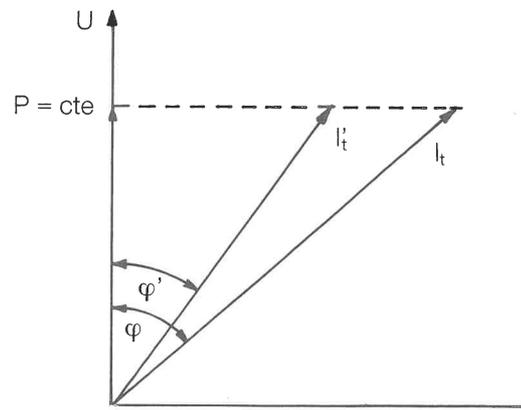


Fig. 8

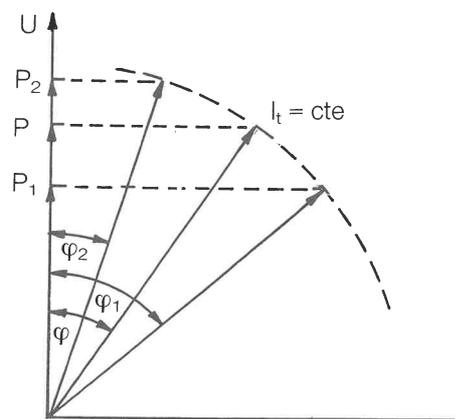


Fig. 9

Estas curvas vienen expresadas según la fórmula

$$kVA = kW \left(\frac{1}{\cos \varphi_1} - \frac{1}{\cos \varphi_2} \right)$$

siendo $\cos \varphi_1$ el factor de potencia inicial y $\cos \varphi_2$ el factor de potencia mejorado.

- Veamos ahora un ejemplo práctico.

Sea un transformador de 400 kVA de potencia nominal máxima admisible en servicio continuo. La carga conectada es de 210 kW con un $\cos \varphi$ de 0,60.

Entonces la potencia aparente S que suministrará el transformador es:

$$S = \frac{P}{\cos \varphi}; \quad S = \frac{210 \text{ kW}}{0,60} = 350 \text{ kVA}$$

La potencia de reserva de este transformador será:

$$400 \text{ kVA} - 350 \text{ kVA} = 50 \text{ kVA}$$

Mejorando el $\cos \varphi$ desde 0,60 hasta 0,85, para la misma potencia útil de 210 kW, tendremos una nueva potencia aparente S_1 de:

$$S_1 = \frac{P}{\cos \varphi_1}; \quad S_1 = \frac{210 \text{ kW}}{0,85} = 247 \text{ kVA}$$

Luego la potencia disponible en el mismo transformador será de:

$$400 \text{ kVA} - 247 \text{ kVA} = 153 \text{ kVA}$$

Ello representa un aumento de la potencia disponible muy considerable (de 50 kVA a 153 kVA) con la correspondiente reducción de pérdidas en las líneas y transformadores. También significa una reducción de penalidades por consumo de energía reactiva.

6. ¿COMO MEJORAR EL FACTOR DE POTENCIA?

Hasta el momento actual, existen dos sistemas principales para mejorar el factor de potencia.

A - Máquinas rotativas tales como el compensador síncrono.

B - Condensadores estáticos.

Las primeras comportan, además de los capitales invertidos y espacios relativamente grandes, unos gastos de mantenimiento. Estas máquinas sólo se utilizan en instalaciones grandes y su efecto cesa cuando están paradas.

En cambio el condensador estático representa la solución ideal al problema de la compensación de energía reactiva.

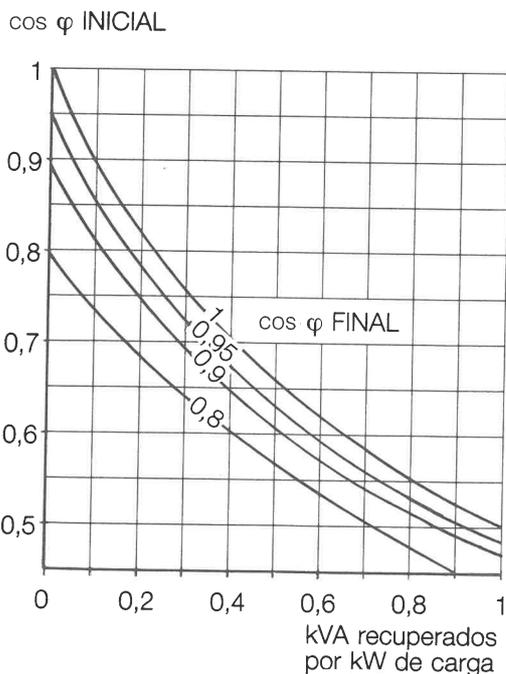


Fig. 10

Cuando a un condensador se le aplica una tensión alterna, éste posee la propiedad de absorber una corriente desfasada 90° (salvo pérdidas) en adelante respecto la tensión.

Si por ejemplo aplicamos una tensión alterna U (Fig. 11) a un circuito inductivo que absorbe una intensidad total I_t en retraso respecto a la tensión un ángulo φ (girando a una velocidad angular $\omega = 2\pi f$ en sentido antihorario).

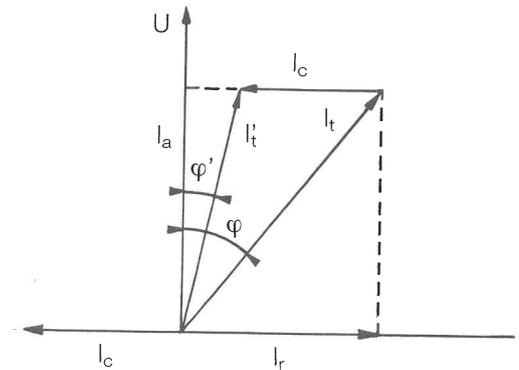


Fig. 11

La corriente I_t se descompone en una componente activa I_a (en fase con la tensión) y una componente reactiva I_r (desfasada 90° respecto la tensión).

Conectando en paralelo un condensador que absorbe una corriente reactiva I_c desfasada 90° en sentido antihorario respecto la tensión aplicada U , vemos que I_r y I_c están en oposición de fase y que sumadas vectorialmente a I_t nos da una resultante total I'_t desfasada un ángulo φ' mucho mejor.

Ajustando el valor I_c se puede disminuir o incluso anular el valor de I_r . Entonces es cuando se dice que existe compensación parcial o total de la energía reactiva. O sea que, para una misma energía útil, obtendremos después de la compensación, una intensidad total I'_t más baja desfasada un ángulo φ' más pequeño (se mejora el $\cos \varphi$).

La representación de la Fig. 12 ilustra lo anteriormente expuesto en la que se puede ver como la Potencia Reactiva absorbida por los motores viene suministrada por el condensador, con lo cual la Potencia disponible en la fuente de alimentación se ve aumentada.

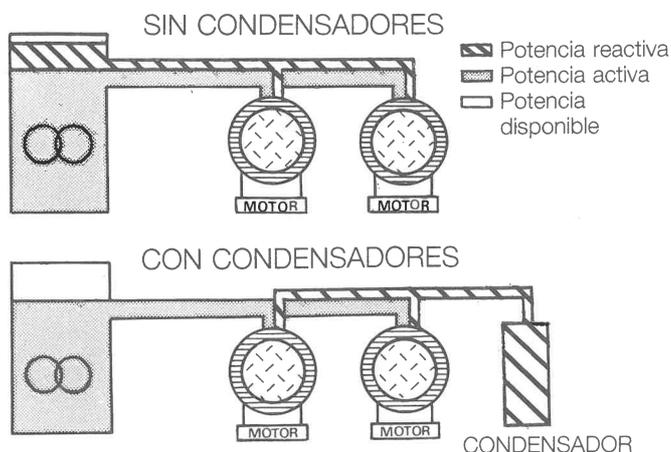


Fig. 12

7. ¿HASTA QUE VALOR ES NECESARIO MEJORAR EL FACTOR DE POTENCIA?

En la práctica, no es recomendable ni económico efectuar una compensación con condensadores de valor fijo hasta la unidad, ya que en algún momento determinado la subestación puede disminuir su carga inductiva y entonces se estará en sobrecompensación, lo que es más perjudicial todavía porque, además de sobrecargar las líneas, se pueden generar puntas de tensión por acumulación de energía en los condensadores.

Por eso es mejor compensar con baterías de condensadores automáticas de forma que la carga capacitiva sigue automáticamente las fluctuaciones de la carga inductiva y el $\cos \phi$ se mantiene siempre al mismo nivel. En la Fig. 13 se puede observar el interior de una batería automática de condensadores que ABB ha diseñado para la corrección del factor de potencia.

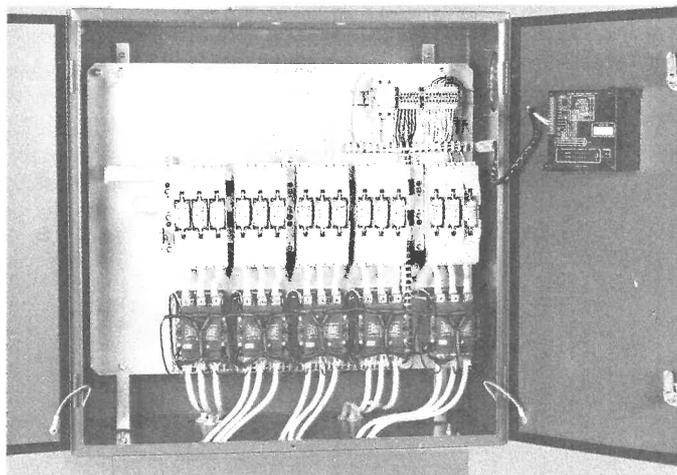


Fig. 13

El $\cos \phi$ óptimo a mejorar, desde el punto de vista económico, oscila entre el 0,90 y 0,95 (ver Tabla X en la pág. 25 de recargos y bonificaciones). Mejorar hasta la unidad resulta mucho más caro debido a la potencia necesaria y la amortización se hace más larga.

Por ejemplo, veamos una instalación en la que se quiere compensar una potencia útil de 100 kW con un $\cos \phi$ de 0,70. Para conseguir un $\cos \phi$ de 0,90 necesitaremos instalar 53 kvar. En cambio si pretendemos llegar a la unidad, la potencia reactiva necesaria asciende a 102 kvar o sea 49 kvar más. Casi el doble de condensadores.

De todas formas es preferible hacer un estudio más a fondo de cada instalación ya que, a veces y sobre todo en grandes consumidores de energía, sí resulta rentable llegar hasta la unidad por la bonificación de la compañía suministradora.

8. ¿DONDE Y COMO DEBEN INSTALARSE LOS CONDENSADORES?

El objetivo final de la corrección del factor de potencia es reducir o suprimir la penalidad por energía reactiva en la facturación, para ello deben conectarse los condensadores en el lado de la utilización y después de los contadores. Pueden ser instalados en varios lugares de la línea de distribución de la fábrica pudiendo estar de cuatro formas:

- A - COMPENSACION INDIVIDUAL
- B - COMPENSACION DE GRUPO
- C - COMPENSACION CENTRAL
- D - COMPENSACION COMBINADA

Cada una de estas cuatro maneras de conectar los condensadores en la línea de consumo de la instalación presenta sus ventajas y sus inconvenientes debiendo elegir el caso que más convenga a cada consumidor. No debemos olvidar que no hay dos instalaciones idénticas y, para conseguir una regulación óptima y económicamente rentable el mejor camino es estudiar por separado cada caso y elegir el sistema más adecuado a las necesidades.

Veamos cada caso por separado.

