

Capítulo I

La importancia del factor de potencia en las redes eléctricas

1.1 Introducción

Las fuentes de alimentación o generadores de voltaje son las encargadas de suministrar energía en las redes eléctricas. Estas son de suma importancia, ya que si no funcionan correctamente surge cierta inestabilidad en las cargas y los dispositivos electrónicos. La generación de voltaje por lo general es de corriente alterna (CA), a partir de estas fuentes se pueden obtener voltajes de corriente directa (CD) mediante un puente de diodos rectificadores. Posteriormente se pueden utilizar convertidores CD – CD con el objetivo de incrementar o disminuir el voltaje de CD. Un alternador automotriz es un generador sincrónico (generador de CA), el cual convierte la potencia mecánica en potencia eléctrica CA trifásica [1], donde los voltajes se encuentran desfasados 120° eléctricos entre si.

La rectificación de señales eléctricas puede ser monofásica o trifásica, siendo la última de éstas la más eficiente, debido a que maneja potencias mayores y presenta niveles bajos de rizo en las formas de onda del lado de CD con respecto a la primera. Esto da como resultado la utilización de un filtro más pequeño. En cualquier circuito rectificador, las corrientes de fuente presentan cierta distorsión, debido a que los diodos son dispositivos no lineales. Esto provoca la generación de componentes armónicos, los cuales son indeseables en cualquier red eléctrica. Estos pueden ocasionar la distorsión del voltaje de

línea, además de causar cierta excitación de resonancias eléctricas lo cual produce sobre voltajes, así como causar el malfuncionamiento de las cargas que se encuentran conectadas en la misma red [2].

La calidad de conversión de CA a CD se mide por ciertos parámetros de rendimiento. Dentro de estos parámetros se encuentra el factor de potencia (FP), el cual mide la relación de energía utilizada por las cargas eléctricas y la energía proporcionada por la fuente. El FP es una cifra adimensional y representa que tanto de la potencia entregada por la fuente es consumida por las cargas eléctricas. Un bajo FP indica que existen componentes armónicos en las corrientes de línea.

Una forma de incrementar el FP es por medio de circuitos correctores de factor de potencia (CFP), de esta manera se puede mejorar la relación que hay entre la potencia absorbida por las cargas y la potencia entregada por la fuente. Ya que el alternador es una fuente de CA trifásica, se requiere una topología capaz de corregir el factor de potencia en las tres fases simultáneamente, esto quiere decir que las corrientes estén en fase con sus respectivos voltajes y no presenten componentes armónicas.

1.2 Potencia eléctrica en circuitos de CA

La potencia eléctrica de un circuito se corresponde con el producto de los valores de la tensión existente en sus extremos multiplicado por la intensidad de la corriente que lo recorre. En un circuito de CA existen tres tipos de potencia: activa (P), reactiva (Q) y aparente (S). La potencia activa es la única transformable en trabajo mecánico, lumínico calorífico, químico, etc. Esta potencia es la que realmente se consume por las cargas, sus

unidades son watts (W). La potencia reactiva surge cuando existen cargas capacitivas o inductivas y se utiliza para formar campos eléctricos y magnéticos respectivamente. Esta potencia no produce trabajo útil, por lo tanto sus unidades son volt-amperes reactivos (VAR). La potencia aparente es la suma compleja de P y Q, esto es, es la suma de la energía que disipa dicho circuito en cierto tiempo en forma de calor o trabajo y la energía utilizada para la formación de los campos eléctricos y magnéticos de sus componentes [3].

1.2.1 El triángulo de potencias

El triángulo de potencias indica la relación que existe entre las potencias de circuitos de CA.

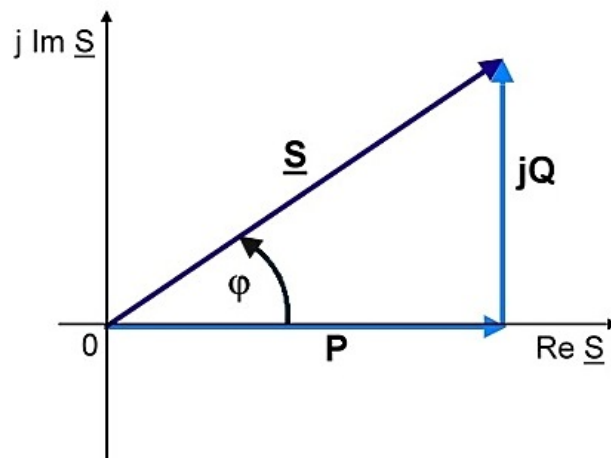


Figura 1.1 Triángulo de potencias eléctricas

Las relaciones se obtienen a partir del teorema de Pitágoras:

