

7. POTENCIAS Y FACTOR DE POTENCIA

Para introducirnos en el concepto del factor de potencia (FP) debemos partir del de la potencia eléctrica como producto de la tensión por la intensidad de la corriente eléctrica:

$$P = VI$$

Concepto que surge junto con el de intensidad y potencial en un campo eléctrico.¹¹⁷

Históricamente se comprende mejor el concepto de potencia a partir de dos descubrimientos de gran trascendencia, uno del alemán Georg Simon Ohm, hijo de un humilde cerrajero, y otro de James Prescott Joule, hijo de un acaudalado cervecero inglés, con dos leyes básicas que llevan sus respectivos nombres: ley de Ohm (1827) y ley de Joule (1840). Esta última, y gracias a la primera, permite establecer que la energía por unidad de tiempo, es decir, la potencia, es igual al cuadrado de la corriente por la resistencia del conductor que atraviesa:

$$P = I^2R = (IR)I = VI$$

Pero es necesario esperar unos años más para ampliar el concepto de potencia en corriente alterna. El cual surge a consecuencia de la invención y posterior desarrollo de las máquinas eléctricas de inducción llevado a cabo por ilustres electricistas como Galileo Ferraris, Ambrose Fleming, Nikole Tesla y George Westinghouse entre otros.

Galileo Ferraris fue el pionero en el desarrollo del transformador y del motor de inducción (1885). Estos estudios condujeron a Ferraris a deducir matemáticamente la potencia activa o potencia real, como originalmente fue denominada, como producto de $VI \cos \phi$. Más tarde, Ambrose Fleming,¹¹⁸ catedrático de Ingeniería Eléctrica de la Uni-

117. Basta recordar el concepto de intensidad de campo eléctrico (E) como fuerza (F) por unidad de carga (Q) y como se relaciona esta magnitud con la tensión o diferencia de potencial (V) por la fórmula:

$$El = V \text{ (siendo } l \text{ la distancia recorrida por } Q \text{)}$$

Es decir: el trabajo por unidad de carga realizado por el campo eléctrico al desplazar una carga Q es igual a la diferencia de potencial (V) entre el origen y fin del recorrido de Q.

Y teniendo en cuenta que la intensidad es igual a la carga por unidad de tiempo: $I = \frac{Q}{t}$ resulta:

$$VI = \frac{F}{Q} l \cdot \frac{Q}{t} = \frac{F \cdot l}{t} \text{ y dimensionalmente } \frac{F l}{t} = \frac{[N] \cdot [m]}{[s]} = [W].$$

118. Creo que más de uno de los lectores recordará a Fleming como el creador de las reglas de la mano derecha e izquierda con las que puede determinarse el movimiento y los sentidos del campo y la corriente en máquinas eléctricas. Aunque merece ser más conocido por la invención de la válvula Fleming o diodo rectificador.

versity College of London, pasó a designar el $\cos\phi$ como factor de potencia (FP), definido como cociente entre la potencia activa y la aparente.¹¹⁹

Posteriormente, al producto $VI\sin\phi$ se le designó potencia magnetizante o también devatada para finalmente pasar a denominarse potencia reactiva por acuerdo tomado en el Congreso Internacional de Electricidad de Turín de 1911.

Desde entonces se han ido complicando mucho las cosas sobre todo por la extensión de la electrónica de potencia y la consiguiente aparición de nuevos conceptos de potencias en regímenes no sinusoidales.

Puede afirmarse que al debate sobre potencias y en particular sobre la potencia aparente y el FP le quedan todavía algunas sesiones y aunque se intuya el final de la historia, el último episodio todavía está por escribir, por lo que resulta todavía más apasionante. En los anexos a este capítulo se incluyen más detalles y sobre todo ejemplos para arrojar luz sobre esta interesante materia, por lo que animo al lector a la lectura de los mismos, consciente de que los anexos suelen estar para llenar páginas con poco contenido práctico, pero en este caso he intentado huir del tópico. Por tanto, ¡ánimos! para proseguir la lectura.

7.1 Potencias en régimen senoidal

1) Sistemas monofásicos

Así como en corriente continua el producto de la tensión por la corriente suministrada por una fuente a un circuito eléctrico es potencia activa, expresada en vatios, en corriente alterna este mismo producto no coincide con la potencia activa, salvo que el único componente del circuito sea una resistencia.

