8. COMPENSACIÓN DE ENERGÍA REACTIVA

8.1 Necesidad de compensación

La compensación de energía reactiva resulta necesaria por innumerables razones expuestas en este capítulo. Si bien es cierto que la parte más interesada en la compensación es el operador de la red, el usuario también comparte poderosas razones. Por parte del operador las pérdidas en la red junto con la disminución de la capacidad de la misma constituyen razones indiscutibles que en gran parte son atribuibles al consumo de energía por parte del consumidor. Este concepto justifica que los operadores de redes apliquen recargos o penalizaciones al usuario (8.3). Por otra parte, los usuarios comparten también con mayor o menor medida los inconvenientes mencionados junto con la penalización, la cual constituye la razón principal para compensar en la mayoría de casos.

8.2 Inconvenientes de la energía reactiva

El consumo de energía reactiva[136] tiene varias consecuencias negativas en la red eléctrica como son la producción de pérdidas, la disminución de la capacidad y el aumento de la caída de tensión.[137]

8.2.1 Pérdidas en la red

Si consideramos una línea trifásica equilibrada de resistencia R por fase alimentando una carga que absorbe una corriente I, las pérdidas en la línea se calculan por:

$$P_v = 3I^2 R$$

Expresión que se puede expresar en función de la potencia aparente o en función de las potencias activa y reactiva:

$$P_v = 3\left(\frac{S}{\sqrt{3}\,U}\right)^2 R = \frac{S^2}{U^2} R = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R$$

136. A partir de ahora vamos a tomarnos más libertad y hablaremos en los términos cotidianos de consumo o absorción y generación de energía reactiva en contra de los conceptos físicos descritos en 7.1. Además, cuando nos refiramos a la energía reactiva nos referiremos por defecto a la energía reactiva inductiva.

137. No siempre este aspecto debe considerarse negativo ya que puede usarse para regular la tensión en las redes (anexo A10.1).

Comprobando por tanto, que las pérdidas en la red eléctrica dependen del cuadrado de las potencias tanto activa como reactiva, poniendo de manifiesto la importancia de compensar esta última reduciendo o incluso eliminando su circulación por la red.

Pero generalmente resulta más práctico expresar las pérdidas en función del $\cos\varphi$. Para ello partiendo de la expresión anterior podemos escribir:

$$P_v = \frac{(P/\cos\varphi)^2}{U^2} R$$

y calcular un factor de reducción de pérdidas δ, al pasar de un $\cos\varphi_1$ a $\cos\varphi_2$, manteniendo la potencia activa constante:

$$\delta = \frac{P_{v1} - P_{v2}}{P_{v1}} = 1 - \frac{P_{v2}}{P_{v1}} = 1 - \frac{S_2^2}{S_1^2} = 1 - \frac{P/\cos^2\varphi_2}{P/\cos^2\varphi_1} = 1 - \frac{\cos^2\varphi_1}{\cos^2\varphi_2}$$

Este mismo factor puede aplicarse al caso de un transformador para calcular el ahorro de pérdidas en los devanados usualmente denominadas como pérdidas en el cobre o pérdidas en carga.

8.2.2 Disminución de la capacidad disponible

La potencia aparente representa la máxima potencia activa disponible si no existe energía reactiva, ya que:

$$P = \sqrt{S^2 - Q^2}$$

Luego, si $Q = 0$, $P = S$.

Así, reducir la energía reactiva en circulación en la red supone aumentar su capacidad para suministrar energía activa.

En el ejemplo 8.2.2-1 se comprueba el efecto mencionado.

Ejemplo 8.2.2-1

Considérese un transformador de 1.000 kVA, 24/0,4 kV, con pérdidas en el cobre de 11 kW. Con un factor de carga del 80 % y un $\cos\varphi_1$ de las cargas del 0,75.

Determinar el ahorro de pérdidas al compensar a $\cos\varphi_2 = 0{,}95$ y el aumento de la capacidad disponible del mismo.

