

Uso de la energía reactiva para evaluar las pérdidas en el sistema eléctrico

F. R. QUINTELA, R. C. REDONDO, J. M. G. ARÉVALO, N. R. MELCHOR Y M. M. REDONDO

La utilización del factor de potencia o energía reactiva como única forma de medir las pérdidas de energía achacables a los receptores no es un método adecuado

Introducción

El suministro de energía en forma eléctrica produce pérdidas de energía en el sistema eléctrico. Fijada la instalación, a cada potencia que se suministra corresponde un mínimo de potencia que se pierde. Aquí 'mínimo' significa que es inevitable que esa cantidad de potencia se pierda, que no se puede disminuir si no se modifica la instalación que la suministra. Pero los receptores pueden incrementar por encima de ese mínimo la potencia que se pierde. Dicho de otro modo, dos receptores que absorban de un mismo punto de una red la misma potencia, en general provocan pérdidas distintas. Este incremento sobre el mínimo es exclusivamente achacable al receptor. Para medirlo, las compañías distribuidoras de energía eléctrica miden la energía reactiva que absorben los receptores. El resultado de esta medida se utiliza en la facturación de la energía de dos formas: una, incrementando el precio del kilovatio hora consumido y del término de potencia¹; y otra, facturando directamente la energía reactiva absorbida a partir de una determinada cantidad². Se asume que, de dos receptores que absorben la misma energía activa, provoca mayores pérdidas el que absorbe más energía reactiva. Por tanto, para disminuir el importe de su fac-

tura, el consumidor sólo ha de preocuparse de disminuir la energía reactiva que absorben sus receptores, lo que se llama compensar la energía reactiva. Esta medida siempre beneficia al consumidor. Pero, como veremos, la compensación de la energía reactiva o, lo que es equivalente, el aumento del factor de potencia, no siempre disminuye la cantidad de energía que se pierde en el sistema eléctrico, sino que, en algunos casos, la aumenta. Entonces se consigue justo lo contrario de lo que se pretende, pues se bonifica a los consumidores que provocan mayores pérdidas.

La mínima potencia que se pierde en una línea monofásica

Se llama sistema monofásico al conjunto de uno o más alternadores en paralelo, sus receptores y la línea de dos conductores que los une. En la *figura 1* se representa un sistema monofásico. El valor medio, P , de la potencia que absorbe un receptor monofásico es

$$P = VI \cos \varphi \quad (1)$$

y se llama potencia activa³. V es el valor eficaz de la tensión e I el valor eficaz de la intensidad del receptor. φ es la diferencia de fase entre la tensión y la intensidad. El valor de esta diferencia de fase lo determina el receptor. Si es un recep-

tor pasivo e inductivo, φ está entre cero y noventa grados. $\cos \varphi$ es el factor de potencia del receptor.

