

La energía reactiva y la disminución de las pérdidas en distribución de energía eléctrica

Félix Redondo Quintela. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. Universidad de Salamanca.

Resumen

Como consecuencia de la cada vez más frecuente presencia de armónicos en la red, algunos autores cuestionan la utilidad del $\cos\phi$ de los receptores para la evaluación de la influencia de éstos en la eficiencia del sistema eléctrico. Sin embargo, como se muestra en este artículo, la utilización del factor de potencia para la evaluación del recargo por pérdidas en el sistema eléctrico, tal como se aplica en nuestro país, es de dudosa eficacia incluso en un régimen de funcionamiento perfectamente sinusoidal, ya que un alto factor de potencia de una carga trifásica no garantiza menor intensidad en las fases ni, por tanto, menores pérdidas de energía.

Abstract

As a result of the increasing and more frequent presence of harmonics in the power network, some authors are questioning the usefulness of $\cos\phi$ in order to evaluate the effects of certain loads on the efficiency of the electric system. Notwithstanding that, this paper shows that it is of even less efficiency to use the power factor itself to obtain the tariff surcharge related to electrical losses, at least as it is applied in Spain, and that this also happens under a regime of perfect sinusoidal operation. In short, a higher power factor of a three-phase load does not necessarily guarantee less phase currents, nor minor energy losses.

Introducción

Numerosos trabajos actuales estudian las diversas incidencias de las deformaciones de la onda de tensión del sistema eléctrico originadas por la creciente utilización de receptores no lineales[1][2]. Algunas conclusiones sugieren la poca eficacia del $\cos\phi$ de los receptores como medida de la

influencia de éstos en el rendimiento de la red cuando la onda de tensión se aparta de la senoide[1]. Sin embargo, la dudosa utilidad del $\cos\phi$ equivalente es anterior a todas estas consideraciones: no necesita la hipótesis de régimen no sinusoidal.

Como es sabido, de dos receptores monofásicos con la misma tensión y de la misma potencia activa, absorbe de la red una intensidad mayor el de menor factor de potencia [3]. Como la potencia que se pierde en un conductor de resistencia R es RI^2 , los receptores monofásicos de bajo factor de potencia aumentan la potencia perdida en el sistema eléctrico debido a que necesitan que la intensidad por ellos sea mayor. Nuestras tarifas eléctricas aplican por ello un recargo a los consumidores cuyo factor de potencia equivalente en el período de facturación sea menor que 0.90. La forma de hallar el $\cos\phi$ es aplicar la fórmula

$$\cos\phi = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}} \quad (1)$$

donde W_a es la energía activa, indicación del contador de energía activa, expresada en kWh, (quilovatios hora) y W_r la energía reactiva, indicación del contador de energía reactiva, expresada en kVArh (kilovoltios amperios reativos hora). El resultado ha de redondearse a dos cifras decimales. Con este dato, obtenido para cada período de facturación, el precio del kWh y el llamado término de potencia¹ se incrementan en un porcentaje que es fijado por la fórmula

$$K_r(\%) = \frac{17}{\cos^2\phi} - 21 \quad (2)$$

Para $\cos\phi=0.90$, $K_r(\%)=0$, es decir, no hay recargo. Para $\cos\phi$ mayor que 0.90 $K_r(\%)$ es negativo, o sea, existe una bonificación de hasta el 4%, que es el valor de $K_r(\%)$ para $\cos\phi=1$. Si el factor de potencia es 0.50 el recargo es el 47%, el máximo aplicable. Si en tres o más mediciones resultara un factor de potencia inferior a 0.55, se podrá obligar al usuario a su mejora [4].

Incitando a los consumidores por medio del recargo a aumentar su factor de potencia o, lo que es equivalente según la fórmula (1), a disminuir el consumo de la energía reactiva, se pretende disminuir la intensidad y, por tanto, las pérdidas en el sistema eléctrico. Tanto en los receptores monofásicos como en los trifásicos, disminución del consumo de energía reactiva equivale a aumento del factor de potencia. Ambos efectos se consiguen colocando condensadores en paralelo con los receptores inductivos [3]. Pero sólo en los receptores monofásicos disminución de energía reactiva consumida implica siempre disminución de la intensidad y, por tanto de pérdidas en el sistema

¹ El término de potencia es una cantidad que el abonado paga por cada kW de potencia contratado. Esta cantidad también se ve afectada por el recargo o descuento debido al factor de potencia.