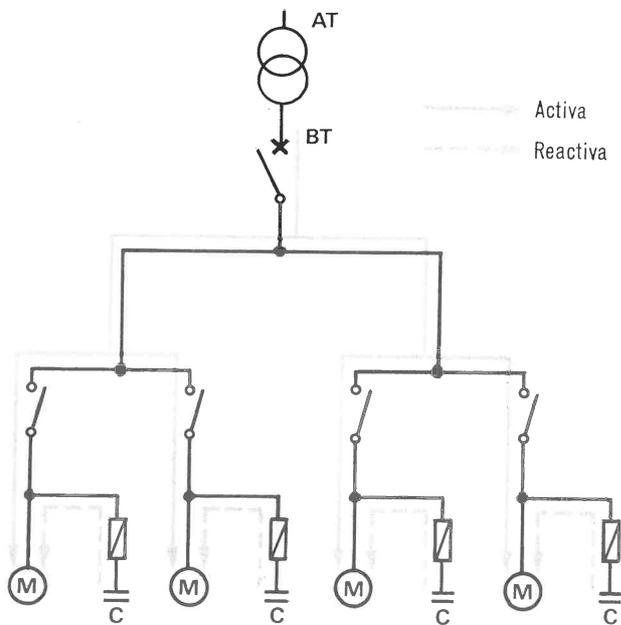


Fig. 14

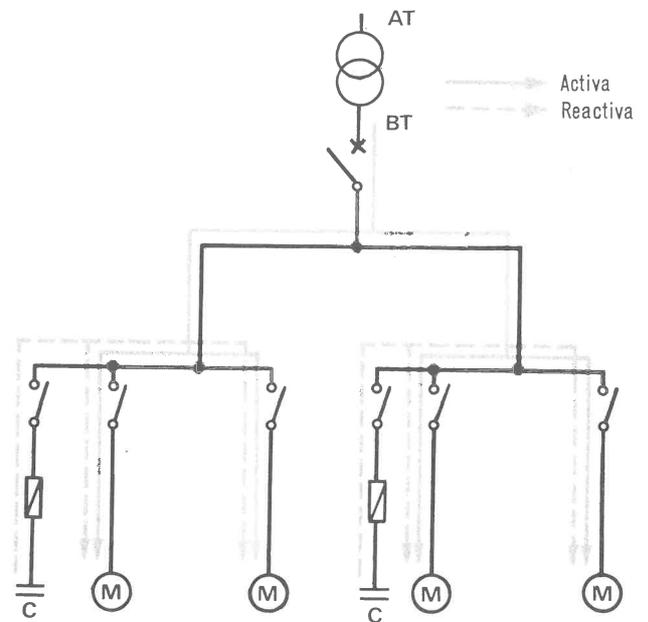


Fig. 15

A - Compensación individual

Este caso (Fig. 14) se aplica particularmente a los motores de inducción y presenta las siguientes ventajas.

- El arrancador del motor puede servir también para conectar simultáneamente los condensadores lo que elimina el gasto de un aparato de maniobra propio para el condensador.
- La puesta en servicio por el arrancador constituye un control semiautomático de los condensadores; no es necesario un control suplementario.
- Los condensadores no entran en servicio hasta que el motor no se pone en marcha.
- Instalando los condensadores cerca de la carga las líneas de alimentación al motor quedan aligeradas, ya que la corriente reactiva no está presente, con la consiguiente reducción de las pérdidas por efecto Joule y un aumento de la carga disponible.

B - Compensación de grupo

Este tipo de compensación (Fig. 15) es aconsejable cuando las cargas se ponen en marcha por grupos, por ejemplo el trabajo de equipos en distintas líneas y aquí las ventajas son las siguientes.

- Cada grupo está formado de manera que todos los motores de un equipo funcionan simultáneamente y por ello una batería de condensadores por grupo está comprobado que resulta más económica que condensadores individuales y además lo será también comparativamente a una batería general si hay varios grupos que no funcionan al mismo tiempo.
- Si hay varios motores pequeños que funcionen al mismo tiempo, el empleo de condensadores más potentes que compensen todo el grupo es más económico que muchos condensadores individuales menores.
- Las líneas de alimentación hasta los condensadores quedan aligeradas con la consiguiente reducción de pérdidas por efecto Joule, pero de menos importancia que en el caso anterior.

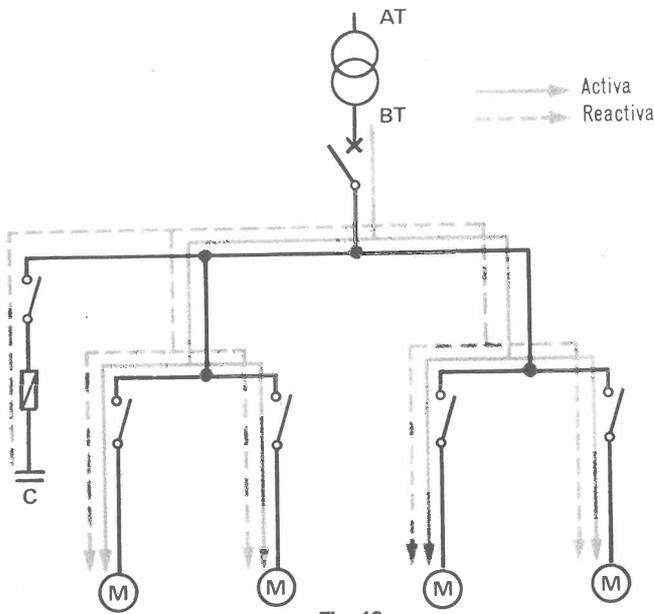


Fig. 16

C - Compensación central

Cuando la demanda de potencia se concentra en las barras de salida de una subestación (Fig. 16), es práctico agrupar los condensadores en baterías

centralizadas al principio de línea con las consiguientes ventajas.

- Se facilita el mantenimiento y se mejora la utilización de su potencia, tanto más cuanto más automática sea la compensación.
- Aunque se mantenga la descarga del centro de transformación (potencia disponible en kVA) al igual que en los casos anteriores, las pérdidas por efecto Joule no quedan disminuídas puesto que la energía reactiva sigue estando presente en la línea de transporte.

D - Compensación combinada

Como su nombre indica, se trata de una combinación de los tres tipos anteriores. Se aplica a instalaciones complejas que desde el punto de vista de compensación pueden ser consideradas como instalaciones separadas.

En el recuadro de la Fig. 17, podemos ver resumidas las cuatro formas de compensación con sus principales ventajas e inconvenientes.

Tipo de compensación	Características	Ventajas	Inconvenientes
individual (Fig. 14)	Se aplica a aparatos de régimen permanente estando cada uno de ellos conectado a un condensador de valor adecuado.	<ul style="list-style-type: none"> • kvar producidos «in situ». • disminución de pérdidas y caídas de tensión en las líneas. • economía de un aparato de maniobra. 	<ul style="list-style-type: none"> • muchos condensadores pequeños son más caros que uno de potencia total equivalente. • poco aprovechamiento de algunos condensadores que pueden estar la mayor parte del tiempo desconectados.
de grupo (Fig. 15)	Varios aparatos están conectados a un condensador común equipado con su propio interruptor. La puesta en servicio del condensador concuerda con las horas de trabajo de los receptores.	<ul style="list-style-type: none"> • reducción de gastos de inversión en condensadores. • disminución de las pérdidas y caídas de tensión en las líneas principales. 	<ul style="list-style-type: none"> • líneas de distribución no aligeradas de carga.
central (Fig. 16)	Producción de la potencia reactiva de un solo punto. En los casos simples la batería se conecta al iniciar el trabajo y se desconecta al finalizar.	<ul style="list-style-type: none"> • mejor utilización de la potencia de los condensadores. • vigilancia más fácil. • posibilidad de regulación automática. • mejora general del plan de tensión. 	<ul style="list-style-type: none"> • líneas principales de alimentación no aligeradas de carga.
combinada	Compensación individual de los receptores importantes. Compensación por grupos o central para los otros.		

Fig. 17

9. CONEXION DE LOS CONDENSADORES

Veamos distintos modos de conectar los condensadores y las precauciones que se deben tomar en cada uno de ellos.

9.1. Motores de inducción en arranque directo

En la Fig. 18 se muestran las tres formas de realizar este montaje:

A - DESPUES DE LA PROTECCION TERMICA DEL MOTOR.

El condensador entra en servicio al mismo tiempo que el motor, siendo sólo la potencia activa (kW) la que circula por el relé térmico y cuya gama de regulación será para una corriente inferior a la nominal del motor. La potencia reactiva (kvar) la suministrará el condensador.

B - ANTES DE LA PROTECCION TERMICA DE MOTOR.

Entran en servicio los dos a la vez con lo cual la protección térmica estará dimensionada para la corriente nominal del motor. Esta variante es adecuada cuando se trate de efectuar una compensación sin modificación alguna de la instalación.

C - ANTES DEL ARRANCADOR.

La protección térmica quedará igual. Se deberá añadir interruptor y fusibles propios para el condensador. Esta última solución es la más recomendable, aunque también resulte la más cara, puesto que en los casos A y B el dimensionado del condensador debe hacerse cuidadosamente a causa de la potencia magnetizante del motor.

Si, por ejemplo, la potencia reactiva del condensador fuera mayor que la potencia necesaria para magnetizar el motor, aparecerían sobretensiones importantes, y si además dicho motor fuera arrastrado mecánicamente por su carga (un polipasto...), se podría comportar como un alternador asíncrono autoexcitado. Esto es debido al campo magnético que la descarga del condensador mantiene en bornes del motor, cuando todo el conjunto se desconecta de la red.

Por esta razón se aconseja el montaje de la Fig. 18 C en que ambos motor y condensador están instalados separadamente y de no poder ser así el condensador debe dimensionarse para un 90% de la corriente magnetizante del motor.

9.2. Arranque de motores en estrella-triángulo

En este tipo de montaje existe la posibilidad de que, durante la conmutación, se autoexcite el motor y en los casos más desfavorables pueden originarse tensiones excesivas en sus arrollamientos puesto que, es sumamente fácil que las tensiones autoexcitadas no se hallen en sincronismo con la tensión de red. Para evitarlo debemos conectar el condensador según el esquema de la Fig. 19.