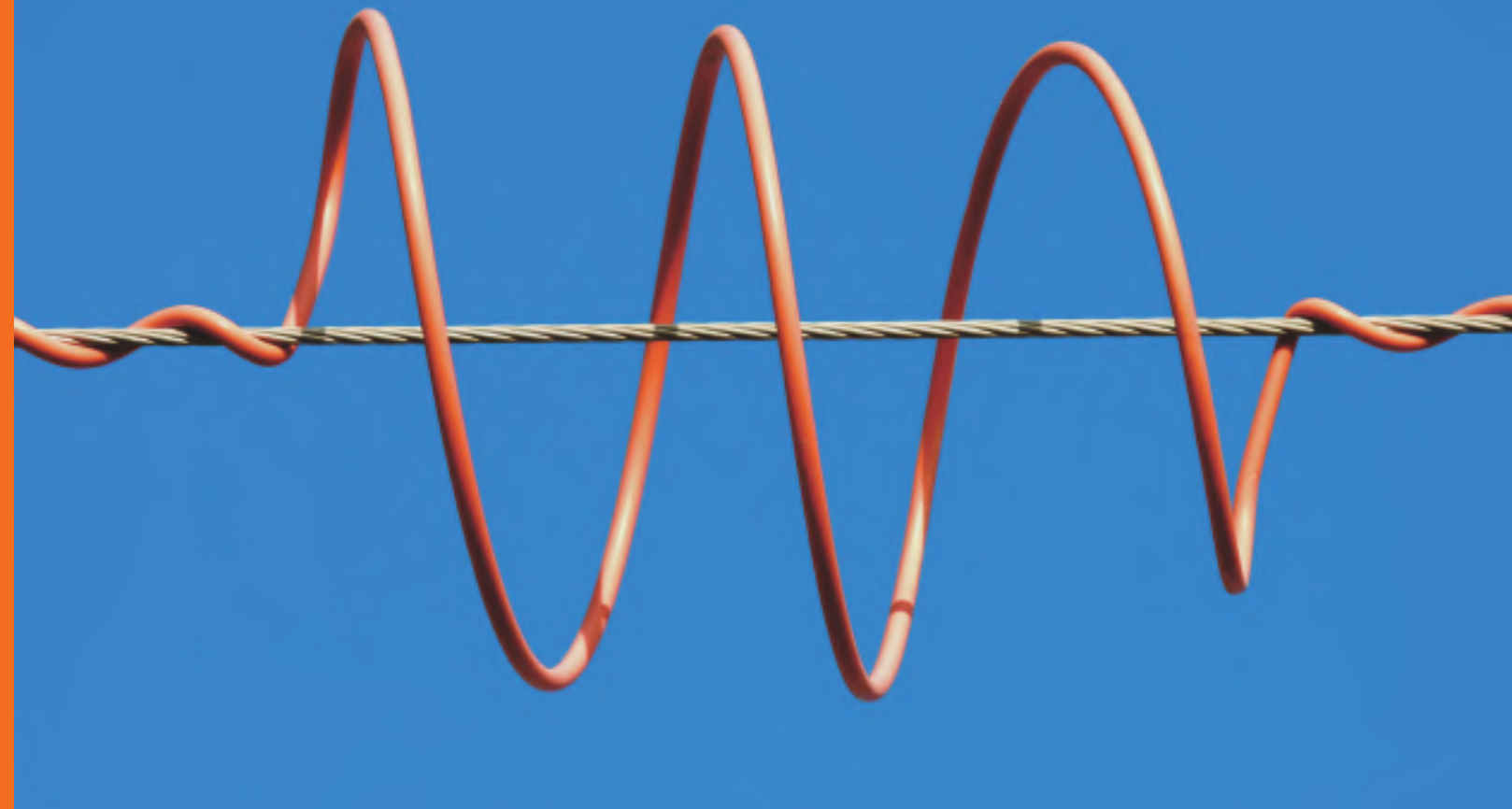
Si la resistencia de cada hilo de la línea monofásica que alimenta el receptor es R , la potencia que se pierde en la línea al suministrar al receptor la potencia P es

$$P_p = 2RI^2 = 2R \frac{P^2}{V^2 \cos^2 \varphi} \quad (2)$$

Como se ve, el receptor interviene en esa fórmula sólo por medio de su factor de potencia. Resulta que la potencia que se pierde es inversamente proporcional al cuadrado del factor de potencia del receptor. El menor valor de la potencia perdida corresponde al mayor valor posible de $\cos \varphi$, que es uno. Por tanto, la menor potencia que se pierde en una línea monofásica para llevar una potencia P hasta el receptor es

$$P_{p1} = 2R \frac{P^2}{V^2} \quad (3)$$

Ese valor no puede disminuirse a no ser que se modifique la instalación, es decir, a no ser que se disminuya la resistencia R o se aumente la tensión V de la línea. Por eso, para entendernos, diremos aquí que esa potencia perdida es la achacable a la instalación. Pero toda la que se pierda por encima de esa can-



tividad es por causa del receptor, concretamente por causa de su factor de potencia. Ese incremento de la potencia perdida puede llegar a ser muy alto. En concreto, para un factor de potencia de 0,7, la potencia que se pierde en la línea es ya el doble de la mínima. Para un factor de potencia de 0,57 la potencia que se pierde es el triple de la mínima, y si el factor de potencia es 0,5, es el cuádruple. Como se ve en la gráfica de la *figura 2*, para valores del factor de potencia menores que 0,5 la potencia que se pierde se incrementa a mayor tasa. Por ejemplo, para un factor de potencia de 0,40 la potencia que se pierde es más de seis

veces la mínima, para 0,30 es once veces y para 0,25 dieciséis veces la mínima.

La fórmula (2) y su gráfica de la *figura 2* muestran pues que, en el suministro monofásico de energía, aumento del factor de potencia del receptor equivale a disminución de la potencia que se pierde en la línea.