Las pérdidas reales serán:

$$P_v = 0{,}8^2 \cdot 11 = 7{,}04 \text{ kW}$$

La reducción de pérdidas sería:

$$\delta = 1 - \frac{0{,}75^2}{0{,}95^2} = 0{,}38$$

Con lo que el ahorro sería de $7{,}04 \cdot 0{,}38 = 2{,}68$ kW

En cuanto a la capacidad disponible, antes de la compensación era de tan solo el 20 %, es decir, de 200 kVA con un consumo de potencia activa:

$$P_1 = S_1\cos\varphi_1 = 800 \cdot 0{,}75 = 600 \text{ kW}$$

La potencia reactiva tras la compensación será: (ver figura 8.2.2-1).

$$Q_2 = P\tan\varphi_2 = 600 \cdot 0{,}33 = 197 \text{ kvar}$$

luego: $S_2 = \sqrt{600^2 + 197^2} = 632\,\text{kVA}$

Por tanto, el aumento de capacidad disponible será:

$$\Delta S = S_1 – S_2 = 800 - 632 = 168 \text{ kVA}$$

y la disponibilidad total aumenta del 20 % al 37 %.

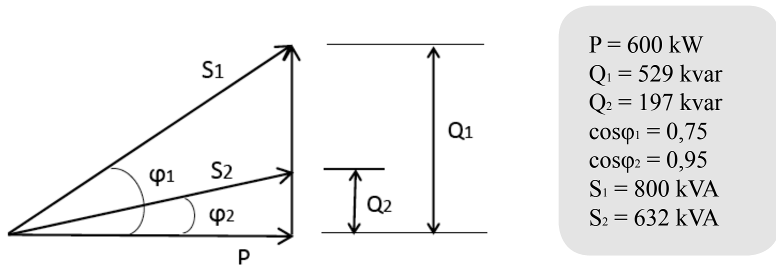
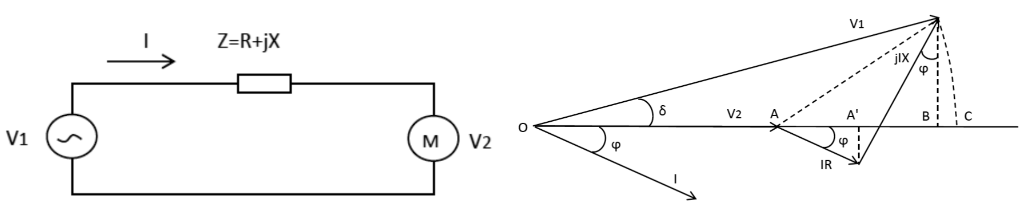


Figura 8.2.2-1 Triángulos de potencias antes y después de la compensación.

8.2.3 Caída de tensión

Como el consumo de energía reactiva supone una mayor circulación de corriente para la misma potencia activa, la energía reactiva supondrá una mayor caída de tensión. En la figura 8.2.3-1 se representan un circuito que puede corresponder tanto a una línea como a un transformador y en el que Z representa la impedancia de línea o del transformador, I la corriente absorbida por la carga, por ejemplo un motor asíncrono, con un desfase φ respecto a la tensión V_2. La caída o diferencia de tensión entre la fuente y el receptor se determina por:

$$\Delta V = V_1 - V_2 = \overline{OC} - \overline{OA} = \overline{AC} \approx \overline{AB} = \overline{AA'} + \overline{A'B}$$



a) b)

Figura 8.2.3-1 Determinación de la caída de tensión.
a) Circuito simplificado. b) Diagrama fasorial.

Suponiendo, como generalmente se cumple, que el ángulo δ es muy pequeño y, por tanto, $\overline{BC}$ despreciable, se obtiene:

$$\Delta V = IR\cos\varphi + IX\text{sen}\varphi$$

Para el caso de un transformador la expresión anterior en % a la tensión V_1 se transforma en:

$$u = u_R\cos\varphi + u_X\text{sen}\varphi$$

siendo u_R y u_X, las caídas de tensión resistiva e inductiva.

Ejemplo 8.2.3-1

Calcular la caída de tensión sin compensación y con compensación a cosφ = 1 de un transformador de 630 kVA con una tensión de cc. del 6 % que alimenta a un motor de 400 kW con el 95 % de rendimiento y cosφ = 0,85.