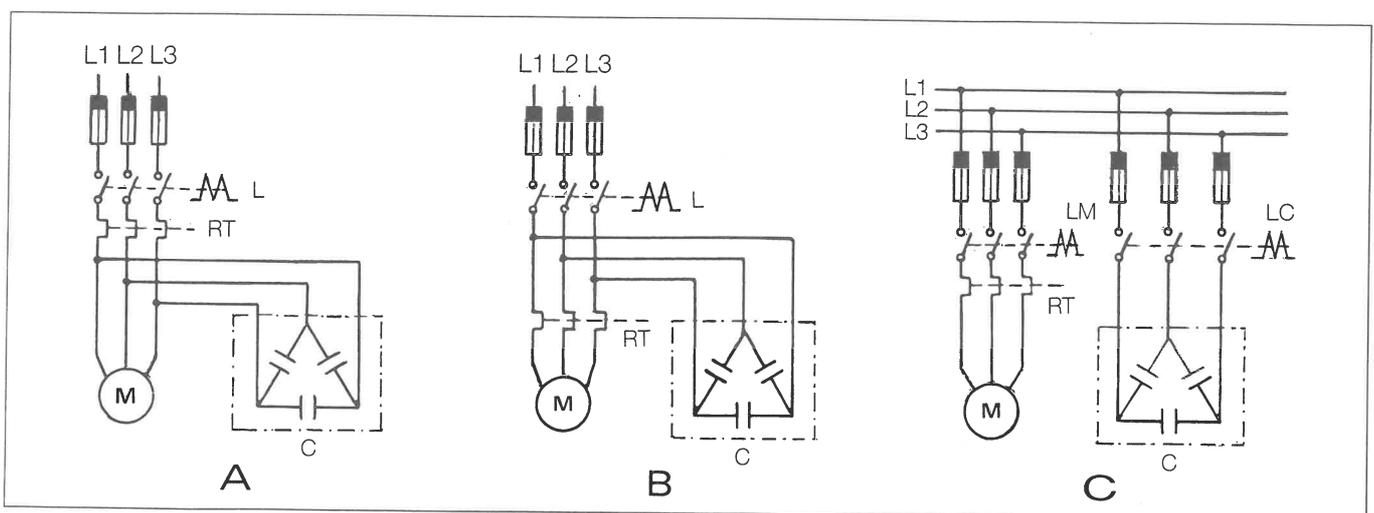


Fig. 18

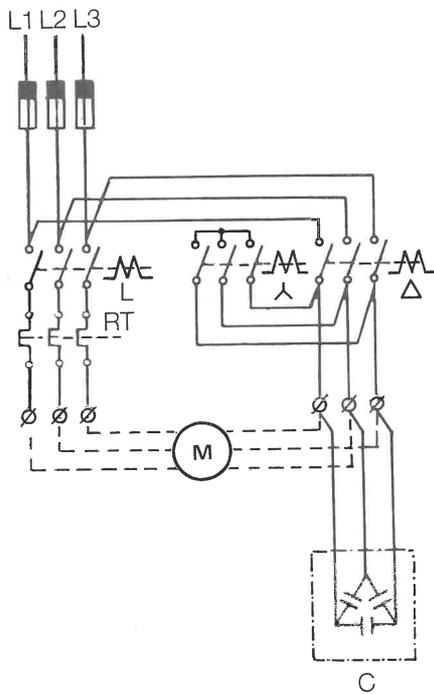


Fig. 19

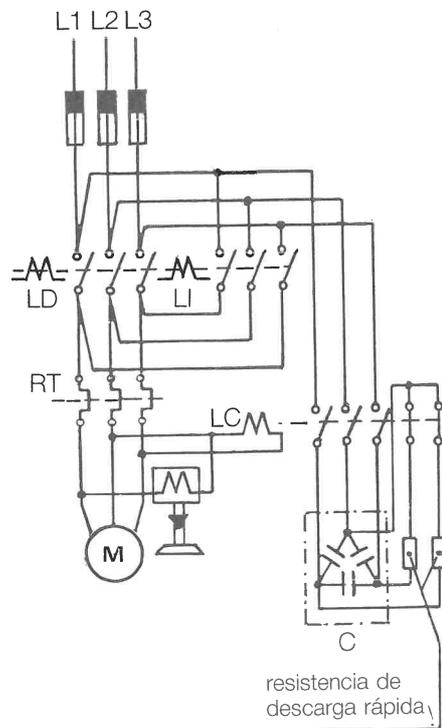


Fig. 20

9.3. Conexión de condensadores en motores freno. (Aparatos de elevación)

Los ascensores, grúas, funiculares, etc. tienen conjuntado con el motor unos frenos electromagnéticos que detienen el motor tan pronto como éste se queda sin tensión. Al dar de nuevo tensión al motor el freno se desconecta, puesto que simultáneamente también se alimenta la bobina de su electroimán.

Al instalar un condensador para la compensación de este conjunto, es condición primordial que la tensión en bornes del motor sea nula al desconectarlo y de esta forma el freno pueda actuar correctamente. En la Fig. 20 se muestra como debe hacerse la conexión correcta para evitar la autoexcitación del motor y con ello un fallo de los frenos. El condensador se activa a través de un contactor propio en el que irán conectadas un juego de resistencias de descarga rápida, para así cerrar el circuito y quedar totalmente independizado del motor.

La potencia del condensador debe estar por debajo de la potencia magnetizante del motor. Para ello su intensidad nominal será igual al 90% de la I_0 o intensidad de vacío del motor. Dicha intensidad I_0 viene dada por el fabricante del motor aunque se puede estimar en 0,33 la intensidad nominal del mismo.

- Ejemplo. Debemos corregir la potencia reactiva de un motor de 11 kW a 380 V 50 Hz y 1.500 rpm. (La I_0 vale 7,5 A).

El valor de la intensidad nominal máxima para el condensador, ya que debe ser el 90% de I_0 , será:

$$I_c = 7,5 \times 0,9 = 6,75 \text{ A}$$

La potencia nominal del condensador expresada en kvar, será:

$$Q_c = \frac{\sqrt{3} \times U \times I_c}{1.000} = \frac{1,73 \times 380 \times 6,75}{1.000}$$

$$Q_c = 4,44 \text{ kvar}$$

10 SELECCION DE CONDENSADORES

10.1. Valor de los condensadores para motores de inducción

La compensación individual de los motores, en general no es rentable para potencias inferiores a 10 kW.

La potencia de condensadores para la compensación individual de motores asíncronos puede elegirse según la Tabla II de una forma aproximada considerando el trabajo del motor entre 75% y el 100% de la carga.

Valores indicativos en kvar para la corrección individual de motores asíncronos.

Potencia Nominal		3.000 rpm		1.500 rpm		1.000 rpm		750 rpm	
HP	kW	kvar	% RD*	kvar	% RD*	kvar	% RD*	kvar	% RD*
0,33	0,25	0,1	14	0,1	20	0,1	30	0,2	32
0,5	0,37	0,2	14	0,2	20	0,2	30	0,2	32
0,75	0,55	0,2	14	0,3	20	0,3	30	0,3	32
1	0,75	0,3	14	0,4	20	0,4	30	0,5	32
1,5	1,1	0,5	14	0,6	15	0,6	23	0,7	25
2	1,5	0,7	14	0,8	15	0,8	23	0,9	25
3	2,2	1	13	1,1	12	1,2	18	1,3	20
4	3	1,4	11	1,5	12	1,7	15	1,8	20
5,5	4	1,6	9	1,8	11	2	12	2,2	18
7,5	5,5	2,2	9	2,5	11	2,8	12	3	18
10	7,5	3	9	3,4	11	3,8	12	4,1	17
12,5	9	3,6	9	4,1	11	4,5	12	5	17
15	11	4,4	9	5	11	5,5	11	6	16
20	15	5	9	6	10	7	11	8	16
25	18,5	6	9	7	10	8	11	9	15
30	22	8	9	9	9	10	10	11	14
40	30	11	9	11	9	12	10	15	13
50	37	13	9	13	9	15	10	17	12
60	45	16	7	16	8	18	9	20	12
75	55	17	7	18	8	22	9	22	11
100	75	23	7	23	8	26	8	30	11
120	90	27	7	27	7	27	8	32	10
150	110	33	7	33	7	33	8	39	9
180	132	40	7	40	7	40	8	46	9
215	160	45	7	45	7	48	8	53	9
270	200	50	5	50	7	60	8	60	9
335	250	55	5	55	6	75	8	75	9
425	315	69	5	69	6	95	8	95	9
480	355	78	5	78	6	99	8	107	9
540	400	80	5	88	5	100	8	108	9
605	450	90	5	99	5	113	6	122	9

*RD - Reducción en % de la corriente nominal de la línea debido a los condensadores. (Resulta muy útil para la elección de la protección contra sobrecargas).

Tabla II

10.2. Valor de los condensadores para transformadores

En este caso se trata de compensar la potencia reactiva absorbida por el transformador cuando está en vacío (por ejemplo durante la noche). Esta potencia reactiva varía según el constructor y el tipo de transformador.

Por lo general elijeremos un 4% del valor de su potencia nominal aunque de forma más precisa aplicaremos el porcentaje del valor de la U_{cc} o tensión de cortocircuito del transformador.

La Tabla III nos muestra los valores de los condensadores en función de las tensiones del primario del transformador. Debemos tener la precaución de no sobrepasar nunca el 10% de la potencia nominal del transformador en posibles casos de sobrecompensación.

Para evitar problemas de resonancia con los armónicos (caso de que existan) es necesario verificar la frecuencia de resonancia entre la inductancia del

Potencia del trafos. (kVA)	Potencia del condensador en función de la tensión del primario (kvar)		
	5 a 10 kV	15 a 20 kV	25 a 30 kV
25	1	2,5	3
50	3,5	5	6
75	5	6	7
100	6	8	10
160	10	12,5	15
250	15	18	22
315	18	20	24
400	20	22,5	28
630	28	32,5	40
800	32	36	45
1.000	45	50	59
1.250	62	67,5	78
1.600	88	93	104
2.000	106	112	125
2.500	150	157	180
3.150	189	197	215

Tabla III

bobinado del transformador y la capacidad del condensador. Entonces comprobaremos que dicha frecuencia de resonancia esté lo suficientemente alejada de los armónicos más frecuentes (3º, 5º, 7º y 11º).

La frecuencia de resonancia puede calcularse según la fórmula siguiente:

$$f_o = f \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q_c}}$$

- siendo f_o = la frecuencia de resonancia
- f = la frecuencia de la red
- S_{cc} = la potencia de cortocircuito del transformador
- Q_c = la potencia del condensador

Una forma de conocer la potencia de cortocircuito del transformador S_{cc} , es mediante la relación entre su potencia nominal y la tensión de cortocircuito.

$$S_{cc} = \frac{S_n}{U_{cc}}$$

- Ejemplo. Debemos compensar un transformador de 630 kVA con una tensión de c.c. de 4,58% y en la que hay unos valores elevados de armónicos de orden 5º y 7º.

Para 630 kVA elegimos 28 kvar (Tabla III). Entonces vamos a comprobar la frecuencia de resonancia del conjunto.

$$f_o = f \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q_c}} \text{ como } n = \frac{f_o}{f}$$

el orden del armónico (n) valdrá:

$$n = \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q_c}}; S_{cc} = \frac{630}{0,0458} = 13.755 \text{ kVA}$$

$$n = \sqrt{\frac{13.755}{28}}; n = 22,1$$

o sea que el punto de resonancia estaría en el orden 22,1 o lo que es lo mismo la frecuencia de resonancia es:

$$f_o = 22,1 \times 50 = 1.105 \text{ Hz}$$

se encuentra muy lejos de los armónicos peligrosos.

En este ejemplo no se han tenido en cuenta las inductancias de los cables, motores, etc. y considerando solamente la compensación del transformador. Con otros condensadores trabajando en la línea, el punto de resonancia desciende y se va acercando a la frecuencia de los armónicos peligrosos.

10.3. Cálculo de los condensadores en convertidores de corriente continua

El cálculo de la potencia capacitiva necesaria para compensar un convertidor de corriente continua controlado por semiconductores, viene dado con la ayuda de la fórmula en la Fig. 21, en donde:

- Q_c = Potencia del condensador
- I_d = Intensidad del convertidor de continua
- U_d = Tensión del convertidor de continua
- U_o = Tensión en vacío de alterna

$$\frac{Q_c}{I_d 1,35 U_o}$$

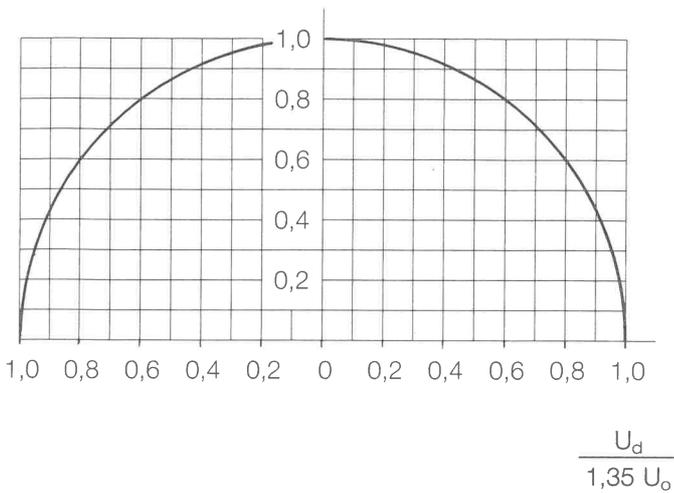


Fig. 21

- Veamos un ejemplo práctico de aplicación.

Sea un convertidor a tiristores en donde la $I_d = 360$ A; $U_d = 440$ V; y la $U_o = 400$ V.

En el eje de abscisas tenemos:

$$\frac{U_d}{1,35 \times U_o} = \frac{440}{1,35 \times 400} = 0,82$$

Tomando este valor de 0,82, el punto que corta en la curva corresponde al 0,57 en ordenadas el cual sustituido a la fórmula:

$$0,57 = \frac{Q_c}{1,35 \times I_d \times U_o} = \frac{Q_c}{1,35 \times 360 \times 400}$$

de donde:

$$Q_c = 0,57 \times 1,35 \times 360 \times 400 = 111 \text{ kvar}$$

Debemos tener en cuenta que este tipo de carga es un importante generador de armónicos por lo que los condensadores deben estar protegidos mediante reactancias de choque o antirresonancia.