El número complejo

$$\bar{S} = P + jQ = S/\varphi \quad (4)$$

es la potencia compleja que absorbe el receptor. Su parte real es la potencia activa, su parte imaginaria la potencia reactiva, su módulo la potencia aparente y su argumento es el mismo ángulo φ

anterior, es decir, la diferencia de fase entre la tensión y la intensidad del receptor. Por eso, se tiene:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (5)$$

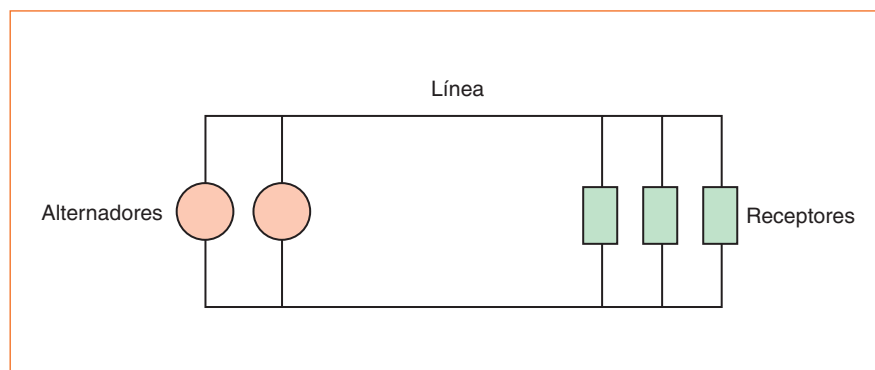
Se ve que, si $Q = 0$, $\cos\varphi = 1$. Es decir, si la potencia reactiva absorbida por el receptor es cero, la potencia que se pierde en la línea para alimentarlo es la mínima. En eso se basa la corrección del factor de potencia de los receptores inductivos: por medio de condensadores en paralelo se anula la potencia reactiva que se absorbe, con lo que se lleva al mínimo la potencia que se pierde en la línea³.

En resumen, en una línea monofásica son equivalentes las siguientes expresiones: ‘aumento del factor de potencia del receptor’, ‘disminución de la energía reactiva que absorbe el receptor’ y ‘disminución de la potencia que se pierde en la línea achacable al receptor’.

Factor de potencia para la facturación de energía eléctrica

Para las compañías distribuidoras de energía eléctrica la instalación de cada consumidor es considerada un receptor. La potencia compleja que absorbe ese receptor no es constante, sino que

Figura 1. El conjunto de uno o más alternadores en paralelo, sus receptores y la línea de dos conductores que los une se llama sistema monofásico.



RESUMEN

La medida de la energía reactiva que absorben los receptores eléctricos es un procedimiento eficaz para medir la energía que, por causa de los receptores, se pierde en los sistemas monofásicos; también para medir la que se pierde en los sistemas trifásicos si los receptores están equilibrados; pero no lo es si los receptores trifásicos están desequilibrados. Por eso, la compensación de la energía reactiva, es decir, el aumento del factor de potencia de los receptores, sólo asegura menores pérdidas si el suministro es monofásico. En general, menor energía reactiva absorbida por un receptor trifásico no equivale a menor energía perdida en el sistema eléctrico.

depende de los receptores eléctricos que el consumidor tenga conectados en cada momento. Por tanto, la energía compleja que el consumidor absorbe en el período de facturación t es

$$\bar{W} = \int_0^t \bar{S} dt = \int_0^t P dt + j \int_0^t W dt = W_a + jW_r = W/\varphi \quad (6)$$

W_a es la energía activa, que es la que mide el contador de energía activa, y W_r la energía reactiva, la que mide el contador de energía reactiva. $\cos \varphi$, que ahora es el coseno del argumento de la energía compleja, es el factor de potencia que se utiliza en la facturación de la energía activa que el consumidor ha absorbido en el período de facturación. Se obtiene de (6) que $\cos \varphi$ vale

$$\cos \varphi = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}} \quad (7)$$

y se obtiene sólo con las indicaciones de los dos contadores, el de energía activa y el de energía reactiva. Este valor es el que se sustituye en la fórmula