En primer lugar, como solo se facilita el dato de u_k, y $u_k = \sqrt{u_r^2 + u_x^2}$

Podemos estimar $u_r \approx 1$ %, con lo que: $u_x = \sqrt{6^2 - 1} = 5{,}92\,\%$

Valores que deben ser corregidos para la carga real, en este caso del motor:

$$S_M = \frac{400}{0{,}95 \cdot 0{,}85} = 495\,\text{kVA}$$

Por tanto, el factor de corrección o índice de carga sería: $C = \frac{495}{630} = 0{,}79$ con lo que,

$$u'_r = Cu_r\cos\varphi = 0{,}79 \cdot 1 \cdot 0{,}85 = 0{,}7\,\%$$

$$u'_x = Cu_x\text{sen}\varphi = 0{,}79 \cdot 5{,}92 \cdot 0{,}53 = 2{,}5\,\%$$

Si se compensara el motor a cosφ = 1 la caída de tensión resistiva aumentaría ligeramente a 0,8 %, mientras que la inductiva se anularía al ser senφ = 0. Con lo que la caída de tensión pasaría de $\sqrt{0{,}7^2 + 2{,}5^2} = 2{,}6\,\%$ sin compensar a 0,8 % compensado.

En el ejemplo anterior se puede apreciar la poca incidencia de la resistencia en la caída de tensión, por lo que la expresión simplificada de la caída de tensión habitualmente utilizada para circuitos inductivos es:

$$u = Cu_x\text{sen}\varphi$$

siendo $C = S/S_N$ el mencionado índice de carga. Si en la expresión anterior senφ es negativo, lo cual sucede si se sobrecompensa el transformador, la caída de tensión resulta negativa, es decir, la tensión secundaria del transformador superaría a la tensión de vacío, fenómeno que es conocido como efecto Ferranti[138]. Existe una expresión más simplificada de la caída de tensión:[139]

$$u = 100\frac{Q}{S_k}$$

siendo:

Q, la potencia reactiva inductiva o capacitiva, la primera con signo positivo y la segunda con negativo.

S_k, la potencia de cc. del transformador dado por: $S_k = \frac{S_N}{u_k}$

Si se aplica esta expresión al ejemplo 8.2.3-1 teniendo en cuenta que:

$$Q = S\text{sen}\varphi = 495\text{sen}(\cos^{-1} 0{,}85) = 261 \text{ kvar}$$

$$S_k = \frac{630}{0{,}06} = 10.500 \text{ kVA}$$

Se obtiene $u = 100\frac{261}{10.500} = 2{,}5\,\%$

Si se compensa la potencia reactiva consumida por el motor Q = 0 y, por tanto, u = 0, es decir, no habría caída de tensión a excepción de la resistiva que habíamos considerado despreciable.

Si se sobrecompensara el transformador por ejemplo con un 25 % de su potencia se produciría una caída de tensión negativa, o sea, un aumento de tensión en carga respecto al funcionamiento en vacío de:

$$u = \frac{-630 \cdot 0{,}25}{10.500} = -1{,}5\,\%$$

8.3 Penalización por consumo de energía reactiva

Los inconvenientes antes citados afectan tanto a usuarios como operadores de red, si bien estos últimos en general sufren en mayor medida las consecuencias tanto de pérdidas en la red como de disminución de la capacidad potencial de la misma. Por tal motivo fuerzan al usuario, a través de penalizaciones, a reducir el consumo de energía reactiva. El método más utilizado de aplicar la penalización por parte de los operadores es:

138. Sebastian Ziani de Ferranti (1864-1930), inventor inglés que fundó la sociedad Ferranti Ltd. en 1882 y que ha perdurado hasta 1993.

139. Partiendo de $u = Cu_x\text{sen}\varphi$ y teniendo en cuenta que $u_x = 100\frac{CI_N X_k}{U/\sqrt{3}}$, $I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3}U}$, $X_k = \frac{U^2}{S_k}$ y $\text{sen}\varphi = \frac{Q}{CS}$, se obtiene: $u_x = 100\frac{Q}{S_k}$