

PRÁCTICA 3

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

$$S = P + jQ \quad (1)$$

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 transmisión 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

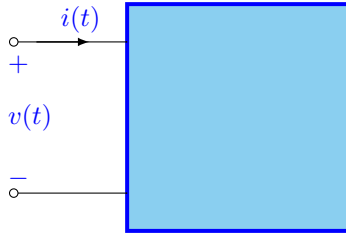


Figura 1. Red eléctrica de un puerto.

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

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

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

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

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

¹Una 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.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{V_m I_m}{2} \cos \phi = \frac{V_m I_m}{2} Fp \quad (4)$$

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

$$\begin{aligned} S &= P + jQ = \mathbf{V} \mathbf{I}^* = |\mathbf{V}| |\mathbf{I}| \cos \phi + j |\mathbf{V}| |\mathbf{I}| \sin \phi \\ S &= |\mathbf{V}| |\mathbf{I}| (\cos \phi + j \sin \phi) = |\mathbf{V}| |\mathbf{I}| e^{j\phi} = |\mathbf{V}| |\mathbf{I}| \angle \phi = \frac{V_m I_m}{2} \angle \phi \end{aligned} \quad (5)$$

entonces

$$Fp = \frac{P}{|\mathbf{V}| |\mathbf{I}|} = \frac{P}{|S|} \quad (6)$$

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

$$I_m = \frac{2P}{V_m Fp} \quad (7)$$

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 pérdidas 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 eléctrica², Z . Cuando ésta es únicamente resistiva el factor de potencia es igual a la unidad, $\phi = 0^\circ$ y cuando es reactiva pura el factor de potencia es igual a cero, $\phi = \pm 90^\circ$. 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.

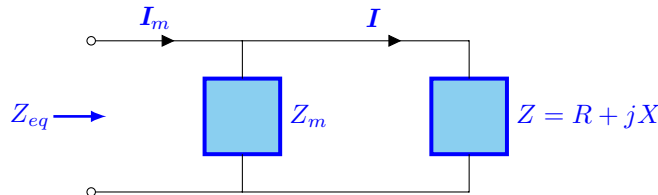


Figura 2. Circuito eléctrico para corregir el factor de potencia.

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

$$Z_m = jX_m \quad (8)$$

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

La segunda condición requiere que

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

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

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

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

Desarrollo

Experimento 1

En la primera parte de la práctica se lleva a cabo la corrección del factor de potencia del circuito eléctrico que se presenta en la figura 3.

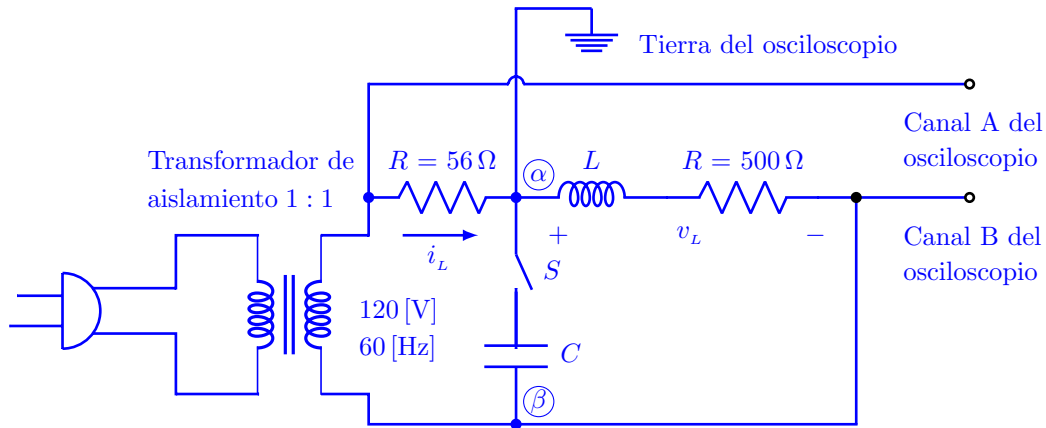


Figura 3. Circuito eléctrico de una sola fase.

