

Caso de Estudio:

Métodos de fabricantes para calcular Filtros Pasivos de Armónicas

Escrito por Luis Diego Madrigal Leiva.

Sinopsis

Este proyecto analiza métodos prácticos para el diseño de filtros pasivos de armónicos, usados para mitigar distorsiones causadas por cargas no lineales en sistemas eléctricos. Se toma como referencia un caso real aplicado a una red de distribución en Ecuador, con condiciones similares a las de instalaciones industriales en Centroamérica. La investigación detalla el proceso técnico para seleccionar y calcular un filtro pasivo adecuado, considerando normativas como IEEE 519 y resultados de reducción del THD. El objetivo es proponer una metodología replicable para mejorar la calidad de la energía eléctrica en entornos industriales locales [1, 2].

Teoría sobre los Filtros Pasivos

La calidad de la energía eléctrica es un aspecto fundamental para el funcionamiento eficiente y seguro de los sistemas eléctricos modernos. Uno de los problemas más comunes que afectan esta calidad es la distorsión armónica, causada por la presencia de cargas no lineales como variadores de frecuencia, rectificadores controlados, fuentes conmutadas, entre otros. [2].

Las armónicas son componentes de frecuencia con múltiplo entero de la frecuencia fundamental (50 o 60 Hz), que aparecen en la señal de corriente o tensión debido al comportamiento no lineal de ciertas cargas. La distorsión armónica se mide comúnmente a través del índice de distorsión total (THD, por sus siglas en inglés), el cual debe mantenerse dentro de los límites establecidos por normas como la IEEE 519-2022. [2].

Filtros Pasivos de Armónicas

Los filtros pasivos son una de las soluciones más empleadas para mitigar armónicos, debido a su bajo costo, simplicidad y efectividad cuando se diseñan adecuadamente. Estos filtros están compuestos principalmente por inductores (L), capacitores (C) y, en algunos casos, resistencias (R), formando circuitos resonantes sintonizados a una frecuencia armónica específica.

Existen diferentes tipos de filtros pasivos:

- **Filtros sintonizados en derivación:** diseñados para eliminar una armónica específica (por ejemplo, la 5ta), desviándose hacia tierra.
- **Filtros de banda ancha o de alta frecuencia:** usados para suprimir un rango amplio de armónicas superiores.

La frecuencia de sintonización de un filtro pasivo tipo LC se calcula con: [3]

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

donde:

- f_r : frecuencia de resonancia (Hz),
- L : inductancia del filtro (H),
- C : capacitancia del filtro (F).

Un diseño adecuado también debe considerar la impedancia de la red, la potencia del sistema, la selección del punto de conexión del filtro y los límites de distorsión permitidos.

Caso Real: Mitigación de Armónicos en una Red de Distribución con Filtros Pasivos

En el estudio desarrollado por Yugcha et al. [1], se analizó una red de distribución eléctrica en un entorno industrial con presencia de cargas no lineales. Estas cargas, como variadores de velocidad, rectificadores y fuentes conmutadas, generaban un alto contenido de distorsión armónica, especialmente en la corriente.

El análisis espectral del sistema reveló un **THD en corriente de hasta 13.3 %**, superando los límites permisibles de la norma IEEE 519-2022 [2]. Ante esta problemática, se evaluó la aplicación de filtros pasivos como soluciones para mitigar los armónicos.

El filtro pasivo fue diseñado para sintonizarse a la 5ta armónica, ya que esta era la componente dominante. El diseño consiste en una combinación serie de un capacitor y un inductor conectados en derivación al sistema. Este tipo de filtro permite desviar la corriente armónica específica hacia tierra, evitando que circule por el resto de la instalación.

Los resultados mostraron que la implementación del filtro pasivo permitió reducir el THD de corriente de 13.3 % a 6.27 %, mejorando significativamente la calidad de la energía eléctrica en el sistema.

Metodología para el diseño de un filtro pasivo

A partir de este caso, se puede estructurar una metodología general para diseñar y aplicar filtros pasivos de armónicas en entornos industriales:

1. Diagnóstico del sistema eléctrico:

- Medición de corrientes y tensiones.
- Cálculo del índice de distorsión armónica (THD).
- Identificación de las armónicas dominantes mediante análisis espectral.

2. Selección del tipo de filtro:

- Filtro pasivo sintonizado en derivación para armónicas específicas (5ta, 7ma). Se define el punto de conexión del filtro en el sistema.

3. Determinación de la frecuencia de sintonización:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

- Se selecciona f_r cercano a la frecuencia de la armónica dominante (por ejemplo, $f_r = 300 \text{ Hz}$ para la 5ta armónica en sistemas de 60 Hz).

4. Cálculo de la capacitancia C :

- Basado en la potencia reactiva que se desea compensar ($Q = V^2 \cdot \omega C$). Se selecciona un valor comercial estándar.

5. Cálculo de la inductancia L :

- A partir de la capacitancia y la frecuencia de sintonización usando:

$$L = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 C}$$

6. Verificación de resonancia con la red:

- Se asegura que la frecuencia de resonancia del filtro no coincida con la resonancia serie o paralelo del sistema.

7. Simulación del sistema con el filtro:

- Uso de herramientas como ETAP, MATLAB/Simulink o DIgSILENT PowerFactory.
- Verificación del comportamiento del filtro en condiciones reales.

8. Evaluación del resultado:

- Comparación del THD antes y después de la implementación.
- Validación del cumplimiento con IEEE 519.

Importancia del diseño adecuado

Un diseño correcto no solo reduce los armónicos, sino que también previene efectos colaterales como resonancias no deseadas, sobrecalentamientos o fallas en los condensadores. Además, permite que la planta opere con mayor eficiencia energética y cumpla con las normativas vigentes.

Esta metodología, validada en el caso ecuatoriano, es completamente aplicable en instalaciones industriales costarricenses y centroamericanas con condiciones similares.

Conclusiones

La distorsión armónica representa un problema recurrente en redes eléctricas con cargas no lineales, afectando la eficiencia, vida útil de los equipos y el cumplimiento normativo. En este proyecto se analizó el uso de filtros pasivos como solución técnica efectiva para mitigar este fenómeno.

A partir del caso real estudiado, se comprobó que los filtros pasivos sintonizados permiten reducir significativamente el THD de corriente cuando se diseñan correctamente, considerando tanto la frecuencia dominante como las condiciones eléctricas del sistema. La metodología desarrollada incluye el análisis espectral, el cálculo de componentes y la validación mediante simulación, lo que permite su aplicación en entornos industriales similares en Costa Rica y la región.

El diseño adecuado de filtros pasivos no solo mejora la calidad de la energía, sino que también contribuye a la protección de los equipos y al cumplimiento de normas como la IEEE 519. Además, su bajo costo relativo frente a otras tecnologías los convierte en una alternativa viable y eficiente para instalaciones que enfrentan problemas específicos de armónicas.

Referencias

- [1] W. Yugcha, D. Pichoasamin, and P. Astudillo, *Comparación y Optimización del Uso de Filtro Pasivo y Activo de Potencia para Mitigar Armónicos en Redes de Distribución con Cargas No Lineales*, Revista Técnica Energ'ia, 2024.
- [2] IEEE Standard 519-2022, *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2022.
- [3] Kazmierkowski, M. P., and Krishnan, R. (2002). *Harmonics in power systems and mitigation techniques*. IEEE Industrial Electronics Magazine, 56(3), 28–34.