Corrección del factor de potencia

Víctor Manuel Sánchez Esquivel/Antonio Salvá Calleja

Objetivo de aprendizaje

Determinar el *factor de potencia* de una carga eléctrica monofásica y una carga eléctrica trifásica.

Llevar a cabo la corrección del factor de potencia de una carga eléctrica monofásica y de una carga eléctrica trifásica.

Comparar los resultados prácticos obtenidos con los cálculos teóricos realizados.

Introducción teórica

La cantidad de energía o trabajo realizado en un intervalo de tiempo recibe el nombre de potencia. En una *red eléctrica de un puerto*[1], la energía eléctrica por unidad de tiempo o *potencia* consta de dos componentes, a saber: *potencia promedio o activa* y *potencia reactiva*. La suma vectorial de ellas se designa como *potencia compleja* y la magnitud de ésta, *potencia aparente*. Su representación matemática es

$$S = P + jQ \tag{1}$$

aunque las unidades de S, P y Q son dimensionalmente idénticas, las unidades de S son *volt-amperes*, [VA], P se mide en *watts*, [W] y Q en volt-amperes reactivos, [VAR].

En una red eléctrica la potencia promedio o activa que se consume, se transforma por completo en luz, en calor, en trabajo mecánico o en cualquier otra forma de energía no reversible. La potencia reactiva no se consume directamente sino que se almacena en forma de un campo eléctrico o un campo magnético en un breve intervalo de tiempo y regresa a la red eléctrica de suministro durante otro intervalo de tiempo semejante. Lo anterior implica que la corriente eléctrica en las líneas de trasmisión y distribución, transformadores, motores de inducción y equipos de soldadura eléctrica entre otros, tiene una componente activa y otra reactiva.

Considere que la red eléctrica de un puerto, en la figura 1, se encuentra en estado sinusoidal permanente

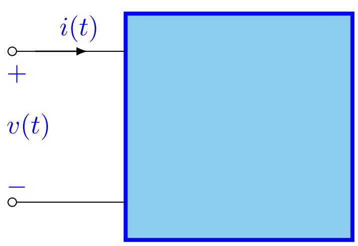

Figura 1. Red eléctrica de un puerto.

Si el voltaje, $v(t)$ y la corriente eléctrica $i(t)$ son, respectivamente

$$\begin{aligned} v(t) &= V_m \cos(\omega\, t + \theta) = R_e\left\{\sqrt{2}\,\boldsymbol{V} e^{j\,\omega\, t}\right\} \qquad \text{donde} \qquad \boldsymbol{V} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} e^{j\theta} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \measuredangle\theta \\ i(t) &= I_m \cos(\omega\, t + \theta - \phi) = R_e\left\{\sqrt{2}\boldsymbol{I} e^{j\,\omega\, t}\right\} \qquad \text{donde} \qquad \boldsymbol{I} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j(\theta-\phi)} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \measuredangle\theta - \phi \end{aligned} \tag{2}$$

La *potencia instantánea*, el producto del voltaje y la corriente eléctrica es

$$\begin{aligned} p(t) =& v(t) i(t) = V_m \cos(\omega\, t + \theta) I_m \cos(\omega\, t + \theta - \phi) \\ p(t) =& \frac{V_m I_m}{2} \left\{ \cos(2\omega\, t + 2\theta - \phi) + \cos\phi \right\} \end{aligned} \tag{3}$$

El valor medio de la potencia instantánea, que se denomina potencia promedio o activa, P, resulta

[1]Una red eléctrica de un puerto es cualquier red que no contiene fuentes independientes y de la cual sólo un par de terminales se emplean para aplicar una entrada y medir una respuesta.

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p(t)\mathrm{d}t = \frac{V_m I_m}{2}\,\cos\phi = \frac{V_m I_m}{2}\,Fp \tag{4}$$

En la expresión anterior, el factor Fp recibe el nombre de *factor de potencia*. Éste, el factor de potencia, se define como la razón de la potencia promedio a la potencia aparente. Cuando la corriente se adelanta al voltaje, el factor de potencia se considera *de adelanto*. Cuando la corriente se atrasa al voltaje, el factor de potencia se dice que es *de atraso*.