eléctrico. Si el receptor es trifásico, no siempre, como veremos, la mejora del factor de potencia de la carga o, lo que es equivalente, la disminución de la energía reactiva consumida, rebaja la intensidad absorbida por el receptor y, por tanto, la potencia que se pierde en el sistema eléctrico. Esto es así porque los contadores trifásicos miden la suma de las energías reactivas que absorben los receptores conectados después del contador, independientemente de la forma y de las fases a que estén conectados [3]. Eso puede significar por ejemplo que, si entre una fase y el neutro está conectado un receptor con bajo factor de potencia inductivo, la intensidad por esa fase será alta. Si el receptor de otra fase tiene también un bajo factor de potencia pero capacitivo, la intensidad por esa fase también será alta, las pérdidas por tanto en las dos fases también lo serán y, sin embargo, la energía reactiva consumida puede ser cero si se compensan la inductiva y la capacitiva. Es decir, no habrá recargo a pesar de que las pérdidas pueden ser muy altas. Justo se consigue lo contrario de lo que se persigue: determinadas conexiones de condensadores, que disminuyen la energía reactiva total consumida y, por tanto, el factor de potencia y el consiguiente recargo, aumentan la potencia perdida en el sistema eléctrico en vez de disminuirla.

Se exponen a continuación algunos ejemplos de compensación de la energía reactiva utilizados en las instalaciones reales que aclaran lo dicho. Como es habitual, en lo que sigue designaremos los fasores con **negrita**.

Pérdidas sin compensación de la energía reactiva

Suponemos que los dos receptores conectados a la línea de 220 V entre fases de la figura 1 son inductivos. El valor eficaz de la intensidad que absorbe el receptor trifásico por cada fase es

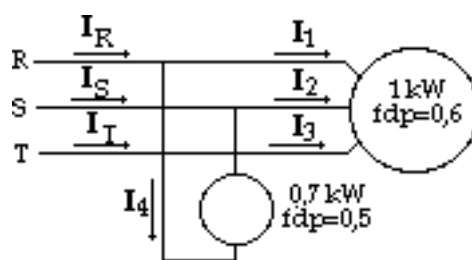


Fig. 1.

$$I_1 = \frac{P_t}{\sqrt{3}U \cos \varphi_1} = \frac{1000}{\sqrt{3} \times 220 \times 0.6} = 4.374 \text{ A}$$

Con independencia de la forma en que esté conectado el motor, en estrella o en triángulo, la intensidad por cada fase está retrasada el ángulo $\varphi_1 = \arccos 0.6 = 53.13^\circ$ respecto a la tensión simple correspondiente a esa fase. Por tanto, tomando como origen de fases V_R , se tiene:

$$I_1 = 4.374 / \underline{-53.13^\circ}$$

$$I_2 = 4.374 / \underline{-120^\circ - 53.13^\circ} = 4.374 / \underline{-173.13^\circ}$$

$$I_3 = 4.374 / \underline{-240^\circ - 53.13^\circ} = 4.374 / \underline{-293.13^\circ}$$

$$I_4 = \frac{P_m}{U \cos \varphi_2} = \frac{700}{220 \times 0.5} = 6.364 \text{ A}$$

I_4 está retrasada respecto a la tensión $U_{RS} = U / \underline{30^\circ}$ el ángulo $\varphi_2 = \arccos 0.5 = 60^\circ$. Por tanto,

$$I_4 = 6.364 / \underline{30^\circ - 60^\circ} = 6.364 / \underline{-30^\circ}$$

$$I_R = I_1 + I_4 = 4.374 / \underline{-53.13^\circ} + 6.364 / \underline{-30^\circ} = 10.528 / \underline{-39.393^\circ}$$

$$I_S = I_2 - I_4 = 4.374 / \underline{-173.13^\circ} - 6.364 / \underline{-30^\circ} = 10.206 / \underline{164.9^\circ}$$

$$I_T = I_3 = 4.374 / \underline{-293.13^\circ}$$

O sea, los valores eficaces de las intensidades por cada fase son

$$I_R = 10.528 \text{ A}; \quad I_S = 10.206 \text{ A}; \quad I_T = 4.374 \text{ A}.$$

Si es R la resistencia de cada fase de la línea, la potencia perdida en ella es

$$P_{p1} = R(I_{R1}^2 + I_{R1}^2 + I_{R1}^2) = R(10.528^2 + 10.206^2 + 4.374^2) = \underline{\underline{234.133R}}.$$