Si calculamos el producto v_i para un circuito cualquiera en que existen, resistencias e inductancias o capacidades o ambas a la vez y teniendo en cuenta que:

$$\begin{aligned}v(t) &= \sqrt{2}V\cos\omega t \\i(t) &= \sqrt{2}I\cos(\omega t - \phi)\end{aligned}$$

Siendo ϕ el ángulo de desfase de la corriente respecto a la tensión, resulta efectuando los cálculos pertinentes, la siguiente expresión:¹²⁰

$$v(t)i(t) = p(t) = P(1 + \cos 2\omega t) + Q\sin 2\omega t$$

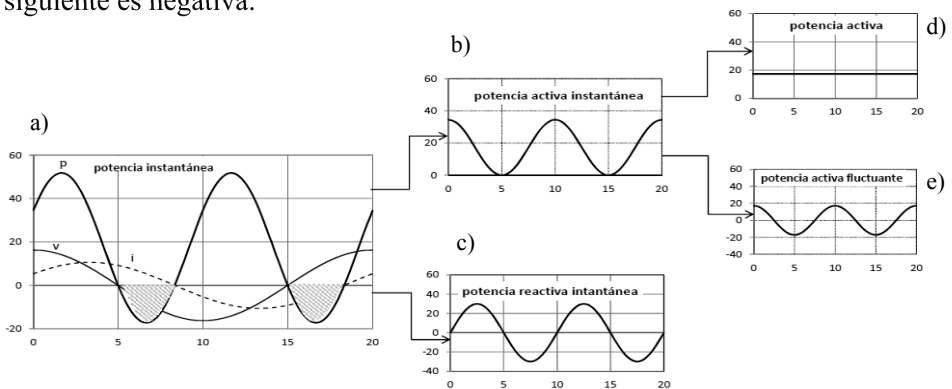
Siendo, $P(1 + \cos 2\omega t)$ y $Q\sin 2\omega t$ las potencias activa y reactiva instantáneas y $P = VI\cos\phi$ y $Q = VI\sin\phi$ las que habitualmente denominamos potencias activa y reactiva.

119. Sería injusto no mencionar en este contexto a la extraordinaria figura de Charles Proteus Steinmetz a quien debemos su excelente obra «Theory and Calculation of Alternating Current Phenomena» cuya 3ª edición de 1900 se puede localizar en <https://archive.org/details/theorycalculatio00steiniiala>.

120. Cuyo desarrollo puede encontrarse en libros de texto como [1].

De las expresiones anteriores se extraen las siguientes conclusiones, algunas de las cuales pueden parecer paradójicas.

- a) La expresión $p(t)$ corresponde a la potencia denominada instantánea, la cual oscila a una frecuencia doble de la de red, es decir, si la frecuencia de red es de 50 Hz, la potencia $p(t)$ oscilará a 100 Hz, que es, por ejemplo, la frecuencia de parpadeo de un tubo fluorescente o la frecuencia de vibración mecánica de un motor monofásico. Cabe resaltar el término monofásico ya que este fenómeno no sucede en los motores trifásicos como se demuestra más adelante. En la figura 7.1-1 se muestra gráficamente $p(t)$ correspondiente a un circuito con carga inductiva.
- b) El valor medio de $p(t)$ es igual a la potencia activa P ,¹²¹ por tanto, P no depende del tiempo, es decir, no oscila. En este sentido se comporta como la potencia en c.c. como puede apreciarse en la figura 7.1-1d.¹²² Esta potencia es la responsable de desarrollar la potencia útil de las máquinas eléctricas.
- c) El término $Q\text{sen}2\omega t$ de la expresión de $p(t)$ corresponde a la potencia reactiva instantánea, cuyo valor medio es nulo al ser la expresión de un onda senoidal. Sin embargo, esto no quiere decir que la potencia reactiva no tenga ningún efecto en el circuito o en una red eléctrica. En la figura 7.1-1c se observa su evolución con el tiempo. Durante un semiperiodo, es decir, un cuarto de periodo de la frecuencia de la red ω , la potencia reactiva es positiva y durante el semiperiodo siguiente es negativa.



a) Ondas de tensión y corriente junto con la potencia instantánea calculada por $P = v \cdot i$ (la escala del eje de ordenadas corresponde a la potencia, v e i no están a escala).

b) Potencia activa instantánea.
 c) Potencia reactiva instantánea.
 d) Potencia activa.
 e) Potencia activa fluctuante.

Figura 7.1-1 Potencias con carga inductiva.

121. Esto se comprueba fácilmente por la expresión de $p(t)$ ya que al determinar el valor medio los términos con $\cos 2\omega t$ y $\text{sen} 2\omega t$ se anulan.

122. La potencia activa instantánea se puede descomponer en potencia activa P y potencia activa fluctuante.

Si por convenio se establece que cuando es positiva proviene del generador y cuando es negativa del receptor, hay un trasiego de energía reactiva entre generador y receptor. Si en este intercambio no hay pérdida de energía por suponer nula la resistencia del circuito, la energía reactiva suministrada por el generador al receptor es devuelta en su totalidad al generador no provocando, por consiguiente, ningún consumo de energía. Sin embargo, si la resistencia no es nula el generador debe suministrar, además, de la energía reactiva la energía activa disipada en la resistencia.¹²³