De esta manera, dado que

$$\begin{aligned} S =& P + jQ = \boldsymbol{V}\boldsymbol{I}^* = |\,\boldsymbol{V}\,|\,|\boldsymbol{I}\,|\cos\phi + j|\,\boldsymbol{V}\,|\,|\boldsymbol{I}\,|\,\mathrm{sen}\,\phi \\ S =& |\,\boldsymbol{V}\,|\,|\boldsymbol{I}\,|\,(\cos\phi + j\,\mathrm{sen}\,\phi) = |\,\boldsymbol{V}\,|\,|\boldsymbol{I}\,|\;e^{j\phi} = |\,\boldsymbol{V}\,|\,|\boldsymbol{I}\,|\;\measuredangle\phi = \frac{V_m I_m}{2}\,\measuredangle\phi \end{aligned} \tag{5}$$

entonces

$$Fp = \frac{P}{|\,\boldsymbol{V}\,|\,|\boldsymbol{I}\,|} = \frac{P}{|S\,|} \tag{6}$$

Como la potencia se distribuye a un voltaje constante, la corriente eléctrica varía, su valor se determina a partir de la ecuación (4), esto es

$$I_m = \frac{2P}{V_m Fp} \tag{7}$$

Como se observa, la corriente es inversamente proporcional al factor de potencia. Mientras más pequeño es el factor de potencia, mayor es la cantidad de corriente que se necesita para satisfacer la potencia requerida. Por lo que la situación ideal requiere que el factor de potencia sea igual a la unidad. Si esto no se cumple, las perdidas de potencia en las líneas de transmisión proporcionales al cuadrado de la corriente eléctrica aumentan. Es por esto, que las compañías generadoras de energía requieren que el factor de potencia sea igual a la unidad, para proporcionar una cantidad de potencia requerida con corrientes mínimas y por consiguiente con menor pérdida en las líneas de distribución.

Teniendo en cuenta que el ángulo ϕ de la ecuación (5) corresponde al argumento de la impedancia de la carga eléctrica[2], Z. Cuando ésta es únicamente resistiva el factor de potencia es igual a la unidad, $\phi = 0°$ y cuando es reactiva pura el factor de potencia es igual a cero, $\phi = \pm\,90°$. En el caso general cuando la impedancia de carga es de la forma

$$Z(j\omega) = R + jX(j\omega)$$

el factor de potencia se puede variar, si se modifica la impedancia de la carga eléctrica. Lo anterior se logra al conectar en paralelo otra impedancia Z_m, como se muestra en la figura 2, que satisfaga las siguientes condiciones:

- Z_m no debe consumir potencia activa.
- Z_m con Z debe satisfacer el factor de potencia que se desea.

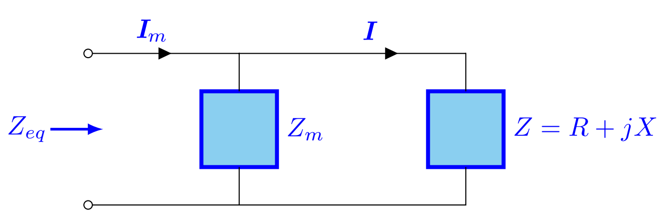

Figura 2. Circuito eléctrico para corregir el factor de potencia.

La primera condición implica que Z_m sea unicamente reactiva, esto es

$$Z_m = jX_m \tag{8}$$

[2]La componente real de la impedancia recibe el nombre de *resistencia*, mientras que la componente imaginaria se denomina *reactancia*.

La segunda condición requiere que

$$Fp_{deseado} = \cos\left[\arctan\left(\frac{Im\{Z_{eq}\}}{Re\{Z_{eq}\}}\right)\right] \tag{9}$$

y dado que

$$Z_{eq} = \frac{ZZ_m}{Z + Z_m} = X_m \frac{RX_m + j(R^2 + XX_m + X^2)}{R^2 + (X + X_m)^2}$$

entonces, la reactancia que modifica el factor de potencia es

$$X_m = \frac{R^2 + X^2}{R\ \tan\left[\arccos(Fp_{deseado})\right] - X} \tag{10}$$

con $\tan(\arccos(Fp)) > 0$ si el Fp es de atrasado y $\tan(\arccos(Fp)) < 0$ si el Fp es de adelantado.

Bibliografía

Desoer, C. A. and Kuh, E.S. *Basic Circuit Theory.* New York: McGraw-Hill Company, 1969.

Johnson, D. E., Hilburn, J. L., Johnson, J. R. *Basic Electric Circuit Analysis.* Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1986.

Dorf, R. C., Svoboda, J. A. *Circuitos Eléctricos.* México, D. F.: Alfaomega Grupo Editor, S. A. de C. V., 2011.

Hayt, W. H., Kemmerly, J. E. *Análisis de circuitos eléctricos en ingeniería.* México: Mc Graw Hill, 2007.

Sears, F. W. *Fundamentos de Física II. Electricidad y Magnetismo.* Madrid, España: Aguilar, S. A. de Ediciones, 1970.