Hallaremos ahora el factor de potencia de la carga. La potencia activa total es

$$P = P_1 + P_2 = 1.7 \text{ kW}$$

La potencia reactiva

$$Q = 1 \times \text{tg arccos } 0.6 + 0.7 \times \text{tg arccos } 0.5 = 1.333 + 1.212 = 2.545 \text{ kVAr}$$

El factor de potencia en retraso es

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{1.7}{\sqrt{1.7^2 + 2.545^2}} = 0.56$$

Y el recargo será

$$K_r(\%) = \frac{17}{\cos^2 \varphi} - 21 = \frac{17}{0.56^2} - 21 = 33.21\%$$

Compensación por un solo condensador

Con objeto de anular el consumo de energía reactiva y, por tanto, obtener una bonificación del 4%, colocamos un condensador que absorba una potencia de -2.545 kVAr, conectado entre cualesquiera fases; en nuestro caso entre R y T .

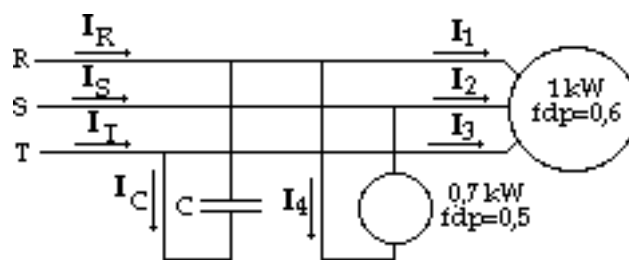


Fig. 2.

Entonces, el consumo total de energía reactiva es nulo, y un contador de energía reactiva colocado antes del condensador indicaría siempre cero y el recargo de energía reactiva no sólo no existiría, sino que sería negativo; es decir, habría una bonificación del 4%. Con el condensador conectado como en la figura 2 se tiene:

$$I_C = \frac{2545}{220} = 10.205 \text{ A}$$

Esta intensidad está adelantada 90° respecto a $U_{TR} = 220/\underline{150^\circ}$; por tanto

$$I_C = 10.205/\underline{240^\circ} = 10.205/\underline{-120^\circ}$$

$$I_R = I_1 + I_4 - I_C = 13.413/\underline{9.253^\circ}$$

$$I_S = I_2 - I_4 = 10.206/\underline{164.9^\circ}$$

$$I_T = I_3 + I_C = 5.886/\underline{-125.1^\circ}$$

Y los valores eficaces de las intensidades de línea resultan ser ahora

$$I_{R2} = 13.413 \text{ A}; \quad I_{S2} = 10.206 \text{ A}; \quad I_{T2} = 5.886 \text{ A}.$$

La potencia perdida cuando está conectado el condensador es

$$P_{p2} = R(I_{R2}^2 + I_{S2}^2 + I_{T2}^2) = R(13.413^2 + 10.206^2 + 5.886^2) = \underline{\underline{318.716R}}$$

mayor que sin la compensación.

$$\frac{P_{p2}}{P_{p1}} = \frac{318.716}{234.133} = 1.361$$

O sea, la potencia perdida es un 36,1% mayor después de esta forma de corrección del factor de potencia que sin corrección alguna. A pesar de ello, con esta corrección el abonado será recompensado con una bonificación del 4%, cuando realmente provoca más pérdidas que sin la compensación; y, si no corrigiera, sería penalizado con un recargo del 33,21% cuando realmente provoca muchas menos pérdidas.

Corrección del factor de potencia de cada receptor

Otra solución que puede adoptarse para compensar la energía reactiva es la corrección del factor de potencia de cada receptor monofásico,

incorporándole permanentemente un condensador en paralelo con él que se conecte y desconecte con el receptor. El factor de potencia de receptores trifásicos equilibrados puede corregirse con una batería trifásica equilibrada de condensadores como en la figura 3. Esta forma equivale a corregir el factor de potencia de cada receptor monofásico por separado. Para corregir allí el factor de potencia del receptor trifásico hasta 1, la batería de condensadores debe tener una potencia de -1,333 kVAr, y el condensador en paralelo con la carga monofásica -1,212 kVAr para elevar a la unidad el factor de potencia del receptor monofásico. Entonces

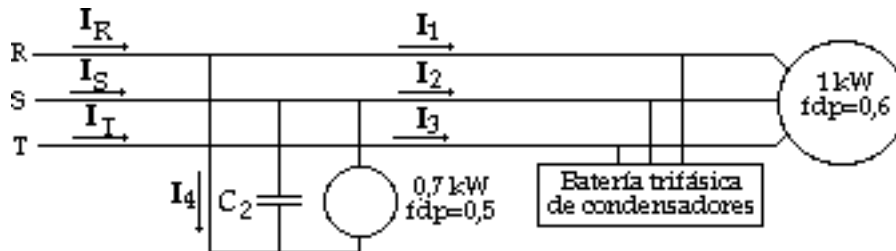


Fig. 3.- Esquema para la corrección del factor de potencia.

