



Evolution of the passive harmonic filters optimization problem in industrial power systems

Jandecy Cabral-Leite ^a, Ignacio Pérez-Abril ^b, Manoel Socorro Santos-Azevedo ^c, Maria Emilia de Lima-Tostes ^d & Ubiratan Holanda-Bezerra ^e

^a Instituto de Tecnología y Educación Galileo de la Amazonía, Manaus, Brasil. jandecycabral@hotmail.com

^b Centro de Estudios Electroenergéticos, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, Cuba. iperez@uclv.edu.cu

^c Universidad del Estados de Amazonas, Manaus, Brasil. manoelazevedo@yahoo.com.br

^d Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil. tostes@ufpa.br

^e Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil. bira@ufpa.br

Received: September 30th, 2013. Received in revised form: June 12th, 2014. Accepted: October 30th, 2014.

Abstract

Several authors have treated the optimization of passive filters in electric distribution systems. Optimization methods like: sequential quadratic programming (SQP), simulated annealing (SA), differential evolution (DE), artificial neural networks (ANN), particle swarm optimization (PSO), genetic algorithm (GA), etc., have been employed for optimizing certain configurations of passive filters. These optimization methods have been employed to solve several formulations of the problem of the project of filters. These formulations can be classified in: formulations of one or several objectives. The objective of the present work is to show the evolution of the formulation of this problem in the last years respect to the objective functions and constraints used. This analysis shows how the formulations employed have been upgraded from single-objective to multi-objective formulations to achieve a better representation of this complex problem.

Keywords: harmonics; passive filters; optimization.

Evolución del problema de optimización de los filtros pasivos de armónicos en sistemas eléctricos industriales

Resumen

Varios autores han tratado la optimización de filtros pasivos en sistemas eléctricos de distribución. Métodos de optimización como: programación cuadrática secuencial (SQP), simulación del recocido (SA), evolución diferencial (DE), redes neuronales (ANN), calentamiento de partículas (PSO), algoritmo genético (GA), etc., han sido empleados para la optimización de ciertas configuraciones de filtros pasivos. Estos métodos de optimización se han empleado para resolver múltiples formulaciones del problema de diseño de estos filtros. Estas formulaciones pueden clasificarse en: formulaciones de uno o de varios objetivos. El objetivo del presente trabajo es mostrar la evolución que ha tenido la formulación de este problema en los últimos años en cuanto a funciones objetivo y restricciones se refiere. Este análisis muestra como se ha transitado de formulaciones mono-objetivo a formulaciones multi-objetivo para lograr una mejor representación de este complejo problema.

Palabras clave: armónicos; filtros pasivos; optimización.

1. Introducción

Dugan [1] señala que los filtros pasivos de armónicos tipo paralelo son dispositivos cuya función es “cortocircuitar” las corrientes de armónico tan cerca como se pueda de la fuente de distorsión, es decir, de las cargas no lineales.

En la práctica es imposible “cortocircuitar” la corriente de

armónico I_h de la carga no-lineal y lo que se produce es una división de esta corriente en: la corriente por el filtro I_{fh} y la corriente por el sistema I_{sh} (Fig. 1).

Evidentemente, la acción del filtro será mejor en tanto reduzca más la corriente I_{sh} por el sistema, lo cual redundará en una reducción de la tensión de armónico V_h en el punto de conexión del filtro.

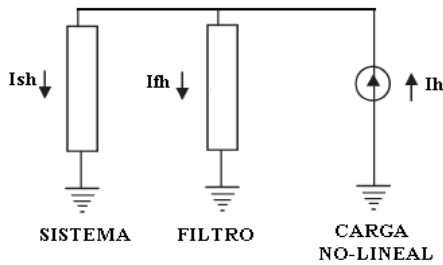


Figura 1. Acción del filtro.
Fuente: J. Arrillaga and N.R. Watson

Una metodología para evaluar la eficiencia de los filtros ha sido propuesta por Czarnecki y Ginn [2,3]. En la misma se “mide” dicha eficiencia como la reducción de la distorsión armónica total *THD* de la corriente y la tensión en el punto donde se conecta el filtro.

La eficiencia del filtro respecto a su función de reducción de la distorsión de corriente (ϵ_i) se calcula como:

$$\epsilon_i = \frac{THD(I_s^0) - THD(I_s)}{THD(I_s^0)} \quad (1)$$

Donde I_s^0 es la corriente por el sistema antes de la conexión del filtro e I_s es la corriente resultante después de su conexión.