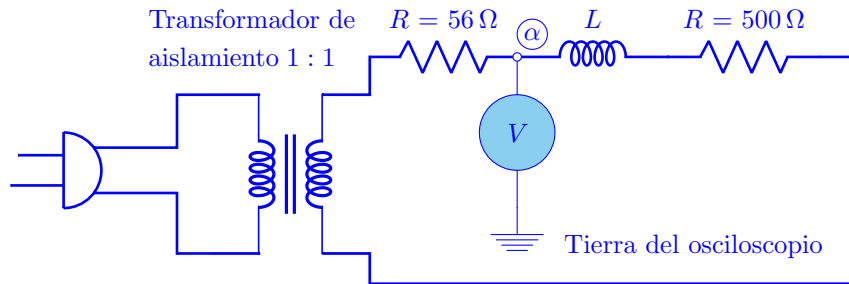


Figura 4. Circuito eléctrico de verificación del transformador.

Antes de conectar la tierra del osciloscopio en el nodo α , verifique en que posición de la clavija hay la menor diferencia de potencial, ésta será la posición correcta, para realizar el experimento. Vea la figura 4. Si no hace lo indicado, puede ocurrir una descarga eléctrica al conectar la tierra del osciloscopio al nodo α .

El desfase entre la corriente eléctrica i_L y el voltaje v_L de la carga resistiva-inductiva, dado que en el osciloscopio no es posible medir la corriente en forma directa; en el circuito eléctrico de la figura 3, se puede determinar a partir

de las formas de onda que se observan en el osciloscopio. La señal en el canal A es proporcional a la corriente i_L y en el canal B la señal corresponde al voltaje v_L pero invertida 180° .

A continuación, proceda a conectar las puntas con atenuación del osciloscopio como se observa en la figura 3.

En caso de que no disponga de puntas con atenuación, con la finalidad de proteger el osciloscopio, es necesario realizar dos divisores de voltaje mediante resistencias para hacer las mediciones correspondientes. En la figura 5, se muestra el circuito eléctrico de una fase de la figura 1 con los divisores de voltaje mencionados. Debe ser palmario que los valores de los voltajes que se observan en el osciloscopio, están atenuados once veces.