$$I_1 = \frac{P_t}{\sqrt{3}U \cos \phi_1} = \frac{1000}{\sqrt{3} \times 220 \times 1} = 2.624 \text{ A}$$

Tomando como origen de fases V_R ,

$$I_1 = 2.624 / 0^\circ$$

$$I_2 = 2.624 / -120^\circ$$

$$I_3 = 2.624 / -240^\circ$$

$$I_4 = \frac{P_m}{U \cos \phi_2} = \frac{700}{220 \times 1} = 3.182 \text{ A}$$

I_4 está en fase con U_{RS} ; por tanto,

$$I_4 = 3.182 / 30^\circ$$

$$I_R = I_1 + I_4 = 2.624 / 0^\circ + 3.182 / 30^\circ = 5.61 / 16.475^\circ$$

$$I_S = I_2 - I_4 = 2.624 / -120^\circ - 3.182 / 30^\circ = 5.61 / -136.475^\circ$$

$$I_T = I_3 = 2.624 / -240^\circ$$

O sea,

$$I_R = 5.61 \text{ A}; \quad I_S = 5.61 \text{ A}; \quad I_T = 2.624 \text{ A}.$$

La potencia perdida ahora es

$$P_3 = R(5.61^2 + 5.61^2 + 2.624^2) = \underline{\underline{69.83R}}$$

Esta es la manera de disminuir al mínimo las pérdidas debidas al bajo factor de potencia o al consumo de energía reactiva. La bonificación es del 4%.

Compensación con una batería trifásica equilibrada de condensadores

En la figura 4 se muestra la conexión de una batería trifásica equilibrada de condensadores de -2545 kVAr para la compensación, procedimiento habitualmente utilizado en las instalaciones actuales, al inicio de las cuales suele conectarse una batería trifásica automática de condensadores que, dependiendo de la carga, conecta el número de condensadores necesario para mantener el factor de potencia en torno a la unidad. Comenzaremos hallando la intensidad por cada fase de la batería de condensadores.

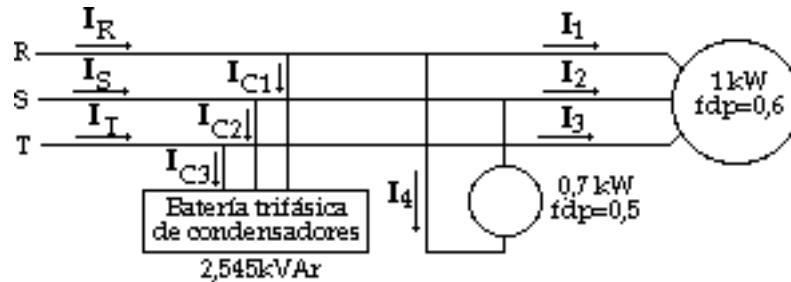


Fig. 4. Corrección del factor de potencia con batería equilibrada de condensadores.

$$Q_C = \sqrt{3}UI_C; \quad I_C = \frac{Q_C}{\sqrt{3}U} = \frac{2545}{\sqrt{3} \times 220} = 6.679 \text{ A}$$

Cada intensidad de fase de la batería de condensadores está adelantada 90° respecto a la tensión simple correspondiente a esa fase:

$$I_{C1} = 6.679 / \underline{90^\circ}$$

$$I_{C2} = 6.679 / \underline{-30^\circ}$$

$$I_{C3} = 6.679 / \underline{-150^\circ}$$

$$I_R = I_1 + I_4 + I_{C1} = 8.136 / \underline{-0.015^\circ}$$

$$I_S = I_2 - I_4 + I_{C2} = 4.126 / \underline{-170.505^\circ}$$

$$I_T = I_3 + I_{C3} = 4.123 / \underline{170.466^\circ}$$

O sea, los valores eficaces de las intensidades de fase son ahora

$$I_R = 8.136 \text{ A}; \quad I_S = 4.126 \text{ A}; \quad I_T = 4.123 \text{ A}$$

Y las pérdidas en la línea

$$P_4 = R(8.136^2 + 4.126^2 + 4.123^2) = \underline{\underline{100.218R}}$$

menores que sin compensación y con la compensación con un solo condensador, pero mayores que en el caso óptimo de corrección individual de cada receptor. Como el factor de potencia es también ahora la unidad, se produciría una bonificación del 4%.