Por otra parte, la eficiencia del filtro respecto a su función de reducción de la distorsión de tensión (ϵ_v) se calcula como:

$$\epsilon_v = \frac{THD(V^0) - THD(V)}{THD(V^0)} \quad (2)$$

Donde V^0 es la tensión en el punto de conexión del filtro antes de su instalación y V es la tensión en dicho punto resultante por la instalación del filtro.

Como los filtros sintonizados solo “eliminan” una frecuencia determinada, normalmente pueden formarse arreglos de filtros sintonizados que pueden incluir incluso filtros amortiguados.

En este caso se presenta el problema de cómo distribuir la potencia reactiva total del filtro entre las diferentes ramas del mismo. La solución tradicional para este problema [4] ha sido emplear capacitores iguales en las diferentes ramas, no obstante, como apuntan Czarnecki y Ginn [2-3], la distribución de la potencia reactiva entre las ramas influye decisivamente en la eficiencia del filtro, ya que las magnitudes de los diferentes armónicos a filtrar son diferentes.

Una particularidad importante de los filtros sintonizados [1] es que los mismos crean un pico de resonancia paralelo con la impedancia equivalente del sistema a una frecuencia inferior a su frecuencia de sintonía.

Este pico de resonancia debe quedar lejos de cualquier armónico significativo, por lo que los filtros comúnmente se sintonizan a una frecuencia ligeramente inferior a la frecuencia h que se quiere “eliminar” como margen de

seguridad en caso de que cambios en los parámetros de los filtros eleven la frecuencia del pico de resonancia hasta la frecuencia h .

Para evitar problemas con este pico de resonancia, Dugan [1] recomienda añadir los filtros comenzando por el armónico significativo de más bajo orden del sistema. Es decir, para instalar un filtro de séptimo armónico, debe existir también un filtro de quinto armónico.

Varias contribuciones se han dirigido a determinar la ubicación más apropiada de los filtros en el sistema eléctrico [5-6]. En general emplean indicadores de sensibilidad de la distorsión armónica a la conexión de filtros para desarrollar una estrategia para la ubicación de los mismos.

Como se sabe, el filtro limita la circulación de corrientes armónicas solo desde su localización hasta la fuente, aunque siempre va a mejorar la calidad de la tensión en todos los nodos. Además, se destaca [1] la importancia de escoger localizaciones en que la impedancia del sistema de suministro sea bastante estable.

Varios autores han tratado la optimización de filtros pasivos en sistemas eléctricos de distribución. Métodos de optimización como: programación cuadrática secuencial (SQP), simulación del recocido (SA), evolución diferencial (DE), redes neuronales (ANN), calentamiento de partículas (PSO), algoritmos genéticos (GA), etc., han sido empleados para la optimización de ciertas configuraciones de filtros pasivos.

Estos métodos de optimización se han empleado para resolver múltiples tipos de representaciones del problema de diseño de filtros, las que pueden clasificarse en: formulaciones de uno o de varios objetivos.

El objetivo del presente trabajo es mostrar la evolución que ha tenido este problema en los últimos años en cuanto a funciones objetivo y restricciones se refiere.

Este análisis muestra como se ha transitado de formulaciones mono-objetivo a formulaciones multi-objetivo para lograr una mejor representación de este complejo problema.

2. Formulaciones mono-objetivo

Las formulaciones mono-objetivo fundamentan la determinación de los parámetros del filtro o conjunto de filtros en la optimización de una función objetivo dada, sujeta a un conjunto de restricciones. Algunas de estas formulaciones se discuten seguidamente:

Haozhong Cheng et. al. [7] presentan en 1995 la determinación de un conjunto de filtros sintonizados bajo dos criterios diferentes: mínima potencia reactiva a la frecuencia fundamental Q_{s1} sujeto a un nivel máximo de distorsión total de la tensión $THDV$, o mínima distorsión total de la tensión sujeto a cumplir un nivel deseado de potencia reactiva a la frecuencia fundamental.

