

---

# 1. Introducción

Las empresas de transporte y distribución de energía eléctrica tuvieron que afrontar históricamente el problema que suponía el aumento de la energía reactiva que circulaba por sus líneas. La potencia reactiva ocasiona un aumento de las pérdidas en las líneas y limita la capacidad de transporte de energía útil disminuyendo, por tanto, la eficiencia de la red.

La medida adoptada por las compañías eléctricas, con el fin de optimizar la utilización de sus infraestructuras de red, fue penalizar en la facturación a los clientes cuyas instalaciones tuvieran un pobre factor de potencia. Por este motivo, en el diseño de redes eléctricas industriales, siempre se ha contemplado la necesidad de incorporar elementos para la compensación de la potencia reactiva.

La situación actual de las redes de distribución e industriales difiere notablemente de la que presentaban hace tan solo dos décadas. La razón principal es la presencia de perturbaciones generadas por las cargas no lineales que originan un alto nivel de contenido armónico en las formas de onda de las corrientes y tensiones de línea.

Por otra parte, la reciente liberalización del mercado eléctrico, está consolidando un sistema de generación distribuido, con una gran diversidad de plantas generadoras de energía (cogeneración, ciclo combinado, parques eólicos, fotovoltaica,..), que puede distorsionar las formas de onda de tensión.

En definitiva, la situación se aproxima más a la de un régimen no sinusoidal y, en consecuencia, el análisis de las redes eléctricas con el objeto de mejorar su eficiencia implica la introducción del concepto más general de potencia no activa, constituida por la potencia asociada a las perturbaciones además de la componente reactiva clásica. Esta potencia no activa es la potencia no útil que debe minimizarse para reducir las pérdidas.

La calidad de la energía en una red eléctrica viene determinada por sus propias limitaciones técnicas, por las perturbaciones debidas a las cargas, por la estructura de generación y por

fenómenos meteorológicos impredecibles. Un bajo nivel de calidad está asociado a una pérdida de eficiencia del sistema.

La mejora de la eficiencia supone la reducción de las componentes de potencia no activa. Para ello se dispone de diferentes alternativas siendo el filtrado activo de potencia una de las más eficientes y versátiles. La utilización de estos equipos compensadores mejora la calidad de la energía eléctrica, aumentando por tanto la fiabilidad y eficiencia de los sistemas eléctricos de potencia.

### 1.1. Mejora de la calidad de la energía eléctrica

Un bajo nivel de la calidad de la energía eléctrica puede resultar nocivo en los procesos productivos afectados, derivando en un elevado coste por paradas de producción y averías o mantenimiento de los equipos. Su relevancia ha hecho que el concepto de calidad de la energía eléctrica esté actualmente consolidado como un tópico en el ámbito de la ingeniería eléctrica.

La importancia que va adquiriendo, económica y socialmente, una buena calidad de la energía eléctrica se refleja en la amplia normativa existente a nivel nacional e internacional y a los proyectos de elaboración de nuevas normas en curso. La Unión Europea ha dictado diferentes Directivas sobre niveles de calidad de la energía eléctrica y, en nuestro país, la Ley del Sector Eléctrico introduce el concepto de calidad en ese mercado.

Las perturbaciones conducidas de baja frecuencia que pueden afectar a la calidad de la energía eléctrica son, según establece la normativa internacional: la variación de la magnitud o frecuencia fundamental de la tensión de red, la componente de continua, las fluctuaciones de voltaje y el efecto "flicker", los huecos y sobretensiones, las interrupciones de tensión, los transitorios de tensión, los desequilibrios entre fases, las tensiones y corrientes armónicas e interarmónicas, los cambios rápidos de tensión y la transmisión de señales sobre la onda de tensión.

Los armónicos de corriente debidos a las cargas no lineales son el tipo de perturbación con mayor incidencia en la calidad de la energía eléctrica. Conseguir que una carga eléctrica presente un consumo lineal o con muy bajos niveles de distorsión, puede lograrse teniendo en cuenta este factor en su fase de diseño. En otro caso, para cargas no lineales aisladas o agrupadas, debe de disponerse de equipos mitigadores en el punto de conexión que compensen las perturbaciones generadas.

La compensación de la potencia no activa se ha afrontado tradicionalmente mediante la instalación de dispositivos pasivos. En el caso de la potencia reactiva se emplean bancos de condensadores mientras que, para la reducción de la distorsión armónica, los dispositivos más frecuente-

mente instalados en las redes de distribución son los filtros pasivos. Normalmente, estos últimos son circuitos LC resonantes conectados en paralelo con la carga y sintonizados a la frecuencia del armónico dominante. Otros tipos de filtros pasivos pueden ser de bloqueo de armónicos, paso banda o paso bajo. En el diseño e instalación de estos filtros es preciso considerar la topología de la red para evitar la aparición de resonancias a otras frecuencias armónicas.