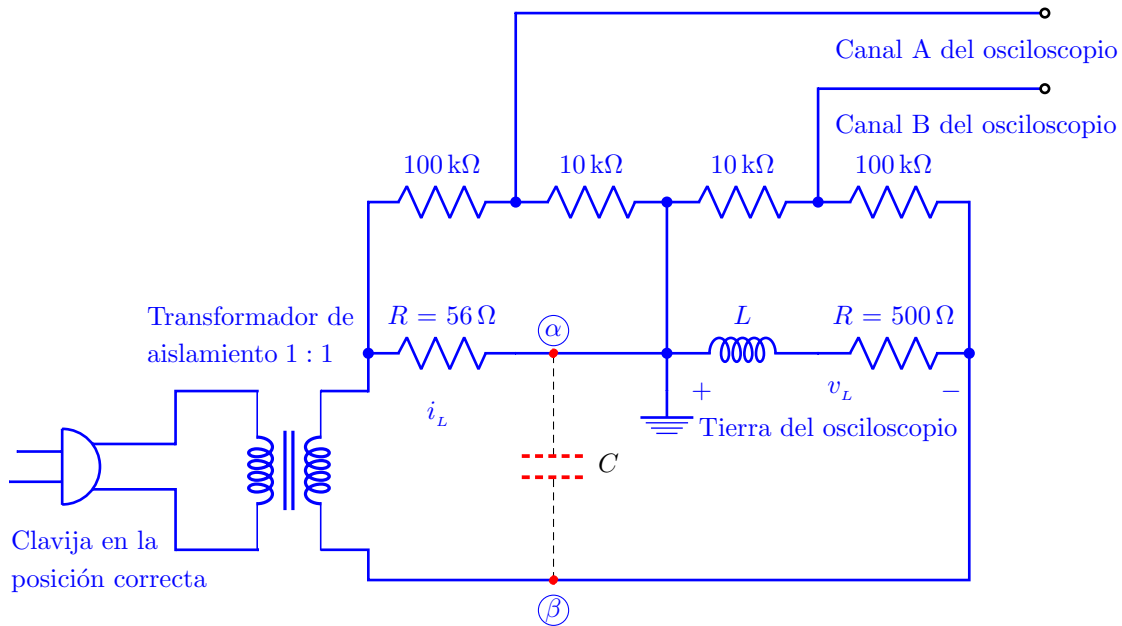


Figura 5. Circuito eléctrico para la modificación del factor de potencia.

Mida el ángulo de desfase entre el voltaje v_L y la corriente eléctrica i_L . A partir de las mediciones realizadas, determine:

1. El factor de potencia de la carga eléctrica.
2. El triángulo de potencias.
3. El valor de la capacitancia que se requiere para modificar el factor de potencia a la unidad.

A continuación, conecte un capacitor cuyo valor de capacitancia sea el más próximo al calculado, entre los nodos α y β . Observe el efecto en el osciloscopio.

4. ¿Qué sucede? Explique.
Repita lo anterior para diferentes valores de la capacitancia y conteste las siguientes preguntas.
5. ¿Qué ocurre cuando el valor de la capacitancia es menor que el calculado?
6. ¿Y cuándo es mayor?

Experimento 2

En la segunda parte de la práctica se modifica el factor de potencia del motor de inducción que se utilizó en la práctica de *Medición de potencia en sistemas eléctricos*.