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{P^2 + Q^2} \\ \cos(\varphi) &= \frac{P}{S} \\ \sin(\varphi) &= \frac{Q}{S} \\ S &= V_{s_{rms}} I_{s_{rms}} \end{aligned} \tag{1.1}$$

Donde $I_{s_{rms}}$ y $V_{s_{rms}}$ son la corriente y voltaje eficaz (RMS) de la línea respectivamente.

1.3 El factor de potencia

La proporción que existe entre la potencia utilizada o activa y la potencia entregada por la fuente o aparente se le nombra factor de potencia. La potencia activa nunca es mayor que la aparente, lo cual quiere decir que cuando estas son similares, el FP es aproximadamente 1, esto significa que las cargas son resistivas, o bien, existen capacitancias e inductancias compensando el FP entre si. Cuando S es mayor a P, surge la potencia reactiva, esto es indeseable ya que el FP disminuye conforme aumenta Q debido a la reactancia de las cargas.

$$FP = \frac{P}{S} = \cos(\varphi) \quad (1.2)$$

Otra manera de representar el FP es mediante la proporción que existe entre la componente fundamental y la distorsión armónica que presenta la corriente de línea. Con ayuda de (1.1) y (1.2), se obtiene la siguiente ecuación.

$$FP = \frac{I_{s_1}}{I_{s_{rms}}} \cos(\varphi_1) \quad (1.3)$$

Donde I_{s_1} es la componente fundamental de corriente en la línea y φ_1 es el ángulo que indica que tanto está desplazada I_{s_1} con respecto al voltaje de entrada. La ecuación anterior indica que el FP disminuye conforme aumentan las componentes armónicas, esto genera cierta distorsión armónica en la corriente de línea. La corriente RMS de línea se puede expresar de la siguiente forma.

$$I_{s_{rms}} = \sqrt{I_{s_1}^2 + \sum_{h=2}^{\infty} I_{s_h}^2} \quad (1.4)$$

En un sistema trifásico, el factor de potencia también se obtiene de la siguiente forma:

$$FP = \frac{P}{3S} = \frac{V_{o_{rms}} I_{o_{rms}}}{3(V_{s_{rms}} I_{s_{rms}})} \quad (1.5)$$

Donde $I_{o_{rms}}$ y $V_{o_{rms}}$ son las corriente y voltaje de salida del rectificador. El factor de 3 indica la presencia de las tres fases.

1.3.1 Causas, beneficios y consecuencias del factor de potencia

Las principales causas de un factor de potencia bajo es debido a que existen cargas inductivas (motores eléctricos, transformadores) y capacitivas. Estas cargas requieren de potencia reactiva para su correcto funcionamiento. Al aumentar energía reactiva, aumenta la potencia aparente y el factor de potencia disminuye.

El principal beneficio de tener un buen factor de potencia en las redes eléctricas es que la mayoría de la potencia entregada es consumida por las cargas, por lo tanto es convertida en trabajo. De esta manera, las corrientes no son distorsionadas, por lo tanto la contaminación armónica en la red es mínima. Un factor de potencia bajo requiere más generación de energía, ya que parte de esta energía está formada por potencia reactiva, por lo tanto, los dispositivos encargados de transmitir energía eléctrica como transformadores tienen que ser más robustos. En muchos países, la empresa que se encarga de la distribución de la energía eléctrica cobra un impuesto a los usuarios si el factor de potencia no es mayor al 95% [4]. Otro beneficio de tener un buen FP es que no hay disipación de potencia en las redes de distribución de energía, por lo tanto no hay caídas de voltaje en la red ni sobrecalentamiento de cargas eléctricas.

Una de las principales consecuencias de tener un factor de potencia bajo radica en la generación de componentes armónicas, provocando un malfuncionamiento del equipo eléctrico conectado a la red, como es el caso de transformadores, interruptores y sistemas de telefonía. Además de esto, surge el sobrecalentamiento de cargas eléctricas, cortes de energía y el sobrecalentamiento del nodo neutral en las redes trifásicas. Otras consecuencias son las fluctuaciones de voltaje, ruido eléctrico y perturbaciones eléctricas como transitorios [5].