11. INFLUENCIA DE LOS ARMONICOS DE LA LINEA SOBRE LOS CONDENSADORES

Los equipos electrónicos en general y sobre todo los que están constituidos por rectificadores (diodos, tiristores, triacs, etc.), los hornos de inducción, las reactancias saturables, las lámparas de descarga, etc. Todos ellos son fuentes generadoras de armónicos en sus distintos órdenes.

Estos armónicos modifican las características de la red en tensión e intensidad según las siguientes fórmulas:

$$U'_{ef} = U_{ef} \sqrt{1 + k^2}$$

$$I'_{ef} = I_{ef} \sqrt{1 + n^2 k^2}$$

siendo la U'_{ef} e I'_{ef} la tensión e intensidad resultante que circula por la línea con la presencia de armónicos «k» es el porcentaje de armónicos y «n» el orden de los mismos.

- Veamos un ejemplo:

Consideremos un condensador conectado a una red de 380 V y que absorbe una intensidad de 20 A. El armónico de 5º orden de la instalación es del 40%.

El valor de la tensión eficaz real será:

$$U'_{ef} = 380 \sqrt{1 + \left(\frac{40}{100}\right)^2} = 409 \text{ V}$$

y el de la intensidad eficaz real:

$$I'_{ef} = 20 \sqrt{1 + 5^2 \left(\frac{40}{100}\right)^2} = 44,7 \text{ A}$$

es el doble de la nominal del condensador.

Si este 40% fuera del armónico de orden 7º, la intensidad eficaz real sería entonces de:

$$I''_{ef} = 20 \sqrt{1 + 7^2 \left(\frac{40}{100}\right)^2} = 59,5 \text{ A}$$

en este caso es tres veces la intensidad nominal.

De todo ello se deduce que la presencia de armónicos en bornes de un condensador provoca a éste un aumento muy elevado de intensidad con relación al aumento de tensión con lo que se pueden presentar los siguientes problemas:

A - Como la impedancia de un condensador es inversamente proporcional a la frecuencia aplicada en bornes

$$X_c = \frac{1}{C \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}$$

significa que a frecuencias más elevadas (armónicos) su impedancia X_c disminuye por lo tanto la intensidad aumenta. Su efecto se compara a cortocircuitos sucesivos que pueden averiar a los equipos electrónicos sin proteger o mal protegidos.

B - En caso de que los posibles equipos electrónicos estén bien protegidos o sobredimensionados, entonces serán capaces de soportar las sobrecargas producidas por los condensadores, pero su vida se verá disminuída a causa de estas sobreintensidades que los recorren sobretudo en régimen no senoidal donde, además, pueden haber corrientes transitorias (puntas de varios miles de Ampere durante tiempos extremadamente cortos) no detectados por los aparatos de medida habituales.

Todos los peligros antes mencionados pueden evitarse instalando, en serie con los condensadores, unas reactancias que amortigüen la frecuencia propia del circuito y que funcionan de la siguiente forma:

Su impedancia vale $X_L = L \cdot 2 \cdot \pi \cdot f$

entonces cuanto mayor es la frecuencia (armónicos) más impedancia opondrá al circuito. Por tanto vemos que esta reactancia actúa como una pantalla para el condensador.

11.1. Resonancia serie

Como hemos visto, la impedancia de una bobina aumenta con la frecuencia y lo inverso ocurre para el condensador. Si consideramos un circuito simple (Fig. 22) R-C-L en el que podemos despreciar momentáneamente la resistencia, vemos que la impedancia de la bobina (valor módulo) vale:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

y la del condensador:

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

entonces la impedancia total del circuito (despreciando la resistencia) será:

$$\bar{X} = \bar{X}_L + \bar{X}_C$$

existe un cierto valor de la frecuencia en el que las dos impedancias se igualan y a este valor se le denomina «Frecuencia de Resonancia» y se representa f_0 .

$$\bar{X}_L = \bar{X}_C$$

$$2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}; \quad f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{LC}}$$

En este punto la corriente solamente está limitada por la resistencia de las líneas R (que se ha despreciado al principio de esta exposición) Fig. 23, lo que quiere decir que esta resistencia es muy débil y por tanto la intensidad es muy elevada, en dicho circuito R-C-L.

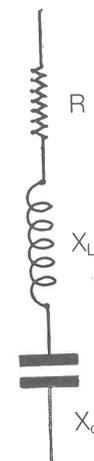


Fig. 22

Esta intensidad al atravesar el condensador y la línea provocará una sobretensión muy importante U_c entre sus bornes. La relación entre esta sobretensión y la tensión nominal es lo que se denomina «Q» factor de sobretensión o factor de calidad.

$$Q = \frac{U_c}{U}$$

Las curvas de la Fig. 24 representan la variación de sobretensión en función de la frecuencia. La curva 1 representa la línea de carga mientras que la curva 2 es la línea en vacío.

Para la compensación de la línea con condensadores, observando las curvas, vemos que la tensión en carga vale 0,96 de la tensión de partida, o sea que la caída de tensión es del 4%. En el caso de que hubiera armónicos la relación U_c/U es mayor que 1.

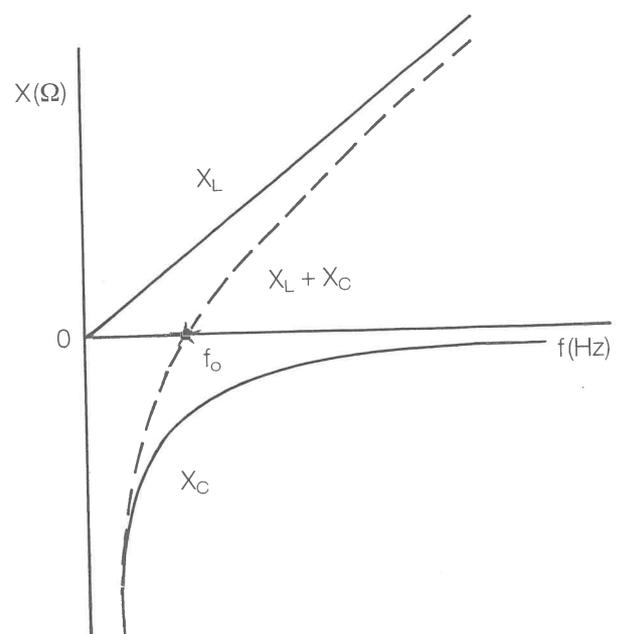


Fig. 23

- En carga, el valor de U_c/U es de 1,87 a la frecuencia de 350 Hz, o sea en el armónico 7º.
- Para este mismo armónico la relación U_c/U , en vacío, pasa a valer 5,32 y el máximo se produce a la frecuencia de 388 Hz con un valor de 77. Esta frecuencia no corresponde a un múltiplo exacto de la fundamental a 50 Hz, pero sólo que varíen ligeramente las condiciones, la resonancia exacta se podría producir en el armónico 7º con un coeficiente de sobretensión del orden de 77 igualmente.

Si por ejemplo la amplitud del armónico 7º vale 1% de la fundamental, nos encontraríamos con los siguientes valores:

	Sobreten.	Sobreint.
Línea en carga	1,87%	13,10%
Línea en vacío	5,32%	37,12%

Pero estos armónicos tanto en carga como en vacío son aceptables por los condensadores. Pero a la frecuencia de resonancia tendrían, en vacío, un 77% de sobretensión y un 539% de sobreintensidad, lo que equivale a 5,5 veces la intensidad nominal, y esto es totalmente inadmisibles.

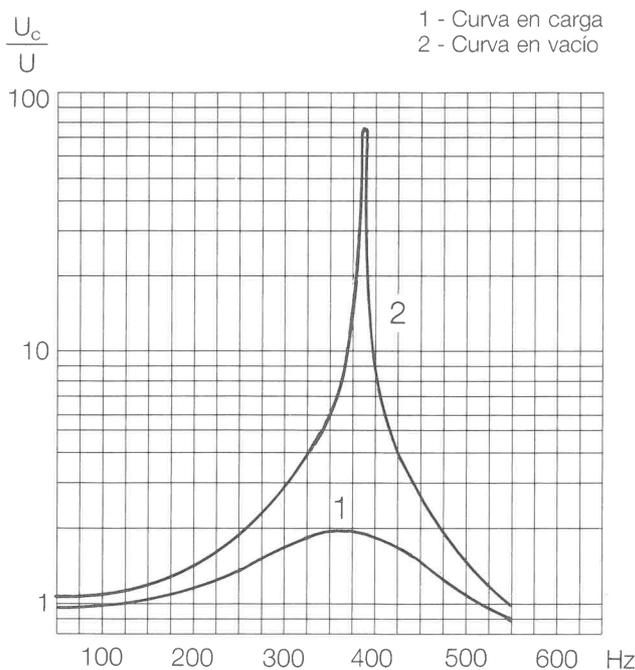


Fig. 24

11.2. Protección contra resonancia

Como hemos visto, cuando la frecuencia de resonancia entre la inductancia de la línea y los condensadores es igual a un armónico, la intensidad resultante se puede incrementar muchas veces la intensidad nominal. Para evitar dicha resonancia se debe calcular una reactancia tal, de forma que el conjunto L-C presente una impedancia inductiva para todos los armónicos posibles de la línea (Fig. 25). A esta reactancia se la conoce como «Reactancia antirresonancia» y que será la misma que la reactancia de choque vista más atrás.

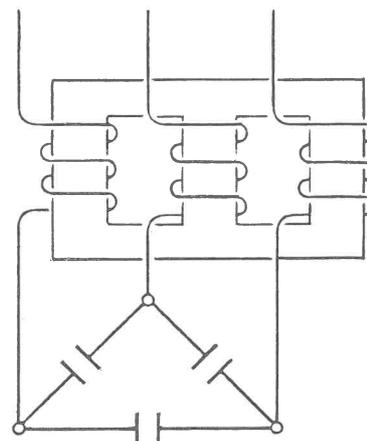


Fig. 25

- Dimensionado de intensidad.
Se sabe que la impedancia ofrecida al paso de las corrientes armónicas de un conjunto L-C en serie es inferior a la que ofrecería el condensador solo. Por esta razón las reactancias deben estar previstas para soportar permanentemente las corrientes armónicas importantes sin calentarse ni entrar en saturación.
- En la práctica la sobretensión generada por el paso de las intensidades armónicas en el grupo L-C son raramente superiores al 5% de la tensión nominal.
- Tensión en bornes del condensador.
A causa de la presencia de reactancias, la tensión en bornes del condensador aumenta. Entonces será necesario elegir un condensador en el que su tensión nominal sea superior a la de la red.
- Potencia de compensación.
La potencia de compensación desde el punto de vista de los contactores viene determinada como la potencia de los condensadores a la tensión y frecuencia fundamentales, menos la potencia absorbida por la reactancia.

11.3. Eliminación de los armónicos

Las reactancias antirresonancia protegen los aparatos eléctricos, pero no eliminan los armónicos. En el caso imperioso de ser necesario eliminarlos, se deberán instalar «filtros». Entonces debe procederse a calcular una batería de filtros sintonizada a la frecuencia que se desea eliminar. En la práctica no se suelen realizar filtros para armónicos superiores al orden 13º, ya que su amplitud es despreciable.

El filtro de la Fig. 26 está compuesto por un condensador en serie con una reactancia, en la que la frecuencia de resonancia f_0 del conjunto debe ser igual a la frecuencia del armónico que se desea eliminar. Así la impedancia a dicha frecuencia se reduce a la resistencia del circuito L-C, y toda la intensidad armónica se reparte entre el filtro y la red sabiendo, en la práctica, que la mayor parte va hacia el filtro por ser su impedancia mucho menor. De esta forma se elimina el armónico de la línea.

