



Selección de los parámetros técnicos de los compensadores escalonados de potencia reactiva a nivel global

Davel Borges
Vicente León

Recibido: Julio del 2005
Aprobado: Septiembre del 2005

Resumen / Abstract

En los sistemas eléctricos industriales es muy frecuente la existencia de cargas variables. La compensación del factor de potencia en la mayoría de estos casos, se realiza por medio de dispositivos compensadores estáticos que proporcionan una potencia reactiva diferente en función de las necesidades de los receptores del sistema. Tales pueden ser: de compensación continua o de compensación discreta o escalonada. Estos últimos han sido ampliamente difundidos por sus ventajas. Sin embargo, los criterios para la selección de los parámetros técnicos del dispositivo, no siempre han sido adecuados. En el trabajo se presenta un procedimiento a la hora de seleccionar dichos parámetros a nivel global en los mayormente conocidos como compensadores automáticos del factor de potencia. Paralelamente se discute un ejemplo real de aplicación al sistema eléctrico de un pequeño taller de producción.

Palabras clave: bancos de capacitores, dispositivos de compensación de reactivo, bancos controlados, compensadores del factor de potencia

In the industrial electric systems it is very frequent the existence of variables loads. The power factor compensation in most of these cases is carried out by means of static compensations devices that provide a different reactive power in function of the load demands. Such they can be: of continuous compensation or of discreet or staggered compensation. These last ones have been broadly diffused by their advantages. However, the approaches for the selection of the technical parameters they have not always been adapted. A procedure is presented when selecting these parameters at global level in the mostly well-known ones as automatic compensators of power factor. At the same time, a real example of application is discusses to the electric system of a small production shop.

Key words: capacitor banks, reactive power compensations, power factor improvement

INTRODUCCIÓN

Los dispositivos de compensación de reactivo suministran a los receptores del sistema la potencia reactiva necesaria, permitiendo la descarga de una buena parte de la corriente reactiva hasta el punto de compensación.¹

Cuando el sistema varía la demanda de reactivo, lo cual es usual, la compensación efectiva se logra

instalando un dispositivo que sea capaz de suministrar la potencia reactiva necesaria en cada instante de tiempo. Entre tales dispositivos han sido ampliamente difundidos los denominados compensadores escalonados de reactivo, los cuales están formados por varias unidades individuales de compensación (bancos de capacitores), no necesariamente de la misma potencia, que se van conmutando de acuerdo con el programa establecido por un circuito de control

denominado regulador varmétrico. El objetivo es mantener el factor de potencia constante en el punto deseado. No obstante, el valor de la potencia de las unidades, varía de forma discreta, de allí su nombre, por lo que la selección de los parámetros del dispositivo debe garantizar una eficiente regulación del factor de potencia.

DESARROLLO

A. Parámetros técnicos de los dispositivos de compensación escalonados

Los dispositivos de compensación automática a escalones poseen los siguientes parámetros técnicos :²

- Potencia de mínimo escalón (Q_{mesc}): Es el menor valor de la potencia reactiva que puede proporcionar el equipo de compensación a la tensión y frecuencia nominales.
- Potencia del equipo de compensación (Q_c): Es la potencia reactiva que proporciona el dispositivo a la tensión y frecuencia nominales cuando todos los escalones están conectados. Es decir, es la suma de las potencias reactivas de todos los capacitores del equipo.

Número de escalones (N_{esc}): Es el cociente entre la potencia del equipo de compensación y la potencia de mínimo escalón. Permite conocer la cantidad de escalones de compensación.

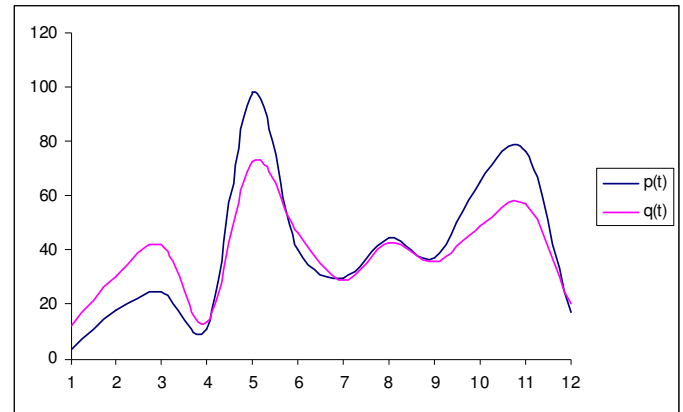
$$N_{esc} = \frac{Q_c}{Q_{mesc}}$$

Composición: Indica cómo está distribuida la potencia del equipo de compensación e informa de cómo se aplica dicha potencia de acuerdo con el programa del regulador y del valor de la potencia de mínimo escalón. Así, por ejemplo, sabiendo que la composición de una batería de compensación automática es $10 + 2 \times 15$, se deduciría que la potencia de mínimo escalón es de 10 Ckvar, la potencia del equipo es 40 Ckvar, tiene 4 escalones y 3 salidas o baterías de capacitores, una de 10 Ckvar y dos de 15 Ckvar.