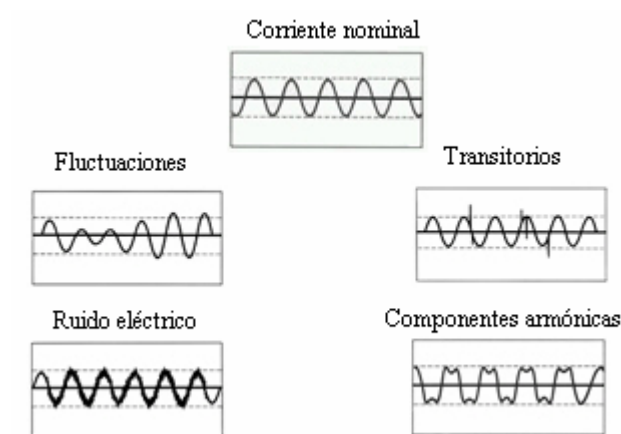


Figura 1.2 Tipos de distorsiones de corriente de línea

1.3.2 Componentes armónicas

La distorsión en la corriente de entrada produce bajos niveles de factor de potencia, generando ciertas componentes armónicas de orden superior a la fundamental. Mediante análisis de Fourier se puede analizar cuantas componentes existen, cual es la magnitud de estas y que tanto se desfasa la componente fundamental de corriente con respecto al voltaje de línea. Para analizar los parámetros anteriores se utiliza la serie de Fourier, la cual se basa en representar a cualquier señal periódica (intensidad de corriente) como la

suma infinita de senos y cosenos [6]. Dicha señal periódica $f(t)$ debe de cumplir con los siguientes requisitos:

1. La señal $f(t)$ debe ser periódica, esto es $f(t) = f(t + T)$ donde T es el periodo.
2. $f(t)$ debe de ser continua, tiene un número finito de máximos, mínimos y discontinuidades en un periodo.
3. La integral $\int_{t_0}^{t_0+T} |f(t)| dt$ existe.

Respetando estas condiciones, la señal $f(t)$ se representa de la siguiente manera:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(nw_0 t) + b_n \sin(nw_0 t)) \quad (1.6)$$

A esta forma de representar a cierta señal se le conoce como serie trigonométrica de Fourier, donde:

$$\begin{aligned} w_0 &= \frac{2\pi}{T} = 2\pi f_0 \\ a_0 &= \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \\ a_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(nw_0 t) dt \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(nw_0 t) dt \end{aligned} \quad (1.7)$$

Sustituyendo a la corriente de línea por $f(t)$, se obtienen sus componentes armónicas.

También se puede representar a una señal mediante la siguiente ecuación:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \cos(nw_0 t + \phi_n) \quad (1.8)$$

Donde la magnitud cada componente es $|f_n(t)| = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$. La fase es $\phi_n = \tan^{-1}(-b_n/a_n)$

De esta manera se puede saber que tan distorsionada se encuentra la corriente de línea. También es posible saber el factor de potencia del sistema.

1.4 Correctores de factor de potencia

Los correctores de factor de potencia (CFP) son circuitos utilizados para obtener un alto factor de potencia en las líneas de tensión de una red eléctrica. Esto trae como consecuencia una baja distorsión armónica de corriente, niveles bajos de interferencia electromagnética (EMI), alta eficiencia y mayor utilización de la potencia disponible, lo que es deseable en cualquier red eléctrica. Los CFP se clasifican en 2 tipos: pasivos y activos.

1.4.1 Correctores de factor de potencia pasivos

Un corrector de factor de potencia pasivo es aquel que únicamente utiliza componentes pasivos, como es el caso de inductores y capacitores. Para obtener un buen factor de potencia, es necesario que la potencia reactiva sea mínima. En la industria las cargas generalmente son inductivas, como es el caso de motores, bobinas y transformadores. Para contrarrestar estos efectos inductivos se utilizan bancos de capacitores. Estos bancos son arreglos de capacitores en paralelo [7] los cuales se conectan a la línea. Cuando las cargas son capacitivas tales como; baterías, condensadores o cables largos, se utilizan inductores para contrarrestar y corregir el factor de potencia. Esto se logra mediante la conexión de motores sincrónicos (inductor) a las líneas de tensión. La principal ventaja de éste método es que el motor regula la potencia reactiva entregada a la red mediante la excitación de su campo [7] y a la vez regula el factor de potencia. Este dispositivo se comporta como un capacitor variable. También se pueden hacer arreglos de motores, análogos a los bancos de