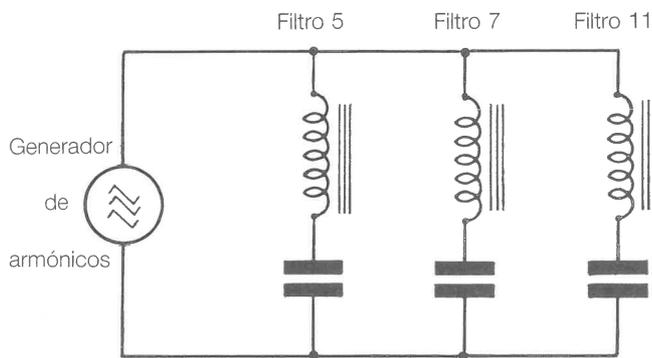


Fig. 26

Debemos tener en cuenta que si, por alguna razón, las corrientes armónicas aumentan a un valor superior al calculado para el filtro, éste corre el riesgo de quemarse. Por otra parte y debido a que se necesita un filtro para cada frecuencia armónica que se desea eliminar, la línea corre también el riesgo de quedarse en capacitiva, con los consiguientes problemas acarreados, cuando descienda la carga en la misma.

11.4. Telemando en la red

Un sistema de telemando en la línea basado en frecuencias musicales, para la activación de relés, tiene el mismo efecto sobre los condensadores que los armónicos.

Su principio se basa en el empleo de un oscilador de frecuencia media que, gracias a un transformador apropiado, superpone a la tensión alterna de 50 Hz de la red, una tensión entre 180 y 2.000 Hz y de amplitud 5% de la fundamental. La inyección de esta señal en la red durante un tiempo muy corto, por ejemplo, para excitar relés de mando de contadores doble tarifa, no es generalmente un inconveniente para los condensadores, pero la presencia de éstos perturba el funcionamiento de los relés del mando a distancia. Dichas frecuencias actúan como cortocircuitos para los condensadores causando caídas de tensión inadmisibles para los relés.

La solución consiste en colocar antes de los condensadores, circuitos «tapón» para aumentar la impedancia a dichas frecuencias. Se trata pues de resonancia en paralelo sintonizada a la frecuencia de telemando, tal como se muestra en la Fig. 27, formada por una reactancia y un condensador en paralelo.

Con el fin de reducir el coste del condensador del circuito tapón, se puede prever en la reactancia un devanado secundario elevador de tensión en el que se conectará dicho condensador de filtraje. En este caso el nuevo valor del condensador C'_p será igual al C_p del circuito multiplicado por la raíz cuadrada de la relación de transformación.

$$C'_p = C_p \sqrt{\frac{N_1}{N_2}}$$

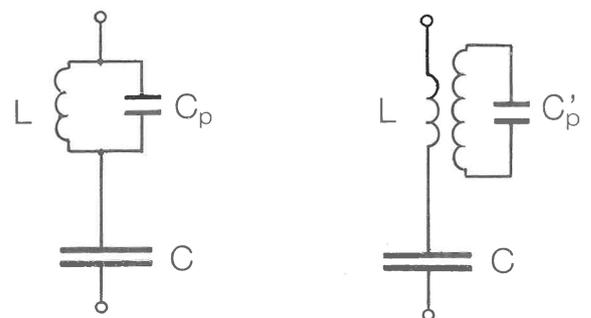


Fig. 27

12. TRANSITORIOS A LA CONEXION

En un condensador la intensidad y la tensión no están en fase. De ello resulta un fenómeno transitorio a la conexión de una carga capacitiva a la red, que provoca una elevación importante de la intensidad, momentáneamente, y que llega a ser máxima si en aquellos instantes la onda de tensión pasa por su valor máximo.

$$I_{\max} = \frac{Q_c}{\sqrt{3} \cdot U} \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{f_o}{50}$$

\uparrow Función de la frecuencia de oscilación
 \uparrow Valor de pico
 \uparrow Intensidad a 50 Hz

La Fig. 28 muestra un gráfico de un oscilógrafo que registró la conexión de un condensador de 10 kvar a una red de 400 V. En el caso de que la frecuencia de oscilación sea de 1.700 Hz la corriente aumenta 34 veces su valor de pico y en el caso de que fuera de 14.000 Hz la intensidad se multiplicaría por 280.

En el condensador de 10 kvar de la fig. 28 (con una cte. de tiempo τ de 9×10^{-5} s) la intensidad ascendió a un valor próximo a los 4.550 A.

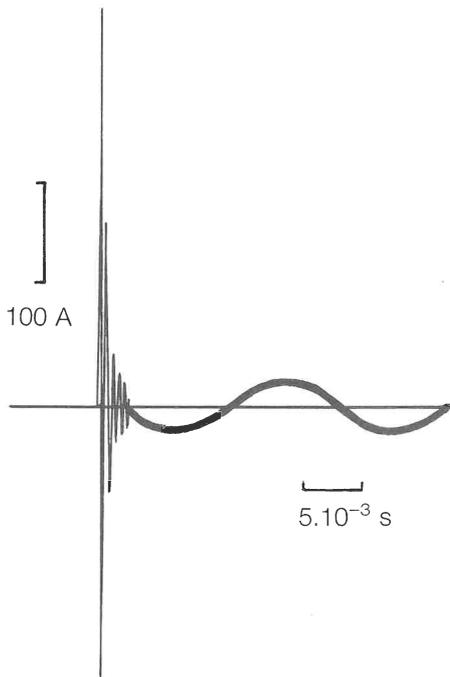


Fig. 28

Esta intensidad puede ascender al doble del valor ensayado si el condensador se encontrase cargado. Es por esta razón que el regulador varmétrico de las baterías de condensadores debe tener un tiempo suficientemente largo entre una desconexión y la posterior conexión del mismo escalón para dar tiempo a su descarga.

13. RESISTENCIAS DE DESCARGA

Hoy en día los condensadores se fabrican en proli-propileno metalizado, el cual presenta una resistencia ohmica muy baja y la única limitación se efectúa a través de su reactancia capacitiva propiamente dicha. Por este motivo debemos prever resistencias de descarga ya que de no ser así, la carga del condensador subsistiría mucho tiempo después de su desconexión de red.

La tensión residual de un condensador, una vez se desconecta, sigue una ley exponencial definida por la expresión:

$$u = U \times e^{-\frac{t}{RC}}$$

u = Tensión en bornes del condensador después de un tiempo t .

U = Tensión inicial.

R = Resistencia del circuito.

C = Capacidad del condensador.

De una forma práctica y teniendo en cuenta las tolerancias, tomamos como tensión de red la tensión nominal con un 10% y si además consideramos la tensión de pico, la fórmula final será:

$$u = 1,1 \times U_n \times \sqrt{2} \times e^{-\frac{t}{RC}}$$

13.1. Descarga lenta

Según las normas actuales IEC 831-1, la tensión final no debe superar los 50 V al cabo de 1 min una vez desconectado el condensador. Aplicando la fórmula anterior:

$$50 = 1,1 \cdot U_n \cdot \sqrt{2} \cdot e^{-\frac{60}{RC}}$$

siguiendo la ley exponencial de la Fig. 29. En la Tabla IV vemos el valor del grupo RC a las distintas tensiones de red. Si C viene expresada en μF , R será en $M\Omega$.

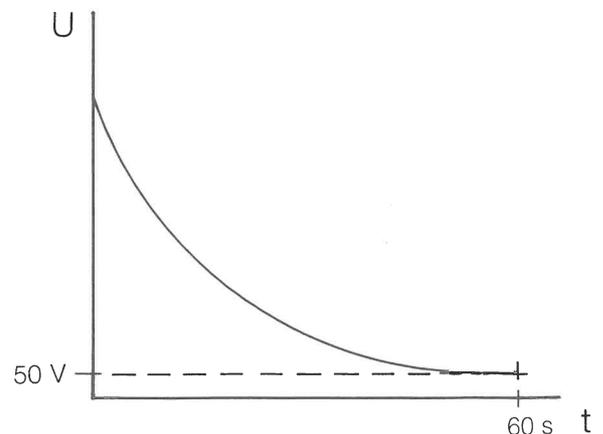


Fig. 29

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

Tabla IV

Conjunto RC para resistencias de descarga lenta.

- Veamos un ejemplo para calcular la resistencia de descarga lenta de un condensador de 40 kvar a 400 V 50 Hz.

$$Q_c = 3 \cdot \omega \cdot C \cdot U^2; \quad C = \frac{Q_c}{3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot U^2}$$

$$C = \frac{40.000}{3 \times 2 \times 3,14 \times 50 \times 400^2}$$

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

En la Tabla IV, para 400 V vemos un valor RC = 23,8.

$$R = \frac{23,8}{265} = 0,089 \text{ M}\Omega \text{ o sea } 89 \text{ k}\Omega$$

Este caso es para sistemas trifásicos con una resistencia por fase, o sea tres resistencias.

Si por razones de espacio o cableado sólo se pueden utilizar dos resistencias en vez de tres, el dimensionado de las mismas debe ser de 1/3 del valor hallado para tres resistencias.

Para dimensionar la potencia debemos considerar las posibles fluctuaciones de la tensión. Para ello incrementaremos la tensión en un 10%.

$$P = \frac{(1,1 \times U)^2}{R}$$

En nuestro ejemplo.

$$P = \frac{(1,1 \times 400)^2}{89.000} = 2,17 \text{ W}$$

13.2. Descarga rápida

En una batería automática, debido a la entrada y salida de escalones, es interesante disponer de una mayor protección para asegurar una perfecta descarga en cada condensador. Para ello se dispone de unas resistencias de descarga que actúan a través de un contacto cerrado del contactor de maniobra tal como muestra la Fig. 30 (las resistencias marcadas «R»). Dichas resistencias sólo entran en servicio cuando el contactor abre el circuito, quedando fuera de servicio al conectarse dicho contactor.

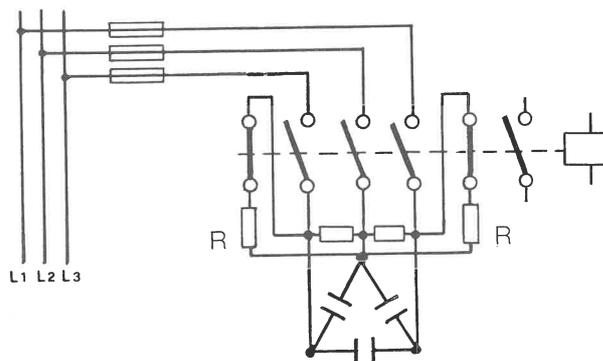


Fig. 30

El tiempo de descarga en estas resistencias es de 20 s y en la Tabla V podemos ver los valores RC para cada tensión teniendo en cuenta que son grupos de dos resistencias.

Para dimensionar la potencia se sigue el mismo camino que en las resistencias lentas, pero en este caso podemos tomar la mitad del resultado obtenido ya que éstas sólo deben disipar la energía de los condensadores al quedarse sin tensión.

230V	RC = 4
400V	RC = 3.1
415V	RC = 3
480V	RC = 2.9
500V	RC = 2.8
660V	RC = 2.5

Tabla V

Conjunto RC para resistencias de descarga rápida.

- Ejemplo de cálculo de resistencias para descarga rápida en el anterior condensador de 40 kvar, 400 V, 50 Hz.