Compensación de carga equilibrada con un solo condensador

Otro caso de interés es el que se presenta en la figura 5. Es un receptor trifásico equilibrado cuyas intensidades de fase, halladas anteriormente, valen:

$$I_1 = 4.374 / -53.13^\circ$$

$$I_2 = 4.374 / -173.13^\circ$$

$$I_3 = 4.374 / -293.13^\circ$$

Por tanto las pérdidas que origina son

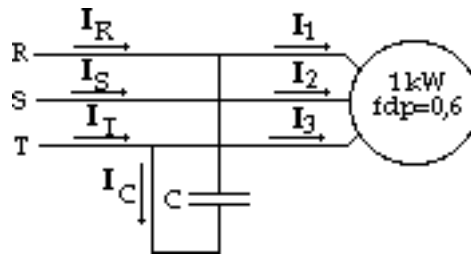


Fig. 5.

$$P_5 = 3 \times 4.374^2 R = \underline{\underline{57.40R}}$$

El recargo sin compensación de la energía reactiva es

$$K_r(\%) = \frac{17}{\cos^2 \varphi} - 21 = \frac{17}{0.6^2} - 21 = 26.22\%$$

Si se conecta entre dos fases el condensador C de -1.333 kVAr, se compensa totalmente la energía reactiva, por lo que, en lugar de recargo, existe la bonificación del 4%. Las intensidades son ahora

$$I_C = \frac{1333}{220} = 6.06 \text{ A}$$

Esta intensidad está adelantada 90° respecto a $U_{TR} = U / \underline{150^\circ}$, es decir,

$$I_C = 6.06 / \underline{240^\circ}$$

Las intensidades de fase son ahora

$$I_R = I_1 - I_C = 5.92 / \underline{17.19^\circ}$$

$$I_S = I_2 = 4.374 / -173.13^\circ$$

$$I_T = I_3 + I_C = 1.795 / -136.94^\circ$$

La potencia perdida es

$$P_6 = (5.92^2 + 4.374^2 + 1.795^2) R = \underline{\underline{57.40R}}$$

La misma que sin corregir. Sin embargo ahora, aunque no se produce ahorro alguno, se bonifica al abonado con el 4%.

Conclusiones

Después de lo expuesto y, sobre todo, de los ejemplos analizados, y a pesar de que los resultados cuantitativos son diferentes para cada caso específico, es evidente que la compensación de la energía reactiva de receptores trifásicos por medio de condensadores arbitrariamente conectados, práctica no infrecuente, no sólo no asegura la disminución de la intensidad de las fases y, por tanto, de las pérdidas en el sistema eléctrico, sino que puede aumentarlas.

La práctica habitual de corregir por medio de baterías automáticas de condensadores trifásicos equilibrados no garantiza tampoco, como acabamos de ver, la suficiente eficacia en la disminución de las pérdidas, a no ser que se asegure un alto equilibrio de la carga.

Una forma de compensación de energía reactiva que garantiza en todos los casos la disminución al mínimo de las pérdidas en el sistema eléctrico, es la corrección del factor de potencia de cada receptor monofásico o cada receptor trifásico equilibrado.

Bien es verdad que, con independencia de la eficacia o ineficacia en la disminución de las pérdidas en el sistema eléctrico, la compensación de la energía reactiva por cualquiera de los procedimientos anteriores favorece al consumidor español, que elimina el recargo y puede obtener la bonificación de hasta el 4%.

Es, por tanto, el sistema tarifario español de penalización el que no responde a los objetivos perseguidos de disminución de las pérdidas en la distribución de energía eléctrica, ya que un consumo menor de energía reactiva no lleva necesariamente aparejadas menores pérdidas en el sistema eléctrico.

Bibliografía

- [1] Eguíluz, Mañana, Benito y Lavandero. *El FP_s , un factor de potencia que relaciona las pérdidas en la línea en circuitos trifásicos distorsionados*. Actas de las 4as. Jornadas Luso-Espanholas de Engenharia Electrotécnica. Porto 1995.
- [2] León Martínez, Giner García. *Método integral para la mejora de la eficiencia en las instalaciones eléctricas*. 5as. Jornadas Hispano-Lusas de Ingeniería Eléctrica. Salamanca 1997.
- [3] Redondo Quintela F. *Redes con Excitación Sinusoidal*. Béjar, 1997.
- [4] Ministerio de Industria y Energía. *Orden Ministerial de 12 de enero de 1995*.