En 1998 Tien-Ting Chang y Hong-Chan Chang [8] formulan el problema de planificación de filtros pasivos sintonizados en sistemas eléctricos de distribución a partir de la minimización de una función de costo dada por f :

$$\min\{f = C_p + C_f\} \quad (3)$$

Donde C_P representa el costo anual de las pérdidas de energía considerando varios estados de carga del sistema y C_F el costo de los filtros sintonizados a instalar.

Evidentemente, para reunir en esta función el costo anual

de pérdidas con el costo de inversión de los filtros, este tiene que llevarse a unas bases anuales.

Como restricciones al problema, se considera limitar la tensión V en cada nodo a un intervalo permisible, así como la distorsión armónica total de tensión $THDV$ en cada nodo por debajo de un valor máximo preestablecido.

$$V_i(\min) \leq V_i \leq V_i(\max) \quad (4)$$

$$THDV_i \leq THDV(\max) \quad (5)$$

Se emplea el método DE para solucionar el problema que se plantea en variables discretas.

En 2001 Ying-Tung Hsiao [9] emplea el método de SA para optimizar la suma de los costos de inversión y el costo de instalación K_i de un conjunto de filtros sintonizados.

$$\min \left\{ f = Ki + \sum_h Kc_h Qc_h + Kl_h Ql_h \right\} \quad (6)$$

El costo de cada filtro se considera proporcional Kc_h, Kl_h a la potencia reactiva del capacitor Qc_h e inductor Ql_h .

Como restricciones al problema, se vuelven a incluir los límites (4) y (5) para la tensión y el $THDV$ en cada nodo, no obstante, se añaden otras dos condiciones límites adicionales: la primera a la distorsión total de la corriente $THDI$ en el punto de conexión común PCC, y la segunda a la potencia reactiva total de frecuencia fundamental de los filtros Q_{F1} .

$$THDI \leq THDI(\max) \quad (7)$$

$$Q_{F1}(\min) \leq Q_{F1} \leq Q_{F1}(\max) \quad (8)$$

En esta contribución no se consideran estados de carga u operación diferentes para el sistema eléctrico.

En 2003, I. Pérez y J. A. González [10] formulan el problema de maximizar el Valor Presente Neto VPN del proyecto de compensación que comprende el costo de las pérdidas de energía y el costo de inversión e instalación de los filtros.

Considerando un período de evaluación de N años con una razón de interés i , el VPN del proyecto de compensación de potencia reactiva se calcula como:

$$\max \left\{ f = VPN = -C_F + \sum_{k=1}^N (C_p^0 - C_p) / (1+i)^k \right\} \quad (9)$$

Como restricciones al problema, se utilizan los límites (4) y (5) para la tensión y el $THDV$ en cada nodo y en este caso se añade una condición adicional a la distorsión individual de la tensión $IHDV$ en cada nodo.

$$V_{i,h} / V_{i,1} \leq IHDV(\max) \quad (10)$$

En esta contribución se emplea el método de SQP con buenos resultados.

En 2005, Ahmed Faheem Zobaa [11] utiliza una función de costo semejante a la (6), pero trata la determinación de un solo filtro sintonizado para compensar una carga no-lineal y al mismo tiempo garantizar un factor de potencia superior al 90% mediante la restricción:

$$PF_1 \geq 0.9 \quad (11)$$

Un detalle interesante de este acercamiento es que emplea un conjunto de restricciones para evitar la resonancia de la impedancia equivalente del sistema Zeq_h para cualquier frecuencia armónica presente en el espectro de la carga no-lineal. Debido a la sencillez del circuito, este tipo de restricción puede expresarse evitando la aparición de una reactancia equivalente Xeq_h cero (condición de resonancia), es decir:

$$Xeq_h \neq 0 \quad (12)$$

Además, este autor introduce restricciones adicionales para evitar la sobrecarga del capacitor del filtro por sobretensión en valor eficaz Vc y en valor pico Vc_{pico} .

$$Vc \leq 1.1Vc_{nom} \quad (13)$$

$$Vc_{pico} \leq 1.1\sqrt{2} \cdot Vc_{nom} \quad (14)$$

El método de optimización empleado en este caso es el de Búsqueda de la Sección Dorada.