Se ha visto que $C = 265 \mu\text{F}$, entonces en este caso
Tabla V:

$$RC = 3,1 \text{ en una red de } 400 \text{ V}$$

$$R = \frac{3,1}{265} = 0,012 \text{ M}\Omega \text{ o sea } 12 \text{ k}\Omega$$

la potencia será:

$$P = \frac{(U \times 1,1)^2}{R} = \frac{(400 \times 1,1)^2}{12.000} = 16 \text{ W}$$

entonces con la mitad es suficiente

$$P = 8 \text{ W}$$

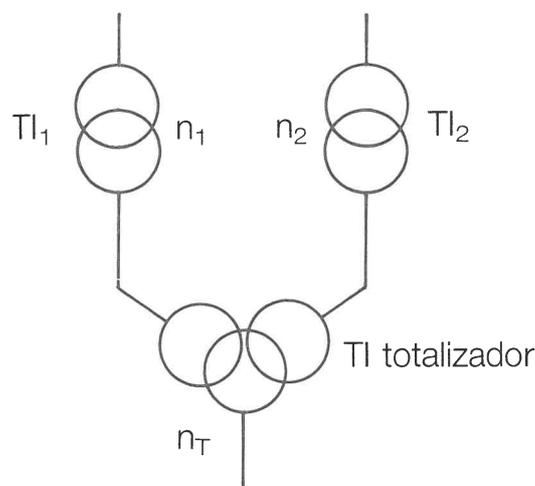


Fig. 31

14. EL TRANSFORMADOR DE INTENSIDAD

Para que una batería de condensadores pueda ajustar automáticamente la energía reactiva de una instalación, es necesario que el relé regulador disponga de varias informaciones de la red tales como:

- el orden de sucesión de fases
- la tensión de red
- la intensidad total que circula

Entonces, para transmitir toda esta información al regulador de la batería, se necesita su conexión a la red y la presencia de un transformador de intensidad instalado en la misma.

Para calcular el valor del primario del transformador de intensidad (TI) emplearemos la siguiente fórmula:

$$I = \frac{S}{U \times \sqrt{3}} \times 1.000$$

siendo S = Potencia del transformador de la subestación (kVA)

U = Tensión del secundario (V)

Las características del TI serán:

- Intensidad del secundario = 5 A
- Potencia mínima = 10 VA
- Precisión mínima = clase 1

- En el ejemplo siguiente veremos como calcular el transformador de intensidad de una red alimentada por un transformador de 500 kVA en 400 V 50 Hz.

$$I = \frac{500}{400 \sqrt{3}} \times 1.000 = 722 \text{ A}$$

Este TI será de 800/5; 10 VA; clase 1.

El totalizador es un dispositivo que recoge los valores de distintos TI instalados y como resultado se obtiene un único valor $X/5$. Se emplea, por ejemplo, en casos de varios transformadores acoplados en paralelo en un mismo secundario. Como el TI ha de instalarse lo más cerca posible de la fuente de alimentación y, en los casos de transformadores en paralelo, es imposible encontrar un sólo punto común por donde circule toda la intensidad de consumo, debemos colocar distintos TI y un totalizador que nos indique la intensidad máxima que circula en la totalidad de la red.

Los distintos TI ($X/5$) deben colocarse en la misma fase y el totalizador será $5 + 5 + \dots/5$.

En la Fig. 31 vemos la conexión de los secundarios de dos TI y un totalizador en donde n_1 y n_2 son las relaciones de transformación en cada uno de ellos. Entonces la relación de transformación equivalente para la regulación del C/K del relé varmétrico será igual a la suma de los dos TI/5.

Si por ejemplo tenemos instalados dos TI, uno de 600/5 y el otro de 200/5, la relación de transformación equivalente será:

$$\frac{600}{5} + \frac{200}{5} = \frac{800}{5} = 160$$

Esto significa que n_T será de 160 como si sólo existiera un TI y del cual debe colgar la batería de condensadores en sus bornes de entrada k y l .

15. DIMENSIONADO DEL APARELLAJE ELECTRICO

15.1. Fusibles

Para asegurar una protección contra cortocircuitos o sobrecargas, se deben instalar fusibles entre la alimentación y el contactor, puesto que son más importantes los cables de alimentación que los cables de conexión entre contactor y condensador. Estos fusibles deben ser de tipo «lento» y estar dimensionados para una intensidad nominal comprendida entre 1,7 y 2 veces el valor de la intensidad nominal del condensador.

Estos valores elevados son debidos a una posible presencia de armónicos y a las puntas de intensidad generadas a la conexión del condensador.

Eventualmente pueden conectarse dos condensadores en paralelo con un mismo fusible, teniendo presente al dimensionarlo la carga de los dos condensadores.

15.2. Contactores

La selección de los contactores para maniobrar condensadores debe hacerse con mucho cuidado puesto que los catálogos de los fabricantes, en general, suministran muy pocos datos al respecto o éstos son poco fiables. Es preferible y más económico contactores sobredimensionados que tener problemas con los mismos.

En el arranque de un condensador, el contactor debe ser capaz de soportar el transitorio a la conexión y las posibles sobrecargas debidas a armónicos que puedan existir en la red. Es por este motivo que para conseguir el contactor óptimo se deben realizar pruebas con los mismos, ya que no existe una regla física que te garantice un número de maniobras determinado.

El arco generado en el propio contactor al entrar en servicio depende de muchos factores, tales como la propia carga capacitiva, la tensión de la línea, el punto en que se halle la senoide de la red en aquellos instantes, etc. Tengamos presente que las pérdidas o resistencia interna en los condensadores de polipropileno metalizado son muy bajas y cada vez que se conectan a la red es prácticamente un cortocircuito.

Esto debe tenerse en cuenta al entrar en servicio un segundo condensador de una batería automática en la que ya existe un primer paso conectado. Al ser prácticamente un cortocircuito la conexión de este segundo paso, el primero ya conectado, tiende a descargarse sobre el segundo y sus contactos pueden rebotar durante esta fracción de segundo acortando la vida de éste en muchas maniobras.

Para probar un contactor se le efectúan 40.000 maniobras y al cabo de las mismas los contactos deben estar en buen estado. Se siguen las maniobras hasta 75.000 y el contactor no debe presentar síntomas de soldadura, sólo un fuerte desgaste de los contactos. La prueba sigue hasta 100.000 maniobras que es el máximo que puede soportar un contactor cuando maniobra cargas capacitivas. Si la prueba da buenos resultados se puede ensayar para la misma potencia un contactor de tamaño inferior e inversamente en caso de malos resultados.

Es interesante confirmar los resultados una o dos veces al año con el fin de evitar problemas por posibles cambios en las características por parte del fabricante.

15.3. Transformador de maniobra

Por razones de estandarización, a veces debemos utilizar un transformador para el circuito de maniobra. El dimensionado del mismo será la suma de:

- la potencia total consumida por las bobinas de todos los contactores, menos uno, una vez conectados.
- la potencia consumida por la bobina de un contactor a la conexión.
- la potencia consumida por otros elementos (relés, luces piloto, regulador, etc.).

15.4. Cables del circuito de maniobra

La sección del hilo de conexión viene determinada por la intensidad que circula, incrementando la tensión en un 10% por posible sobretensión.

La Tabla VI nos muestra los valores máximos de intensidad admisibles para hilos de Cu aislados con PVC según norma IEC 292-1.

Sección en mm ²	Corriente en A
0,75	4
1,00	6
1,50	12
2,50	20

Tabla VI

Los cables deben ser flexibles y superiores a 0,75 mm² para asegurar una cierta resistencia mecánica y evitar roturas por las vibraciones que provocan los contactores en sus conexiones y desconexiones.

15.5. Cables para el circuito de potencia

Las secciones de los cables se dimensionan según los valores de la Tabla VII. La intensidad nominal se obtiene por la fórmula:

$$I_n = \frac{Q_c}{\sqrt{3} \times U}$$

Q_c = Potencia del condensador en vacío

U = Tensión nominal entre fases

Si los cables llevan terminales, éstos deben estar fuertemente apretados para obtener un buen contacto eléctrico. Un ensayo a tracción confirma el apriete.

Corriente nominal I _n por fase del condensador A	Sección del cable mm ²	
	TRIPOLAR	UNIPOLAR
1,0 a 5,5	3 x 1,5	2,5
5,5 a 8,3	3 x 2,5	2,5
8,3 a 13,5	3 x 4,0	2,5
13,5 a 19,0	3 x 6,0	4
19,0 a 27,5	3 x 10,0	6
27,5 a 40,0	3 x 16,0	10
40,0 a 50,0	3 x 25,0	16
50,0 a 62,5	3 x 35,0	25
62,5 a 78,0	3 x 50,0	35
78,0 a 100,0	3 x 70,0	50
100,0 a 160,0	3 x 95,0	70
160,0 a 200,0	3 x 120,0	95
200,0 a 260,0	{ 3 x 150,0	120
	{ ó 2 x (3 x 70,0)	
260,0 a 300,0	{ 3 x 185,0	150
	{ ó 2 x (3 x 95,0)	
300,0 a 400,0	{ 3 x 240,0	240
	{ ó 3 x (3 x 95,0)	
	{ ó 2 x (3 x 120,0)	
etc...	etc...	

Tabla VII

15.6. Seccionador general

En cargas capacitivas, ya sean automáticas o manuales, siempre es aconsejable colocar un seccionador general que pueda desconectar el armario en caso de avería o mantenimiento, para de este modo no dejar toda la línea sin tensión al manipularlas.

El cálculo de este seccionador viene determinado por la suma de las intensidades de todos los escalones y aplicando un coeficiente de 1,8 a 2 por posibles incrementos por armónicos:

16. REFRIGERACION

Al instalar una batería de condensadores se deben tomar una serie de medidas en lo que se refiere al lugar donde vaya a ubicarse (Temp. Amb.) y del espacio que se disponga en el propio armario para su refrigeración. Para conseguir una buena disipación del calor, debemos primero calcular el valor de las pérdidas que se generarán y seguidamente ver como se podrán disipar.

16.1. Cálculo de las pérdidas

Los contactores, fusibles y cableado deben diseñarse para funcionar en un ambiente con una temperatura máxima determinada (generalmente 40°C). Debido a las pérdidas que éstos generan, la temperatura del armario aumenta y el total de pérdidas es la suma de:

– Contactores.

Las pérdidas en Watt de las bobinas de los contactores vienen expresadas en los catálogos de los fabricantes. A éstas hay que sumarles 1,5 W por los contactos de los mismos.

– Fusibles y Portafusibles.

Pueden estimarse las pérdidas unitarias multiplicando la intensidad que circula a través de ellos por 0,06 para los fusibles lentos, y el resultado expresado en Watt.

– Cableado.

Una vez determinada la longitud y sección de los cables, las pérdidas que se generan vienen determinadas aplicando el valor de la resistencia (Ω/m) de la Tabla VIII multiplicada por la intensidad al cuadrado. El valor hallado son las pérdidas en Watt de los cables.

– Resistencias de descarga.

Sólo deben tenerse en cuenta las resistencias que están permanentemente conectadas (descarga lenta) y las pérdidas en Watt son el resultado de dividir la tensión aplicada en sus bornes elevada al cuadrado por el valor de la resistencia en Ohm.

– Transformador de maniobra.

Las pérdidas en Watt son del orden de un 10% de su potencia nominal en VA.

– Condensadores.

Si los condensadores están en el mismo armario se pueden considerar las pérdidas de 0,5 W por cada kvar.

16.2. Superficie de disipación

Se debe medir la superficie del armario que se halla en contacto con el exterior en dm² o sea hay que sumar los paneles laterales más el superior.

16.3. Cálculo del incremento de temperatura

El incremento de temperatura en °C se obtiene dividiendo las pérdidas totales (W) por la superficie de disipación (dm²) y multiplicando el resultado por 17,5 (sin ventilación forzada).

Un incremento de temperatura de 20°C es considerado normal. Cuando las potencias son elevadas y la temperatura ambiente también, es necesario estudiar cuidadosamente la refrigeración del armario mediante ventilación forzada controlada por un termostato.

Para facilitar la circulación del aire en el interior de un armario debe respetarse una separación de 15 mm como mínimo entre contactores y fusibles y distribuir por igual el espacio libre entre condensadores, contactores y fusibles.