Tensión del dispositivo (U_j): Es el valor de tensión que soporta el dispositivo.

B. Selección de los parámetros técnicos de los dispositivos escalonados

Sean $p(t)$, $q(t)$ las funciones aleatorias definidas por los pares ordenados correspondientes, resultados de los gráficos de carga de estas magnitudes en el punto de compensación, que a manera de ejemplo se representan en la figura 1.



Gráficos de carga de la potencia activa y reactiva.

1

La potencia reactiva de compensación para cada instante de tiempo $q_c(t)$ puede ser determinada a través de la expresión (1):

$$q_c(t) = q(t) - p(t) \cdot \tan \varphi \quad \dots(1)$$

Teniendo en cuenta lo anterior, a los efectos prácticos conviene que el factor de potencia de la instalación a nivel global³ sea mejorado a 0,96. Sin embargo, los dispositivos de compensación escalonados no pueden ofrecer un rango continuo en la variación del factor de potencia, por lo que habrá que asegurarse de que la potencia suministrada por este se encuentre en el rango desde:

q_{cmin} : Potencia reactiva del banco para compensar el reactivo para $\cos \varphi_{min} = 0,9$

$q_{cmáx}$: Potencia reactiva del banco para compensar el reactivo para $\cos \varphi_{máx} = 1$

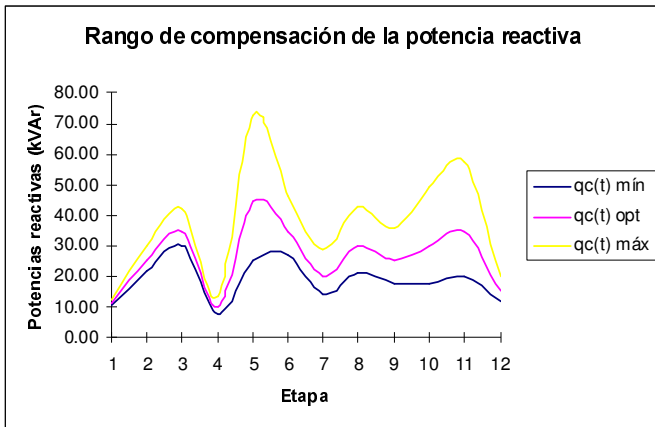
Con una tendencia a un factor de potencia óptimo:

q_{copt} : Potencia reactiva del banco para compensar el reactivo para $\cos \varphi_{opt} = 0,96$

La potencia reactiva de compensación para cada instante de tiempo $q_c(t)$ (mínima, máxima y óptima) se determina por la expresión (1), para los ángulos j correspondientes a los factores de potencia mínimo, máximo y óptimo, respectivamente.

La zona del gráfico limitada por q_{cmin} y $q_{cmáx}$ será la zona de operación económica del dispositivo de compensación escalonada, tal como se presenta a manera de ejemplo en la figura 2.

El valor de la potencia reactiva de compensación máxima coincide con el valor de la potencia reactiva antes de la compensación $q(t)$.



Zona de operación del dispositivo de compensación escalonado.

2

Una vez obtenidos los valores de $q_{cmín}$, $q_{cmáx}$ y q_{copt} se procederá a la discretización de las mediciones en un intervalo de tiempo superior al tiempo de descarga de las unidades del banco. Esto se realiza para evitar la posible reconexión de unidades en un tiempo inferior al de descarga.

El tiempo se garantiza en el dispositivo, con la incorporación de un circuito de descarga a las unidades independientes.

Dicho circuito, formado por resistencias, debe asegurar, una vez desconectadas las unidades, un voltaje residual inferior a 50V, en un tiempo prefijado, al que se denomina tiempo de descarga. Para capacitores de tensión inferior a 600 V, el tiempo de descarga será de un minuto.⁴

Debido a lo anterior, la discretización del intervalo de medición será superior a un minuto. Aumentando este intervalo se disminuye la sensibilidad de operación del dispositivo escalonado ante las variaciones de la potencia reactiva.

Para el caso analizado en la figura 3, se discretizó el intervalo de medición de forma tal que se asumieron 12 etapas o puntos de medición.