$$K_r (\%) = \frac{17}{\cos^2 \varphi} - 21 \quad (8)$$

que da el recargo en el precio del kilovatio hora y en el término de potencia¹. Para $\cos \varphi = 0,5$ ese recargo resulta del 47%, y para $\cos \varphi = 1$ se obtiene bonificación del 4%. Se ve que si el consumo de energía reactiva es nulo, el factor de potencia es uno y se obtiene bonificación. Es decir, la bonificación máxima se obtiene si la potencia perdida en la línea monofásica es la mínima. Si la energía reactiva absorbida no es nula significa que no lo es la potencia reactiva de los receptores y la potencia perdida es, por tanto, superior a la mínima, el factor de potencia es menor que uno, y disminuye la bonificación y aumenta el recargo. Por tanto, en las líneas monofásicas la medida de la energía reactiva absorbida por cada consumidor es un buen método para evaluar la energía perdida por encima del mínimo. El recargo se justifica porque ese incremento de la energía que se pierde lo provoca el receptor.

Si el factor de potencia de facturación es menor que 0,55 en 3 mediciones seguidas, que, según la fórmula (7), corresponde a un consumo de energía reactiva

1,5 veces la activa, las normas legales permiten a las empresas suministradoras de energía eléctrica solicitar de las administraciones públicas medidas para obligar a los consumidores a corregirlo^{1,2}.

El factor de potencia de un receptor trifásico

La potencia activa que absorbe cualquier receptor trifásico, equilibrado o no, es³

$$P = V_R I_R \cos \varphi_R + V_S I_S \cos \varphi_S + V_T I_T \cos \varphi_T \quad (9)$$

La potencia reactiva es

$$Q = V_R I_R \sin \varphi_R + V_S I_S \sin \varphi_S + V_T I_T \sin \varphi_T \quad (10)$$

Y la compleja

$$\bar{S} = P + jQ = S/\varphi \quad (11)$$

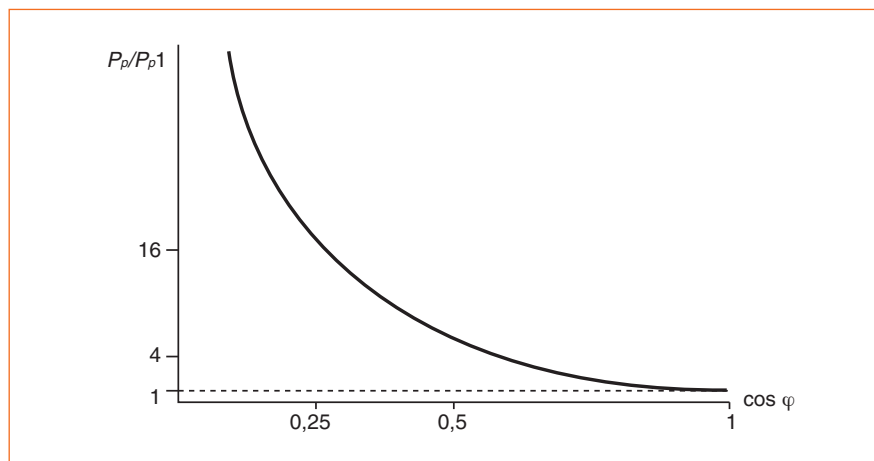
V_R , V_S y V_T son los valores eficaces de las tensiones simples, I_R , I_S e I_T los valores eficaces de las intensidades de las fases, φ_R , φ_S y φ_T son las diferencias de fases entre cada tensión simple y la intensidad de la fase correspondiente. El módulo S de la potencia compleja es la potencia aparente del receptor trifásico y φ designa ahora el argumento de la potencia compleja. Resulta que

$$P = S \cos \varphi \\ Q = S \sin \varphi$$

$\cos \varphi$ es el factor de potencia del receptor trifásico. Nótese que, en general, el ángulo φ no es ahora diferencia de fase entre una tensión y una intensidad. Sólo en el caso de que las tensiones y las intensidades estén equilibradas $\varphi_R = \varphi_S = \varphi_T = \varphi$ y φ coincide con la diferencia de fase entre cada tensión simple y la intensidad de la fase correspondiente.

Como en distribución monofásica, la energía compleja que absorbe cada consumidor en el período de facturación t es la dada por (6) si \bar{S} designa la potencia compleja del receptor trifásico. W_a y W_r serían las energías activa y reactiva absorbidas por el receptor trifásico en el período de facturación, que son las cantidades indicadas por el contador de energía activa y por el contador de energía reactiva respectivamente. También el coseno del argumento de la energía compleja es ahora el factor de potencia que se utiliza en la facturación. Los contadores trifásicos de energía activa miden W_a y los de reactiva W_r , de forma que dicho factor de potencia se halla también con (7) y el recargo se calcula con (8) o, en algunos contratos, simplemente se pone un precio a cada unidad de energía reactiva consumida², a cada

Figura 2. Representación gráfica de la potencia que se pierde en una línea monofásica o trifásica equilibrada que suministra una potencia P , en función del factor de potencia del receptor. Se toma como unidad el menor valor posible de esa potencia.