capacitores. Los métodos mencionados anteriormente, se les conocen por lo general como correctores de factor de potencia pasivos, ya que sólo utilizan componentes pasivos. Sin embargo estas técnicas utilizan componentes robustos y pesados, haciendo que la instalación y el mantenimiento se encarezcan.

1.4.2 Correctores de factor de potencia activos

Otra técnica más efectiva de corregir el FP es mediante los correctores de factor de potencia activos. Estos no utilizan componentes tan grandes como los pasivos lo que facilita la instalación en cualquier parte, incluso en la red eléctrica del automóvil. Se componen principalmente de transistores, diodos, *drivers*, microcontroladores, inductores y capacitores. Los principales CFP activos son los siguientes [8]:

- ✓ Reductores (*Buck*)
- ✓ Elevadores (*Boost*)
- ✓ Reductores – Elevadores (*Buck – Boost*)

Los CFP reductores obtienen un voltaje de salida menor que el de entrada, de la misma manera que los elevadores obtienen voltajes superiores a los de línea. Los reductores – elevadores pueden obtener voltajes mayores o menores que los de entrada, sin embargo la polaridad del voltaje de salida es inversa a la de entrada. Todos estos CFP pueden operar sin la necesidad de conectar transformadores. También pueden ser unidireccionales o bidireccionales, esto indica que la corriente puede fluir en un sentido o bien en el sentido contrario. La siguiente figura muestra la clasificación de los CFP más utilizados.

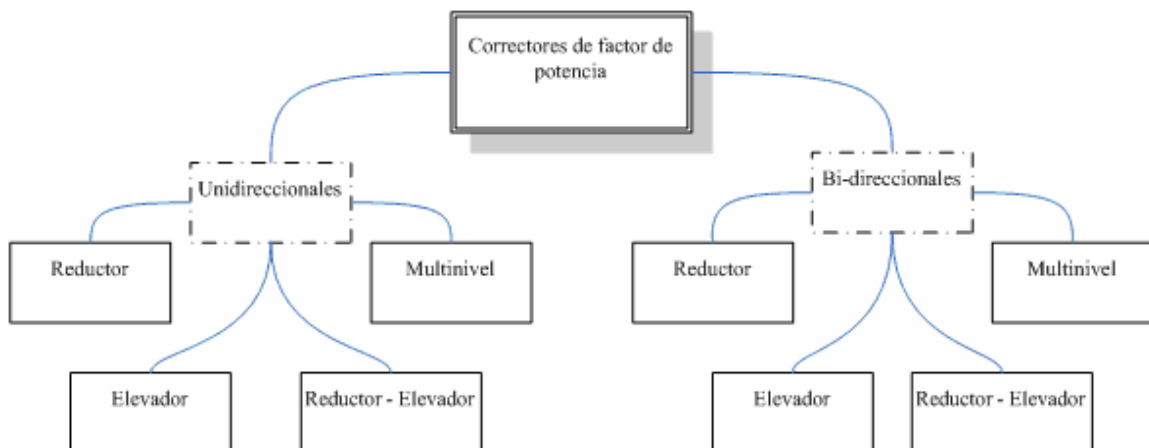


Figura 1.3 Clasificación de los CFP activos [8]

1.5 Conclusiones

La energía eléctrica es muy importante en la sociedad actual, ya que es la base para el funcionamiento de cualquier aparato electrónico. El no aprovecharla correctamente influye directamente en el malfuncionamiento de estos componentes, los cuales se comportan como cargas eléctricas. Debido a esto pueden llegar a sobrecalentarse, provocando que sean inservibles en un plazo de mediano tiempo. Para aprovechar al máximo la energía que proporcionan las compañías de electricidad, se requiere de un circuito que corrija el factor de potencia. De esta manera, las cargas eléctricas no se ven afectadas por los disturbios ocurridos en las líneas de tensión. Para esto se requiere el previo estudio de estos y qué topología es la más adecuada para cada caso.