Los escalones de potencia reactiva $Q_c(k)$ en los k intervalos, se seleccionan cumpliendo las condiciones siguientes:

1. Para cada etapa del intervalo:

$$q_{cmín}(k) \leq Q_c(k) \leq q_{cmáx}(k) \quad \dots (2)$$

Es decir, el escalón de potencia reactiva para cada etapa de medición $Q_c(k)$ debe ser superior o igual al menor valor de potencia reactiva de compensación $q_{cmín}(k)$, pero inferior o igual al mayor valor de potencia reactiva de compensación $q_{cmáx}(k)$. Significa que debe encontrarse en la zona de operación económica del dispositivo.

2. El escalón de potencia reactiva para cada etapa $Q_c(k)$, como tendencia debe ser igual al valor óptimo de potencia reactiva de compensación $q_{copt}(k)$. Esto se hace para lograr poca variación del factor de potencia y máxima bonificación en la factura del servicio eléctrico.

$$Q_c(k) \rightarrow q_{copt}(k) \quad \dots(3)$$

3. El escalón de potencia reactiva de cada intervalo $Q_c(k)$ debe ser múltiplo de la potencia de escalón del dispositivo Q_{esc} . Su valor se fija según la disponibilidad de unidades pequeñas a proyectar.

$$\frac{Q_c(k)}{Q_{esc}} \in \mathbb{N}$$

4. El escalón de potencia reactiva de cada intervalo $Q_c(k)$ debe ser de un valor estándar de fabricación.

Algorítmicamente, las anteriores condiciones se pueden lograr, en la práctica, asumiendo: $Q_{copt} = q_{copt}$ y aproximando su valor al múltiplo cercano de la potencia de mínimo escalón Q_{mesc} .

De esta forma puede obtenerse el gráfico de operación del dispositivo de compensación deseado, mostrado con barras en la figura 3.

A partir de la obtención de los escalones, se seleccionan los parámetros técnicos del dispositivo de compensación escalonado, siguiendo el procedimiento siguiente:

a) Se sitúan en orden ascendente (o descendente) los valores de los escalones de potencia reactiva de cada intervalo $Q_c(k)$, extrayendo los repetidos.

Para el caso mostrado: 10, 15, 20, 25, 30, 35, 45.

b) Se determinan las diferencias sucesivas con respecto a cada valor del escalón contiguo $\Delta Q_c(k)$.

Para el caso mostrado: 15-10, 20-15, 25-20, 30-25, 35-30, 45-35

$$DQ_c(k) = 5, 5, 5, 5, 10$$

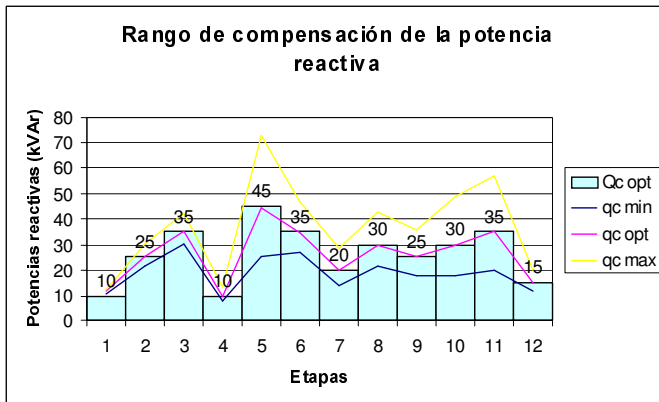


Gráfico de operación del dispositivo escalonado.

3

A partir de allí:

1. La potencia de mínimo escalón Q_{mesc} , como se planteó, se fija según la disponibilidad de unidades pequeñas a proyectar. No obstante, su valor debe satisfacer la diferencia mínima entre los escalones de potencia reactiva óptimos $\Delta Q_c(k)(mín)$.

$$Q_{mesc} = \Delta Q_c(k)(mín) \quad \dots(5)$$

Para el caso mostrado: $Q_{mesc} = 5Ckvar$

2. La potencia de compensación del dispositivo Q_c se determina como el valor del mayor escalón de potencia reactiva:

$$Q_c = Q_c(k)(máx) \quad \dots(6)$$

Para el caso mostrado: $Q_c = 45Ckvar$

3. La composición del banco que garantiza el menor número de unidades (una menor inversión) satisface la expresión:

$$[Q_{mesc}] + \left[\begin{array}{c} Q_c(k)(mín) \\ Si Q_c(k)(mín) \neq Q_{mesc} \end{array} \right] + \left[\sum_k \begin{array}{c} \Delta Q_c(k) \\ \Delta Q_c(k) \neq Q_{mesc} \\ \Delta Q_c(k) \neq \Delta Q_c(k') \end{array} \right] \dots(7)$$

Siendo el valor de Q_{ad} :

$$Q_{ad} = Q_c - [Q_{mesc}] + \left[\begin{array}{c} Q_c(k)(mín) \\ Si Q_c(k)(mín) \neq Q_{mesc} \end{array} \right] + \left[\sum_k \begin{array}{c} \Delta Q_c(k) \\ \Delta Q_c(k) \neq Q_{mesc} \\ \Delta Q_c(k) \neq \Delta Q_c(k') \end{array} \right] \dots(8)$$

Para el caso mostrado: $5 + 10 + 10 + Q_{ad} = 45$

$$Q_{ad} = 45 - 5 - 10 - 10$$

$$Q_{ad} = 20$$

La composición óptima será: $5+10+10+20$

Es decir, $5x_1+10x_2+20x_3$ (Cuatro unidades: una de 5 CkVAr, dos de 10 Ckvar y una de 20 Ckvar, con una potencia de mínimo escalón de 5 Ckvar y una potencia de compensación de 45 Ckvar.)