Este mismo autor publica en 2006 [12] una nueva versión de su programa que completa ahora las restricciones necesarias para evitar la sobrecarga del capacitor por corriente Ic y por potencia reactiva Qc de acuerdo a los límites de la IEEE Std. 18-1992 [13].

$$Ic \leq 1.8Ic_{nom} \quad (15)$$

$$Qc \leq 1.35Qc_{nom} \quad (16)$$

Su nueva función de costo a minimizar corresponde con el costo de pérdidas anuales más el costo de inversión del filtro actualizado a un año considerando N años de evaluación con una razón de interés i .

$$\min \left\{ f = C_p + \left(\frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \right) C_F \right\} \quad (17)$$

En 2006, Gary Chang, et. al. [14] presentan una formulación que utiliza hasta cuatro funciones objetivo alternativas que se optimizan mediante un algoritmo genético. Es decir, se escoge una de entre las siguientes cuatro funciones:

- 1) La suma cuadrática de la distorsión armónica total en todos los m nodos $THDV_m$.

$$\min \left\{ f = \sum_{m=1}^M (THDV_m)^2 \right\} \quad (18)$$

- 2) La suma cuadrática de los factores de influencia telefónica ITFm en los nodos.

$$\min \left\{ f = \sum_{m=1}^M (ITF_m)^2 \right\} \quad (19)$$

- 3) La suma de las pérdidas de potencia en la red para todos los armónicos superiores HPLh.

$$\min \left\{ f = \sum_{h=2}^H HPL^h \right\} \quad (20)$$

- 1) El costo de inversión en los filtros seleccionados mediante una función semejante a (6).

Esta contribución utiliza cuatro tipos de restricciones para el problema: los límites de $THDV$ (5), de distorsión individual (10), de tensión límite en el capacitor de cada filtro (13) y una restricción adicional para evitar la desintonización de los filtros.

Como los valores los componentes de los filtros pueden variar debido a tolerancias de fabricación o condiciones ambientales (-7% a +12% para las capacitancias y $\pm 3\%$ para las inductancias), se plantea que la reactancia X_L del filtro a frecuencia fundamental debe cumplir la desigualdad.

$$0.907 \frac{X_C}{h^2} \leq X_L \leq 1.156 \frac{X_C}{h^2} \quad (21)$$

Donde X_C es la reactancia del filtro a frecuencia fundamental y h su frecuencia de sintonía.

M. Ghiasi, V. Rashtchi y H. Hoseini [15] formulan el problema en 2005 como la minimización del costo total de los filtros sintonizados que se seleccionan y ubican en un circuito de distribución. En este sentido usa una función objetivo semejante a la (6).

Utiliza un Algoritmo Genético Simple, donde las restricciones de $THDV$ máximo (7) e $IHDV$ máximo (10) se incluyen mediante una función de penalidad.

En 2008, Zhang Ruihua, Liu Yuhong y Li Yaohua [16] tratan el proyecto de dos filtros sintonizados al quinto y séptimo armónicos y un filtro de segundo orden que generan una potencia reactiva especificada al sistema. Nuevamente la función objetivo es el costo de los filtros.

Como restricciones de utilizan las de máximo $THDV$ (7), $IHDV$ (10) y de máxima distorsión individual de la corriente IHD .

$$I_h / I_1 \leq IHD(\max) \quad (22)$$

Para la solución del problema se utiliza un Algoritmo Genético Simple.

En 2008, Alex-Sander, et. al. [17] tratan el problema de diseñar un filtro de mínima potencia reactiva compuesto por varias ramas sintonizadas.

En 2009, Gary W. Chang et al. [18] determinan un conjunto de filtros sintonizados por la minimización del costo de los mismos sujeto a las restricciones de calidad de la energía y estrés de los filtros. La parte distintiva de este trabajo consiste en el análisis probabilístico que se emplea para considerar las variaciones en las fuentes de armónicos y en la impedancia del sistema.

Ying-Yi Hong y Ching-Sheng Chiu [19] presentan en 2010 la minimización del costo de un conjunto de filtros sintonizados sujeto a las restricciones de distorsión máxima, estrés de los filtros y factor de potencia deseado. Esta contribución utiliza el método de "Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation".

En 2010, Ahmed Faheem Zobaa et. al. [20] tratan el problema de determinar las variaciones de los parámetros de un filtro sintonizado para adaptarse a variaciones dinámicas de la carga. La optimización se realiza para uno de dos criterios posibles: mínimas pérdidas en el sistema o máximo factor de potencia.