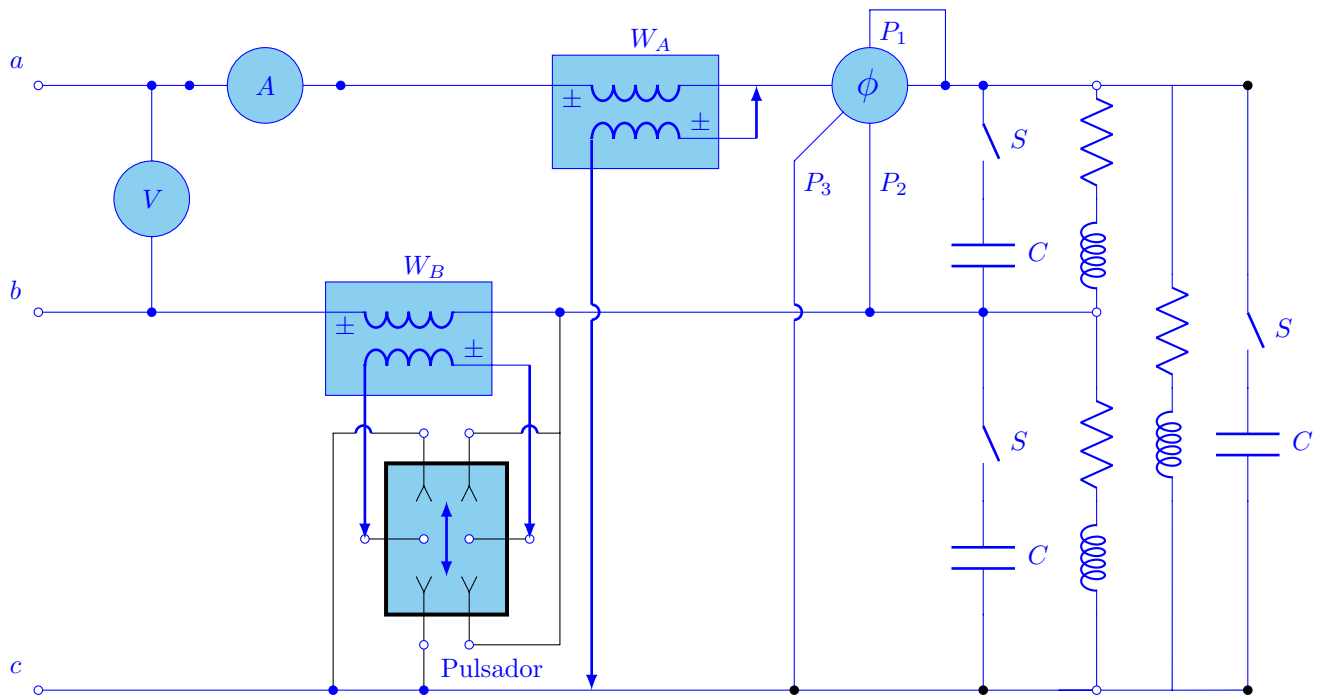


Figura 6. Circuito trifásico del motor de inducción y banco de capacitores.

Construya el circuito eléctrico de la figura 6, con los interruptores S abiertos.

El pulsador, presente en la figura, permite conectar la bobina de tensión del wattmetro B , con la polaridad adecuada. Recuerde que el valor medido, en la práctica de *Medición de potencia en sistemas eléctricos*, es negativo.

Con la ecuación (11), determine el valor del ángulo ϕ .

$$\phi = \arccos \frac{P_{3\phi}}{\sqrt{3} |V_L| |I_L|} \quad (11)$$

1. ¿El valor calculado de ϕ , es el indicado por el factorímetro? En caso de haber discrepancias, mencione las posibles causas.

Cierre simultáneamente los interruptores S y verifique que el wattmetro B marca un valor adecuado, de no ser así, cambie el pulsador a la otra posición.

Mida el nuevo ángulo de desfase. Con este valor y la ecuación (12), se puede calcular la potencia total suministrada por los capacitores.

$$Q_{3\phi} = P_{3\phi} (\tan \phi_1 - \tan \phi_2) \quad (12)$$

donde ϕ_1 es el ángulo de desfase original y ϕ_2 es el nuevo ángulo de desfase.

2. ¿Cuál es la potencia reactiva suministrada por los capacitores en cada fase?
3. Determine el valor de la capacitancia que se requiere para suministrar la potencia reactiva que se calculó en la pregunta anterior.³ ¿Qué concluye?

Equipo necesario

2 Wattmetros
1 Voltímetro

³Considere la ecuación (10).

-
-
- 1 Amperímetro
 - 1 Pulsador
 - 1 Motor de inducción
 - 1 Banco de capacitores
 - 1 Osciloscopio
 - 1 Transformador de relación 1 : 1
 - 1 Resistor de $500\ \Omega$, 25 watts

Material necesario

- 1 Resistor de $56\ \Omega$, 10 watt
- 2 Resistores de $10\ k\Omega$, 0.5 watt
- 2 Resistores de $100\ k\Omega$, 0.5 watt
- 1 Reactor de 20 watts para lámpara fluorescente

Cuestionario previo

1. ¿Qué se entiende por modificación del factor de potencia y qué ventajas representa?
2. Si en un determinado circuito eléctrico con carga eléctrica predominantemente resistiva-inductiva, a ésta se le conecta un capacitor en serie. ¿El factor de potencia, se modifica?
3. ¿Es posible modificar el factor de potencia de una carga eléctrica arbitraria conectando en paralelo una resistencia?
4. ¿Qué ventajas o desventajas presenta la situación anterior?
5. Encuentre una expresión en función de los fasores V_L e I_L del circuito de una fase de la figura 3, antes de conectar el capacitor, para determinar el valor de la capacitancia del capacitor, C , que hace al factor de potencia unitario.
6. Demuestre la ecuación (10).
7. Demuestre la ecuación (12).

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.