- d) Suponiendo ahora que el receptor es un motor y que la red de alimentación tiene una resistencia R , el generador deberá suministrar, además, de la potencia activa P_M ¹²⁴ la reactiva Q_M del motor junto con la de pérdidas en la línea P_R . Pérdidas en parte debidas al transporte de la energía reactiva y que constituye uno de los motivos por los que las Compañías Eléctricas penalizan a los usuarios por consumo de reactiva.
- e) Otra curiosidad de la potencia reactiva es la falsa creencia de que se debe exclusivamente a la energía almacenada en campos magnéticos o eléctricos, es decir, en bobinas o condensadores. Ciertamente en ambos campos se almacena energía expresada por:

$$W_L = \frac{1}{2}LI_m^2 \quad \text{y} \quad W_C = \frac{1}{2}CV_m^2$$

para los campos citados, siendo I_m y V_m los valores máximos de corriente y tensión respectivamente, energía que se relaciona con la potencia reactiva,¹²⁵ pero existen otras formas o mecanismos que también dan lugar a la aparición de energía reactiva, como es el caso de un rectificador controlado cuya potencia reactiva se expresa por:

$$Q_L = VI\text{sen}\alpha$$

Siendo α el ángulo de control del rectificador. En este caso no existe ningún campo eléctrico ni magnético donde pueda almacenarse este tipo de energía. Por tanto, quizás resulte conveniente definir la potencia reactiva como aquella que se origina a consecuencia del desfase entre tensión y corriente sin mencionar los campos.

- f) Por último, la potencia aparente $S = VI$ no pretende tener ningún significado físico pero resulta muy útil para dimensionar máquinas y dispositivos eléctricos como es el caso de los transformadores, ya que su tamaño y en definitiva su precio depende de esta potencia.

La expresión de $p(t)$ nos ha permitido identificar la potencia activa y reactiva de las cuales hemos analizado algunas de sus propiedades, comprobando la gran

123. Observando la figura 7.1-1a la superficie abarcada por las partes positivas de la curva de $p(t)$ representa la energía suministrada por el generador, que debe cubrir la energía activa más la reactiva de la inductancia L . Por otra parte, las regiones negativas de $p(t)$, sombreadas en la figura 7.1-1a devuelven la energía reactiva almacenada en L .

124. En P_M deben incluirse las pérdidas del propio motor.

125. Es posible establecer las siguientes expresiones:

$$Q_L = \omega W_L \quad \text{y} \quad Q_C = \omega W_C$$

diferencia entre ambas, sobre todo que la potencia activa P es un valor medio mientras que la reactiva Q es un valor máximo con un valor medio nulo.¹²⁶ Por tanto, sería un grave error equiparar ambas potencias.

La potencia activa es la encargada de realizar un trabajo como hacer girar un motor que a su vez es capaz de accionar, por ejemplo, una grúa y elevar su carga, algo que no puede realizarse con la potencia reactiva. Sin embargo, esta última es indispensable para el funcionamiento de un transformador o un motor asíncrono.

En la tabla 7.1-1 se resumen las tres potencias junto con sus características básicas y las unidades empleadas.

Potencia	Expresión matemática	Unidades
Instantánea	$p(t) = P(1 + \cos 2\omega t) + Q\sin 2\omega t$	–
Activa	$P = VI\cos\phi$	W (vatio)
Reactiva	$Q = VI\sin\phi$	var (voltio amperio reactivo)
Aparente	$S = VI$	VA (voltio amperio)

Considerando las expresiones de P y Q puede construirse el denominado triángulo de potencias de la figura 7.1-2a en el que las potencias se muestran como vectores en un plano complejo,¹²⁷ en el que se cumple:

$$\bar{S} = P + jQ \text{ (en forma compleja)}$$

$$S^2 = P^2 + Q^2 \text{ (en forma escalar)}$$

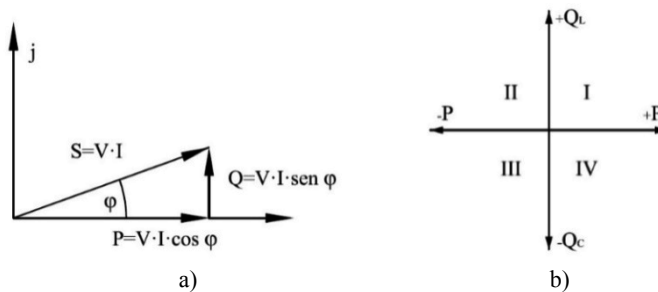


Figura 7.1-2 a) Representación de las potencias en el plano complejo (triángulo de potencias). b) Convenio de signos para las potencias activa y reactiva. Q_L reactiva inductiva o reactiva absorbida y Q_C reactiva capacitiva o reactiva generada.

126. La pregunta que surge es ¿por qué adoptamos un valor medio para la potencia activa y un valor máximo para la reactiva? Para la activa se comprende si la comparamos con la potencia en c.c. y en cuanto a la reactiva por ser una expresión homogénea a la anterior, pero ¡atención! no tienen ninguna otra similitud, ni física ni de otra índole.

127. No confundir estos vectores con los fasores o vectores giratorios de corrientes o tensiones. En este caso se trata simplemente de una representación compleja y no temporal.