De forma general, los equipos diseñados para compensar la potencia no activa pueden agruparse en tres categorías : filtros pasivos, filtros activos de potencia y compensadores híbridos, que son una combinación de los anteriores. La elección para cada caso particular de uno de esos tipos depende de las condiciones técnicas y económicas que se consideren.

## 1.2. Filtrado activo de potencia

La función de un filtro activo de potencia paralelo consiste básicamente en la inyección en el punto de conexión de la carga de una componente no activa de compensación, además de una componente activa para contrarrestar las pérdidas en el filtro.

La estructura básica de un filtro de potencia activo consiste en un elemento pasivo, capaz de almacenar la energía asociada a la perturbación que se pretende compensar, un convertidor de potencia compuesto por dispositivos semiconductores que permiten gestionar el flujo de energía entre el elemento de almacenamiento y la red eléctrica mediante el control de su estado de conmutación, un elemento pasivo para el enlace del bloque de potencia al sistema formado por la red y la carga y el sistema de control del equipo compensador. La simplicidad de su estructura básica contrasta con la complejidad del sistema de control que debe emplearse, siendo éste el factor diferencial de las técnicas empleadas.

Entre las técnicas de control tradicionalmente propuestas destacan la basada en la teoría de la potencia instantánea (método  $pq$ ), en la transformación a un marco de referencia síncrono (SRF) y la que emplea la transformada discreta de Fourier (DFT).

El diseño de equipos de filtrado activo de potencia ha tenido un gran desarrollo en los últimos años, de forma paralela a la aparición de nuevos dispositivos semiconductores de potencia y a la implantación de nuevas tecnologías de procesado digital de señal. Estos avances permiten plantear la realización de nuevos métodos de control de este tipo de equipos de compensación.

### 1.3. Objetivo de la tesis

El objetivo fundamental de este trabajo de investigación es el diseño y desarrollo de un nuevo método de control de filtros activos de potencia paralelo para la compensación de corrientes no activas con la capacidad de operar eficientemente incluso con tensiones de red distorsionadas.

Las características fundamentales que presenta este nuevo controlador de filtros activos de potencia polifásicos son su capacidad de cancelación selectiva o global de las componentes no activas de la corriente de carga y su rápida respuesta dinámica.

Se evaluará en simulación la eficiencia en la compensación de los métodos de control convencionales en condiciones de distorsión de la tensión de red. Se analizará y evaluará en simulación la eficiencia de compensación del método propuesto comparando los resultados con los métodos previamente estudiados.

Sobre un prototipo experimental de filtro activo de potencia se validará el método propuesto al aplicar tensiones de red distorsionadas.

### 1.4. Estructura del documento

En este primer capítulo se ha plasmado, de forma sintética, una visión general de lo que constituye la calidad de la energía eléctrica y su relación con la eficiencia y fiabilidad de las redes eléctricas. Se establecen los criterios para una mejora de la eficiencia del sistema eléctrico mediante la utilización de equipos compensadores de potencia no activa. Finalmente, se ha descrito el objetivo de este trabajo.

En el próximo capítulo 2, se exponen las definiciones y relaciones entre tensiones, corrientes y potencias en sistemas eléctricos en régimen no sinusoidal desequilibrado desde el punto de vista de la compensación.

El estado del conocimiento de las técnicas de control aplicadas a filtros activos de potencia se presenta en el capítulo 3. Fundamentalmente se describen los métodos basados en la teoría pq, SRF, DFT.

En el capítulo 4 se establecen y realizan las pruebas de simulación para cada uno de los métodos de control cuando la tensión de la red presenta diferentes tipos de distorsión. Los resultados se analizan y evalúan teniendo en cuenta los criterios de eficiencia establecidos.

Una descripción detallada del nuevo método de control propuesto se realiza en el capítulo 5. También se incluyen los resultados de las pruebas de simulación al aplicar el método al control de

un FAP con señales de tensión distorsionadas.

Sobre un prototipo de laboratorio de FAP trifásico a tres hilos se ha evaluado el comportamiento del método de control propuesto. En el capítulo 6 se describe el prototipo desarrollado y los resultados de la pruebas que han permitido su validación.

Finalmente, en el capítulo 7 se exponen las conclusiones obtenidas en la realización de este trabajo.