Diámetro mm	Sección mm ²	Peso kg/km	Resistencia Ω/m
0,05	0,00196	0,017	8,796
0,10	0,00785	0,070	2,196
0,20	0,03142	0,280	0,549
0,30	0,07069	0,629	0,244
0,40	0,1257	1,12	0,137
0,50	0,1964	1,75	0,0878
0,60	0,2827	2,52	0,0610
0,70	0,3848	3,43	0,0448
0,80	0,5027	4,47	0,0343
1,00	0,7854	6,99	0,0220
1,13	1	8,9	0,0172
1,2	1,131	10,07	0,0152
1,38	1,5	13,35	0,0115
1,5	1,767	15,73	0,00976
1,78	2,5	22,3	0,00690
2	3,142	28	0,00549
2,26	4	35,6	0,00431
2,6	5,309	47,3	0,00325
2,76	6	53,4	0,00287
3	7,069	62,9	0,00244
3,2	8,042	71,6	0,00214
3,4	9,079	80,8	0,00190
3,57	10	89	0,00172
4,52	16	142,4	0,001075
5,63	25	222,5	0,000688
6,67	35	311,5	0,000491
7,97	50	445	0,000344
11,00	95	845,5	0,000181

Tabla VIII

Resistencia a 20°C de los cables de cobre electrolítico.

17. CALCULO PRACTICO DE LA POTENCIA DE LOS CONDENSADORES NECESARIOS PARA LA CORRECCION DEL FACTOR DE POTENCIA

A continuación vamos a detallar los dos sistemas más usuales para determinar la potencia de los condensadores a instalar en una red con un bajo cos φ.

17.1. Partiendo de la potencia instalada (kW)

En este caso debemos conocer la potencia útil que está funcionando, o bien la potencia aparente del transformador (kVA) y el cos φ de la instalación. Para ello aplicaremos las siguientes fórmulas dimensionales:

$$kvar = kW (tg \varphi_1 - tg \varphi_2)$$

para hallar los kW:

$$kW = kVA \times \cos \varphi_1$$

el valor (tg φ₁ - tg φ₂) se halla directamente en la Tabla IX partiendo del cos φ₁ (factor de potencia que tenemos en la instalación) y cos φ₂ (factor de potencia que queremos conseguir).

- Ejemplo: Sea una instalación con un transformador de 2.500 kVA y una carga útil de 1.900 kW.

$$\cos \varphi_1 = \frac{1.900}{2.500} = 0,76$$

deseamos mejorar a cos φ₂ = 0,95.

$$Q_c = 1.900 \times 0,52 \text{ (ver Tabla IX)}$$

$$Q_c = 988 \text{ kvar}$$

17.2. Partiendo del recibo de la compañía suministradora o lectura de contadores

El recibo de la compañía suministradora de energía nos da el valor de los kWh, consumidos durante un período de tiempo y el cos φ o el tanto por ciento de recargo, entonces aplicamos el siguiente proceso:

Para deducir el cos φ partiendo del recargo utilizamos la Tabla X y para hallar los kW de potencia, dividiremos el consumo del recibo (kWh) por el tiempo transcurrido expresado en horas.

Con estos datos ya podemos aplicar las fórmulas del párrafo anterior.

Tabla que da: $\text{tg } \varphi_1 - \text{tg } \varphi_2$ en función del $\cos \varphi_1$ y del $\cos \varphi_2$

Ejemplo: si $\cos \varphi_1 = 0,64$ y $\cos \varphi_2 = 0,90$: $(\text{tg } \varphi_1 - \text{tg } \varphi_2) = 0,72$

cos φ_1	Factor de potencia requerido cos φ_2												
	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	3,17	3,12	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	2,35	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	1,16	1,22	1,28	1,31	1,35	1,43	1,64
0,54	0,54	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
0,86							0,03	0,11	0,17	0,23	0,26	0,30	0,39
0,88								0,06	0,11	0,18	0,21	0,25	0,33
0,90									0,06	0,12	0,15	0,19	0,27
0,92										0,06	0,09	0,13	0,22
0,94											0,03	0,07	0,16
0,96												0,09	0,28
0,98													0,21

Tabla IX

ALUMBRADO

Tabla que contiene los valores del recargo porcentual Kr en función del $\cos \varphi$ de la instalación.

$$\text{Kr} (\%) = 100 \cdot (0,95 - \cos \varphi)$$

Ejemplos: Para Kr = 11%; $\cos \varphi = 0,84$
Para Kr = 35%; $\cos \varphi = 0,60$

cos φ	cifra decimal				
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
cifra centesimal					
0,00	45	35	25	15	5
0,01	44	34	24	14	4
0,02	43	33	23	13	3
0,03	42	32	22	12	2
0,04	41	31	21	11	1
0,05	40	30	20	10	0
0,06	39	29	19	9	0
0,07	38	28	18	8	0
0,08	37	27	17	7	0
0,09	36	26	16	6	0

FUERZA

Tabla que contiene los valores del recargo porcentual Kr en función del $\cos \varphi$ de la instalación.

$$\text{Kr} (\%) = \frac{17}{\cos^2 \varphi} - 21$$

Ejemplos: Para Kr = 23,2%; $\cos \varphi = 0,62$
Para Kr = 13,7%; $\cos \varphi = 0,70$

cos φ	cifra decimal				
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
cifra centesimal					
0,00	47,0	26,2	13,7	5,6	-0
0,01	44,4	24,7	12,7	4,9	-0,5
0,02	41,9	23,2	11,8	4,3	-0,9
0,03	39,5	21,8	10,9	3,7	-1,3
0,04	37,3	20,5	10,0	3,1	-1,8
0,05	35,2	19,2	9,2	2,5	-2,2
0,06	33,2	18,0	8,4	2,0	-2,6
0,07	31,3	16,9	7,7	1,5	-2,9
0,08	29,5	15,8	6,9	1,0	-3,3
0,09	27,8	14,7	6,2	0,5	-3,7

Para $\cos \varphi = 1$; Kr = -4

Tabla X

Si tenemos las lecturas de los consumos en activa (kWh) y en reactiva (kvarh) durante un período de tiempo, podemos aplicar estas otras fórmulas dimensionales:

$$kvar = \frac{kvarh - (tg \varphi \times kWh)}{h}$$

el valor de tg φ será el correspondiente al cos φ que queremos conseguir y cuyas equivalencias están mostradas en la Tabla XI.

- Ejemplo: Tenemos un recibo mensual con un consumo de energía activa de 20.000 kWh y un consumo de energía reactiva de 40.000 kvarh. Esta empresa trabaja 10 horas diarias durante 5 días a la semana y se desea conseguir un cos φ de 0,95.

Entonces, como el recibo es mensual vemos que la energía se ha consumido en:

$$10 \times 5 \times 4 = 200 \text{ horas}$$

la tg φ que queremos conseguir es de 0,32 ya que es la que corresponde al cos φ deseado de 0,95 (Tabla XI) y aplicando la fórmula antes expuesta:

$$P_c = \frac{40.000 - (0,32 \times 20.000)}{200} = 168 \text{ kvar}$$

A este valor de 168 kvar hay que añadir un 15 ó 20% como potencia de reserva para posibles valores de punta.

$$168 \times 1,2 \approx 200 \text{ kvar}$$

18. ANALISIS DE RENTABILIDAD

Para decidir la distribución de la potencia reactiva necesaria se debería comparar la rentabilidad en las diferentes alternativas, compensación central, en grupo o individual. Una forma de realizar el cálculo de rentabilidad es viendo el tiempo de amortización para ver con qué rapidez se amortiza cada alternativa de inversión. Para ello podemos hacer el siguiente cálculo:

- <u>INVERSIONES:</u>	Condensadores	[C]
	Equipo auxiliar	[EA]
	Obra civil	[OC]
	Trabajos instalación	[TI]
<hr/>		
Suma de inversiones	C + EA + OC + TI	
- <u>INGRESOS:</u>	Pot. Reactiva anual	[Q]
	Reducción pérd. anual	[RP]
<hr/>		
Suma de ingresos anuales	Q + RP	

tg φ	cos φ
3,00	0,316
2,95	0,321
2,90	0,326
2,85	0,331
2,80	0,336
2,75	0,341
2,70	0,347
2,65	0,353
2,60	0,359
2,55	0,365
2,50	0,371
2,45	0,377
2,40	0,384
2,35	0,391
2,30	0,398
2,25	0,406
2,20	0,413
2,15	0,421
2,10	0,429
2,05	0,438
2,00	0,447
1,95	0,456
1,90	0,465
1,85	0,475
1,80	0,485
1,75	0,496
1,70	0,507
1,65	0,518
1,60	0,529
1,55	0,542
1,50	0,554
1,45	0,567
1,40	0,581
1,35	0,595
1,30	0,609
1,25	0,624
1,20	0,640
1,15	0,656
1,10	0,672
1,05	0,689
1,00	0,707
0,95	0,725
0,90	0,743
0,85	0,762
0,80	0,780
0,75	0,800
0,70	0,819
0,65	0,838
0,60	0,857
0,55	0,876
0,50	0,894
0,45	0,911
0,40	0,928
0,35	0,943
0,30	0,957
0,25	0,970
0,20	0,980
0,15	0,989
0,10	0,995
0,05	0,998
0,00	1,000

Tabla XI

A partir de estos conceptos podemos deducir el Tiempo de Amortización haciendo:

$$\frac{C + EA + OC + TI}{Q + RP} \text{ (años)}$$

Veamos un ejemplo práctico de como se amortizan los condensadores en una instalación con un consumo mensual medio de energía activa de 270.000 kWh y de una energía reactiva mensual media de 286.000 kvarh. El tiempo de consumo mensual es de 200 horas durante 11 meses al año.

La potencia contratada es de 1.400 kW. El transformador de la subestación es de 2.000 kVA con una tensión de c.c. (U_{cc}) del 4,58%; 400 V; 50 Hz. Cables de 2 x 630 mm²; 100 m.

La Potencia Activa vale:

$$P = \frac{270.000 \text{ kWh}}{200 \text{ h}} = 1.350 \text{ kW}$$

La Potencia Reactiva es:

$$Q = \frac{286.000 \text{ kvarh}}{200 \text{ h}} = 1.430 \text{ kvar}$$

La Potencia Aparente:

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

$$S = \sqrt{1.350^2 + 1.430^2} = 1.967 \text{ kVA}$$

En este caso vemos que el transformador está trabajando a plena carga puesto que es de 2.000 kVA. Veamos el $\cos \varphi$.

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{1.350}{1.967} = 0,69$$

La batería de condensadores necesaria para conseguir un $\cos \varphi$ de 0,95 será:

$$Q = P (\text{tg } \varphi_1 - \text{tg } \varphi_2)$$

$$Q = 1.350 \times 0,75 = 1.012 \text{ kvar}$$

Una vez conocida la batería necesaria, pasamos a analizar la rentabilidad.

Si conectamos a la subestación una batería de 1.000 kvar, el consumo de reactiva total asciende a:

$$1.430 - 1.000 = 430 \text{ kvar}$$

Las componentes de la intensidad reactiva antes y después de la compensación serán:

$$I_Q = \frac{Q}{\sqrt{3} \times U}$$

$$I_{Q1} = \frac{1.430.000}{\sqrt{3} \times 400} = 2.064 \text{ A}$$

$$I_{Q2} = \frac{430.000}{\sqrt{3} \times 400} = 620 \text{ A}$$

La impedancia por fase del transformador será:

$$X_T = \frac{U^2}{S_{cc}} \quad \text{y} \quad S_{cc} = \frac{S}{U_{cc}}$$

siendo S_{cc} la Potencia de c.c. del transformador y U_{cc} la tensión de c.c. expresada en %.

$$S_{cc} = \frac{2.000}{0,0458} = 43.668 \text{ kVA}$$

$$X_T = \frac{400^2}{43.668 \times 1.000} = 0,004 \text{ } \Omega$$

La resistencia de los cables en el caso que nos ocupa (2 x 630 mm² por fase) como la resistencia del cable de Cu es de 0,029 Ω /km, tendremos:

$$2 \times 0,029 \text{ } \Omega/\text{km} \times 0,1 \text{ km} = 0,006 \text{ } \Omega$$

y la resistencia total de la línea:

$$R_T = 0,004 + 0,006 = 0,01 \text{ } \Omega/\text{fase}$$

la reducción total de pérdidas en las tres fases será de:

$$W = 3 \times R_T \times (I_{Q1}^2 - I_{Q2}^2)$$

$$W = 3 \times 0,01 \times (2.064^2 - 620^2)$$

$$W = 116 \text{ kW}$$

Vamos a fijar unos valores hipotéticos de precios para poder ver el tiempo de amortización de la batería.