Ejemplo 1

En la *figura 3* se representan dos receptores trifásicos que se conectan a una línea cuya tensión entre fases es $U = 400 \text{ V}$, que da V ; 230 V entre fase y neutro. En a) se representa un receptor equilibrado de $P = 1 \text{ kW}$ y factor de potencia $\cos \varphi_1 = 0,8$. En b) un receptor que absorbe la misma potencia activa que el anterior y no absorbe potencia reactiva, por lo que su factor de potencia es uno: $\cos \varphi_2 = 1$. Por tanto, si sólo se conecta a la red el receptor a), el precio de cada kWh que absorbe y el término de potencia serán aumentados el porcentaje

$$K_r = (\%)_a = \frac{17}{0,8^2} - 21 = 5,56\%$$

Por el contrario, si sólo se conecta el b), el consumidor recibiría la bonificación del 4%:

$$K_r = (\%)_a = \frac{17}{1^2} - 21 = -4\%$$

Y, sin embargo, como veremos, el b) origina mayor pérdida de potencia en la línea que el a). En efecto, como, debido al equilibrio, la intensidad por el neutro es cero, la potencia que se pierde si está conectado sólo el a) es

$$P_{pa} = 3RI^2 = 3R \left(\frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi_1} \right)^2 = 3R \left(\frac{1000}{\sqrt{3} \times 400 \times 0,8} \right)^2 = 9,77R$$

La que se pierde en las fases si está conectado sólo el b) es

$$R \left(I_R^2 + I_S^2 + I_T^2 \right) = R \left(\left(\frac{800}{V} \right)^2 + \left(\frac{100}{V} \right)^2 + \left(\frac{100}{V} \right)^2 \right) = 12,31R$$

Además se pierde potencia en el conductor neutro: la intensidad por el neutro es

$$\bar{I}_N = \frac{800}{V} / 0^\circ + \frac{100}{V} / -120^\circ + \frac{100}{V} / -240^\circ = 3 \text{ A}$$

La potencia que se pierde en el neutro es

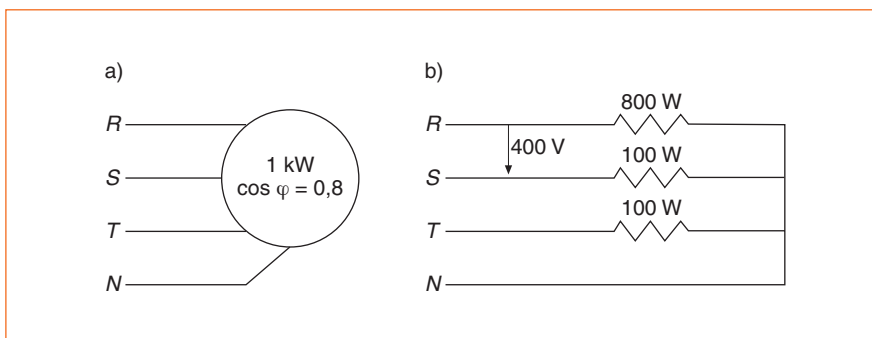
$$RI_N^2 = 3^2R = 9R$$

Por tanto, la potencia que se pierde en la línea por causa del receptor b) es

$$P_{pb} = 12,48R + 9R = 21,48R$$

es más del doble de la que se pierde por causa de a). Es decir, para entregar la misma potencia a ambos consumidores se pierde mayor potencia en la línea para entregársela a b) que para entregársela a a). Y, sin embargo, el consumidor a) será penalizado y el b) bonificado.

Figura 3. El receptor trifásico a) es de 1 kW y factor de potencia 0,8. El b) absorbe también 0,8 + 0,1 + 0,1 kW, y su factor de potencia es 1. Sin embargo, el b) produce mayores pérdidas que el a).



kilovoltio amperio reactivo hora (kVArh). Es decir, en todos los casos se penaliza el consumo de energía reactiva. Y sin embargo, como veremos en el ejemplo 1, en el caso de suministro trifásico, no siempre menor consumo de energía reactiva equivale a menores pérdidas en el sistema eléctrico.