3. La tensión del dispositivo (U_ρ) se selecciona como valor estándar mayor o igual a la tensión de línea en el punto de ubicación del banco. Debe tenerse en cuenta que durante la instalación del dispositivo la tensión de elevará en el punto, como efecto colateral.

C. Inversiones de los dispositivos escalonados

En el caso de la instalación de dispositivos compensadores de reactivo de cualquier tipo, el costo de las inversiones capitales K , se puede determinar como:⁵

$$K = K_c + K_m \quad \dots (9)$$

donde:

K_c : Representa el costo de la inversión del dispositivo. Para dispositivos escalonados, está dado por el valor de la potencia de compensación de forma directa y por el valor de la tensión de forma inversa. Además, se incrementa con el número de unidades de compensación individual para una misma potencia de compensación.⁶

K_m : Representa el costo del montaje del dispositivo.

Sobre la base de lo anterior, el procedimiento presentado logra la compensación con un mínimo de unidades de capacitores individuales, lo que garantiza un costo mínimo de inversión del dispositivo.

CONCLUSIONES

A partir del procedimiento propuesto es posible seleccionar los parámetros técnicos de los dispositivos escalonados de compensación de la potencia reactiva, teniendo en cuenta un modelo que garantiza el mínimo de unidades de compensación.

Debido a que en los dispositivos escalonados el costo es proporcional al número de unidades, se puede

asegurar que para una potencia de compensación necesaria, a determinada tensión, el procedimiento garantiza el dispositivo de mínima inversión.

Por otra parte, considerando despreciable el gasto de explotación de los dispositivos como resultado las pérdidas de potencia activa que introduce (en el orden de 5 W/Ckvar), así como la variación en las pérdidas del sistema con relación a otro dispositivo escalonado similar, es evidente que el dispositivo seleccionado a nivel global mediante el procedimiento planteado, puede resultar óptimo desde el punto de vista técnico-económico, al extraer las mayores ventajas por la mejora del factor de potencia, generalmente decisivas frente al costo de la inversión.

Los resultados fueron presentados a través de un ejemplo real del sistema eléctrico de un taller de producción de derivados del plástico, en el cual se obtuvieron resultados satisfactorios.

REFERENCIAS

1. **León Martínez, V.:** *Ineficiencias de los sistemas eléctricos. Efectos, cuantificación y dispositivos de mejora de la eficiencia*, Ed. Universidad Politécnica de Valencia, 2001.

2. ———.: *Optimización energética de las instalaciones eléctricas industriales y domésticas*, Valencia, 1995.

3. *Resolución Ministerial 311/2001*, Ministerio de Finanzas y Precios.

4. **Beeman, D. L.:** *Industrial Power Systems Handbook*, Ed. Mc Graw Hill Book, Estados Unidos, 1955.

5. **Araki, Eduardo:** *Consideraciones fundamentales de un sistema de mejoramiento del factor de potencia*, Ed. Sakata Ingenieros SA, 1998.

6. **Merlin, Gerin:** *Mejora del factor de potencia mediante el uso de condensadores. Cuaderno técnico*, 2001.

AUTORES

Davel Borges Vasconcellos

Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, Profesor Auxiliar, Departamento de Ingeniería, Eléctrica, Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba
e-mail:davel@em.reduc.edu.cu

Vicente León Martínez

Ingeniero Técnico en Electricidad, Ingeniero Superior Industrial, Doctor Ingeniero Industrial, Catedrático Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica de Valencia, España
e-mail:vleon@die.upv.es

CENTRO DE OPERACIONES LUIS FELIPE ALMEIDA OBE CIUDAD DE LA HABANA



Nuestro Centro Territorial de Producción, siempre dispuesto a satisfacer las necesidades del cliente, le oferta un grupo de producciones y servicios, para lo que cuenta con una reconocida experiencia.

Contáctenos:

Empresa Eléctrica Ciudad de La Habana

Ave. Independencia km 6 ½, Boyeros

Ciudad de La Habana, Cuba

Teléfono:45 1357

Fax: 45 1679

email:colfa@abech.cu