- Energía Activa = 10 Pta/kWh
- Energía Reactiva* = 4 Pta/kvarh
- Potencia contratada = 300 Pta/kW
- Condensadores = 2.300 Pta/kvar

*) Este precio puede deducirse del valor total pagado dividido por los kvarh consumidos ya que lo que se paga es el porcentaje del consumo según el $\cos \varphi$.

• INVERSIONES

El costo total de inversión para una batería de condensadores de 1.000 kvar es de:

$$1.000 \times 2.300 = 2.300.000 \text{ Pta}$$

si sumamos a la batería [C] el equipo auxiliar [EA] más la obra civil [OC] más los trabajos de instalación [TI], tendremos un total invertido de aproximadamente 4.100.000 Pta.

• INGRESOS

La tarifa de energía reactiva fijada en 4 Pta por kvarh se multiplica por el número de horas anuales para conocer la tarifa anual desembolsada.

$$200 \times 11 = 2.200 \text{ h/año}$$

$$2.200 \times 4 = 8.800 \text{ Pta para la reactiva}$$

La tarifa anual de potencia reactiva ahorrada [Q] valdrá:

$$1.000 \times 8.800 = 8.800.000 \text{ Pta}$$

El apartado de la reducción de pérdidas [RP] se divide en dos componentes, una es el ahorro debido a las pérdidas y otra es el ahorro debido a la potencia contratada más baja.

La tarifa de 10 Pta fijada por kW anualmente será:

$$10 \times 200 \times 11 = 22.000 \text{ Pta}$$

para la activa por año.

Las pérdidas ahorradas anualmente.

$$116 \times 22.000 = 2.552.000 \text{ Pta}$$

Ahorro de contratación anual.

$$116 \times 11 \times 300 = 382.000 \text{ Pta}$$

El total de [RP] es:

$$2.552.000 + 382.000 = 2.934.800$$

• TIEMPO DE AMORTIZACION

Inversiones

$$C + EA + OC + TI = 4.100.000 \text{ Pta}$$

Ingresos

$$Q + RP = 8.800.000 + 2.934.800 \\ = 11.734.800 \text{ Pta}$$

$$T. \text{ Amort.} = \frac{4.100.000}{11.734.000} = 0,349 \text{ años}$$

$$T. \text{ Amort.} = 0,349 \times 11 = 3,84 \text{ meses}$$

Además de lo calculado, no debemos olvidar la bonificación del 2,2% en el recibo mensual medio por estar en la instalación con un $\cos \varphi$ de 0,95.

Aunque este ejemplo es ficticio por tratarse de precios totalmente hipotéticos y con un transformador trabajando al límite de su potencia, al menos nos indica uno de los caminos a seguir, para el cálculo de la rentabilidad en una instalación, de un modo totalmente fiable.

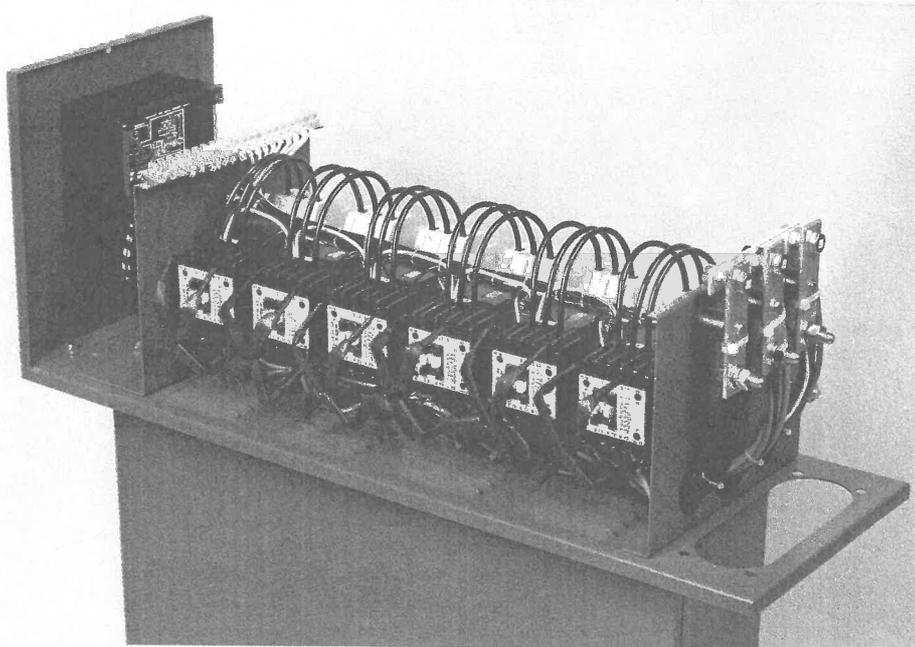


Fig. 32

Vista interior de una batería automática de condensadores tipo CLMS 613 de ABB Motores, S.A. Batería de seis pasos de 20 kvar cada uno entrando en secuencia 1:1:1. En la parte frontal está instalado el regulador varmétrico.

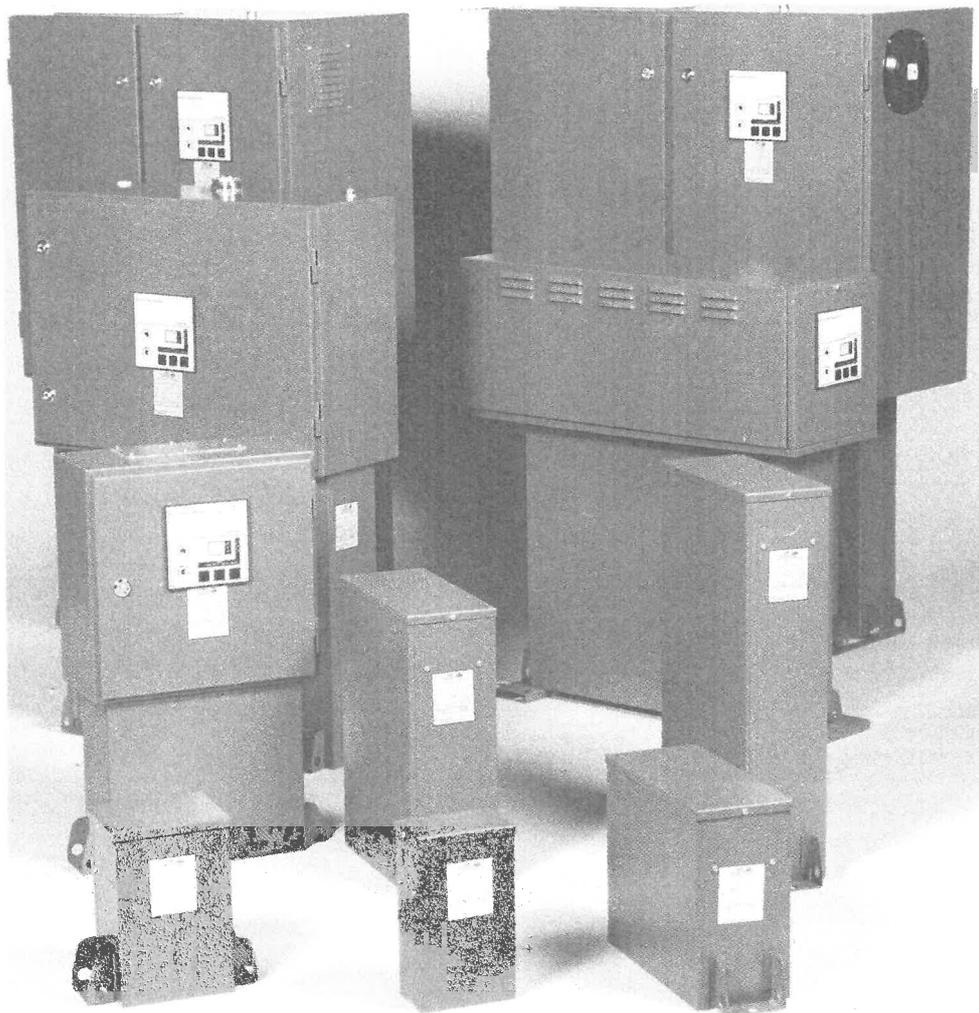


Fig. 33
Condensadores trifásicos y baterías automáticas de condensadores del tipo dieléctrico seco de bajas pérdidas fabricados por ABB Motores, S.A.

19. UNIDADES SI DE INTERES

Unidades SI básicas			Múltiplos y submúltiplos de unidades SI autorizadas		
Magnitud	Nombre	Símbolo	Nombre	Símbolo	Relación
Longitud	metro	m			
Masa	kilogramo	kg	tonelada	t	1 t = 10 ³ kg
Tiempo	segundo	s	minuto hora día	min h d	1 min = 60 s 1 h = 3,6 · 10 ³ s 1 d = 86,4 · 10 ³ s
Intensidad de corriente eléctrica	ampere	A			
Temperatura termodinámica	kelvin	K	grado celsius	...°	1°C = 1 K (T ₀ = 273,15 K)
Cantidad de sustancia	mol	mol			
Intensidad luminosa	candela	cd			

Unidades SI derivadas					
Frecuencia	hertz	Hz			
Fuerza	newton	N			
Presión, tensión	pascal	Pa	bar	bar	1 bar = 10 ⁵ Pa
Energía, trabajo, cantidad de calor	joule	J			
Energía eléctrica activa	watt segundo	Ws	kilowatt hora	kWh	1 kWh = 3,6 · 10 ⁶ Ws
Energía eléctrica aparente	voltampere segundo	VAs	kilovoltampere hora	kVAh	1 kVAh = 3,6 · 10 ⁶ VAs
Energía eléctrica reactiva	var segundo	vars	kilovar hora	kvarh	1 kvarh = 3,6 · 10 ⁶ vars
Potencia, flujo radiante	watt	W			
Potencia eléctrica activa	watt	W			
Potencia eléctrica aparente	voltampere	VA			
Potencia eléctrica reactiva	var	var			
Cantidad de electricidad	coulomb	C			
Tensión eléctrica, potencial eléctrico, fuerza electromotriz	volt	V			
Resistencia eléctrica, reactancia, impedancia	ohm	Ω			
Conductancia eléctrica, susceptancia, admitancia	siemens	S			
Capacidad eléctrica	farad	F			
Flujo magnético, flujo de inducción magnética	weber	Wb			
Inducción magnética, densidad de flujo magnético	tesla	T			
Inductancia	henry	H			
Flujo luminoso	lumen	lm			
Iluminancia	lux	lx			
Angulo plano	radián	rad	vuelta grado minuto segundo	...° ...' ...''	1 vuelta = 2 π rad 1° = π/180 rad 1' = π/10.800 rad 1'' = π/648.000 rad
Angulo sólido	estereorradián	sr			
Masa atómica	unidad de masa atómica	u			1 u = 1,6605402 · 10 ⁻²⁷ kg
Energía atómica	electronvolt	eV			1 eV = 1,60217733 · 10 ⁻¹⁹ J
Conductividad térmica	watt por metro kelvin	W/(m.K)			
Intensidad de campo eléctrico	volt por metro	V/m			
Intensidad radiante	watt por estereorradián	W/sr			
Permitividad	farad por metro	F/m			
Densidad de corriente eléctrica	ampere por metro cuadrado	A/m ²			
Conductividad eléctrica	siemens por metro	S/m			
Resistividad eléctrica	ohm metro	Ωm			

Múltiplos y submúltiplos decimales de las unidades SI

Factor	Prefijo	Símbolo
10^{18}	exa	E
10^{15}	peta	P
10^{12}	tera	T
10^9	giga	G
10^6	mega	M
10^3	kilo	k
10^2	hecto	h
10^1	deca	da
10^{-1}	deci	d
10^{-2}	centi	c
10^{-3}	mili	m
10^{-6}	micro	μ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	p
10^{-15}	femto	f
10^{-18}	atto	a