La corrección del factor de potencia de los receptores está pensada para disminuir la energía que se pierde en el sistema eléctrico. Pero, de lo dicho hasta aquí, se deduce que esa corrección del factor de potencia disminuye en todos los casos el importe de la factura del consumidor, pero no siempre la energía perdida en el sistema eléctrico. En las referencias^{3,4} se analizan varios casos en los que la corrección del factor de potencia aumenta las pérdidas en vez de disminuirlas. La corrección del factor de potencia por medio de las baterías trifásicas automáticas que se ofrecen en el mercado no queda fuera de esa afirmación. A ello contribuye que tomen como factor de potencia del receptor trifásico el coseno de la diferencia de fase entre la tensión y la intensidad de una sola fase. Por eso estas baterías son eficaces para disminuir la energía perdida sólo si la carga es equilibrada, pero si no lo es pueden aumentar las pérdidas cuando aumenta el factor de potencia.

Pérdidas por desequilibrio

En la *figura 4* se muestra un receptor trifásico equilibrado que absorbe de la red la misma potencia activa de 1 kW que el receptor de la *figura 3b*, y que, como él, tiene de factor de potencia la unidad. Sólo por el desequilibrio, las pérdidas a que da lugar el receptor de la *figura 3b* son superiores a las que produce el de la *figura 4*. En las referencias^{5,6} hemos demostrado que, fijado el factor de potencia de un receptor trifásico, la menor potencia se pierde si las intensidades están equilibradas. Como en equilibrio

$$\begin{aligned} V_R &= V_S = V_T = V \\ I_R &= I_S = I_T = I \\ \varphi_R &= \varphi_S = \varphi_T = \varphi \end{aligned}$$

la potencia activa vale

$$P = 3VI \cos \varphi = \sqrt{3}UI \cos \varphi$$

y como la intensidad por el neutro es cero, para un factor de potencia dado la menor potencia que se pierde vale

$$P_p = 3RI^2 = 3R \frac{P^2}{3U^2 \cos^2 \varphi} = R \frac{P^2}{U^2 \cos^2 \varphi}$$

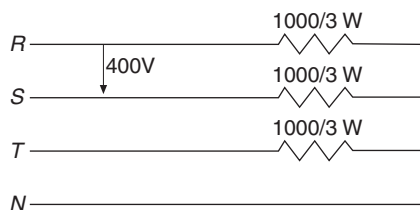


Figura 4. Como el receptor de la figura 3a, este receptor equilibrado absorbe 1 kW. La pérdida de potencia que origina es:

$$P_p = 3R \left(\frac{1000/3}{400/\sqrt{3}} \right)^2 = 6,25R$$

Sólo por el desequilibrio de las intensidades de las fases, el de la figura 3b, con el mismo factor de potencia, origina más del triple de pérdidas.

Si, además, el factor de potencia del receptor es la unidad, entonces la potencia que se pierde es

$$P_{p3} = R \frac{P^2}{U^2}$$

que es la mínima que se pierde en distribución trifásica, es decir, la exclusivamente achacable a la instalación. En condiciones normales de suministro sinusoidal, los incrementos sobre esa cantidad son achacables al receptor.

Se ve, pues, que los incrementos sobre el mínimo de la potencia que se pierde en la red trifásica no son sólo causados por consumo de energía reactiva de los receptores, sino que también son debidos al desequilibrio de las intensidades que originen. Como se ha visto, el resultado puede ser que, por el desequilibrio, un receptor con mayor factor de potencia que otro sea el que origine mayores pérdidas. Es decir, en distribución trifásica son equivalentes las siguientes acciones: 'aumento del factor de potencia de un receptor' y 'disminución de la energía reactiva que absorbe'; pero no son equivalentes a 'disminución de la energía que se pierde en la línea por causa del receptor'. Por eso, incentivar sólo la mejora del factor de potencia no es lo óptimo, ya que, dependiendo de cómo se haga, esa mejora puede aumentar el desequilibrio de las intensidades e incluso provocarlo en receptores equilibrados y aumentar las pérdidas^{3,4}. Como, además, el desequilibrio de la carga de los consumidores no es excepcional, sino que, por el contrario, es lo habitual, resulta claro que basar el recargo por energía perdida sólo en la medida del consumo de energía reactiva no es adecuado al fin que se persigue, que es el ahorro de energía.

Conclusiones

Como consecuencia de lo expuesto, se ve que la utilización del factor de potencia o de la energía reactiva como única forma de medir las pérdidas de energía achacables a los receptores no es un método adecuado, pues en ciertos casos consumidores que producen mayores pérdidas son bonificados y gravados los que las producen menores. No se cumple el objetivo perseguido de incentivar menores pérdidas ni el principio básico de equidad de que pague más el que más energía desperdicia, sino que, a veces, ocurre todo lo contrario.

A pesar de ello, mientras el actual método de medir las pérdidas persista, el consumidor sólo tiene que preocuparse de que su contador de energía reactiva indique lo menos posible. Para ello sólo tiene que corregir el factor de potencia de la facturación con ese único fin: que su receptor absorba la menor energía reactiva posible. Con independencia del resultado sobre la pérdida de energía que origine, el importe de su factura disminuirá.

Referencias

1. Ministerio de Industria y Energía, Orden Ministerial de 12 de enero de 1995.
2. Ministerio de Economía, Real Decreto 1164/2001, de 26 de octubre.
3. Félix Redondo Quintela, *Redes con excitación sinusoidal*, Béjar, 1997.
4. Félix Redondo Quintela, *Energía reactiva y disminución de las pérdidas en distribución de energía eléctrica*, Energía, Julio/Agosto 1998.
5. F. Redondo Quintela, J. M. García Arévalo y N. Redondo Melchor, *Desequilibrio y pérdidas en las instalaciones eléctricas, Montajes e instalaciones*, Abril 2000.
6. Juan Manuel García Arévalo, *Minimización de pérdidas en el sistema eléctrico por desequilibrio de las cargas trifásicas*, Trabajo de Grado de Salamanca, Universidad de Salamanca, Béjar, 2003.

AUTORES

F. R. Quintela

felixrq@usal.es

Perito industrial por la Escuela de Ingeniería Técnica Industrial de Béjar, ingeniero técnico en electricidad por la Universidad de Salamanca, licenciado en ciencias físicas por la Universidad de Valladolid y doctor en ciencias físicas por la Universidad de Salamanca. Es catedrático de escuela universitaria del área de Ingeniería Eléctrica en esa universidad, en la que ha desempeñado numerosos cargos de representación y de gobierno. Ha publicado 13 libros, y 20 artículos en revistas científicas y técnicas nacionales y extranjeras.

R. C. Redondo

roberm@usal.es

Ingeniero técnico industrial e ingeniero industrial por la Universidad de Salamanca. Obtuvo el premio COPITI al mejor trabajo de fin de carrera del año 2002. Es ayudante de escuela universitaria del área de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Salamanca. Ha publicado tres artículos en revistas técnicas y ha traducido del inglés al español cuatro programas informáticos difundidos internacionalmente. Es el responsable informático del sitio del área de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Salamanca www3.usal.es/electricidad, y colabora en su contenido. En la actualidad cursa el periodo de investigación del programa de doctorado Ingeniería Industrial y del Medio Ambiente de la Universidad de Salamanca.

J. M. G. Arévalo

jumagar@usal.es

Ingeniero técnico industrial e ingeniero industrial por la Universidad de Salamanca, en la que ha obtenido la suficiencia investigadora por el departamento de Física, Ingeniería y Radiología Médica. Es profesor titular de escuela universitaria del área de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Salamanca. Ha publicado dos libros, y varios artículos en revistas técnicas. En la actualidad realiza su tesis doctoral.

N. R. Melchor

nredondo@stsproyectos.com

Ingeniero técnico industrial, ingeniero industrial, licenciado en Derecho y doctor por la Universidad de Salamanca, de la que es profesor asociado en el área de Ingeniería Eléctrica. Ha trabajado en la Universidad de Basse Normandie y en Science Policy Research Unit de la Universidad de Sussex en sendas estancias de investigación. Ha publicado nueve artículos en revistas de investigación nacionales y extranjeras, cuatro colaboraciones en libros y siete comunicaciones en congresos. Es ingeniero consultor en STS Proyectos de Ingeniería, www.stsproyectos.com

M. M. Redondo

maritareme@yahoo.com

Ingeniera técnica industrial por la Universidad de Salamanca. Inició el sitio del Área de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Salamanca con la parte de Prácticas de Circuitos y sigue colaborando en él. Ha publicado dos artículos en revistas técnicas.