L. I. Kovernikova y Nguyen Chi Thanh [21] presentan en 2012 el cálculo de los parámetros de diferentes tipos de filtros para sistemas de alta tensión que cumplen una potencia reactiva especificada a la frecuencia fundamental.

Como función objetivo a minimizar seleccionan las pérdidas en los filtros, donde I_{Fh} y R_{Fh} son la corriente y resistencia del filtro al armónico h .

$$\min \left\{ f = P_F = \sum_h I_{Fh}^2 R_{Fh} \right\} \quad (23)$$

Como restricciones se plantea un rango válido para las tensiones armónicas con respecto a la tensión nominal en cada nodo.

$$V_h(\min) / V_{nom} \leq V_{i,h} / V_{nom} \leq V_h(\max) / V_{nom} \quad (24)$$

La optimización se realiza con la técnica de PSO.

En 2012, Shady et. al. [22] publican la optimización del un filtro tipo C para mínima distorsión de tensión $THDV$, sujeto a las restricciones de calidad, estrés del filtro y factor de potencia deseado. El objetivo es minimizar la distorsión de tensión en el nodo en que se conecta el filtro.

$$\min \{ f = THDV \} \quad (25)$$

V. Ravikumar Pandi et. al. [23] presentan en 2012 la optimización de filtros sintonizados y de segundo orden bajo el concepto de minimizar el máximo $THDV$ de todos los nodos del sistema.

$$\min \{ f = \max_k \{ THDV_k \} \} \quad (26)$$

Este trabajo emplea el método de PSO para resolver el problema.

En 2012, empleando el método de SA, M. Mustafa Ertay

et. al. [24] utilizan como función objetivo a minimizar la suma de las corrientes de armónicos en el PCC, es decir.

$$\min \left\{ f = \sum_h I_{S_h} \right\} \quad (27)$$

3. Formulaciones multi-objetivo

Ying-Pin Chang y Chi-Jui Wu [25] presentan en 2004 una formulación de optimización multi-objetivo para filtros de diverso tipo, que se basa en tres objetivos fundamentales a minimizar: la distorsión total de la demanda de corriente *TDD* en el punto común de conexión PCC, el *THDV* de las tensiones de los nodos del sistema y las pérdidas de los filtros P_F .

Estos tres objetivos se unen en una sola función a minimizar compuesta por:

$$\min \left\{ f = a \cdot TDD + \sum_i b \cdot THDV_i + c \cdot P_F \right\} \quad (28)$$

Donde las constantes a, b y c, que son suministradas por el usuario, determinan la importancia relativa de cada uno de los objetivos a minimizar.

Las restricciones consideradas incluyen las establecidas por la IEEE Std. 519-92 [26], es decir: las restricciones de máximo *THDV* (5) y de distorsión individual (10) de las tensiones, así como las restricciones de máxima *TDD* y máxima distorsión individual de la demanda de corriente en el PCC.

$$TDD \leq TDD(\max) \quad (29)$$

$$I_h / I_L \leq IDD_h(\max) \quad (30)$$

Donde I_L es la corriente máxima promedio de la instalación industrial.

Es interesante, que los límites de distorsión para las frecuencias inferiores a la de sintonía de los filtros se reducen a la tercera parte, para evitar el fenómeno de resonancia a estas frecuencias inferiores.

En 2005, Yin-Pin Chang et. al. [27] continúan la formulación anterior considerando un enfoque probabilístico para los escenarios de operación de la red y la desvalorización de los componentes de los filtros.

Yuan-Lin Chen [28] presenta en este mismo año un enfoque multiobjetivo basado en tres funciones independientes a minimizar: distorsión total de la corriente *THDI* en el PCC, máxima distorsión total de tensión *THDV* en el sistema y costo de los filtros sintonizados a emplear.

$$\begin{aligned} \min \{ f_1 = THDI \} \\ \min \{ f_2 = \max_k \{ THDV_k \} \} \\ \min \{ f_3 = C_F \} \end{aligned} \quad (31)$$

El problema se resuelve con un procedimiento basado en

técnicas “fuzzy” y el método SA.

Ying-Pin Chang et. al. [29] regresan al problema presentado en [25, 27] empleando Redes Neuronales Secuenciales y Arreglos Ortogonales para su solución.

Por su parte, Lina Huang et. al. [30], presentan una formulación semejante a la (30), con solo la sustitución de la función de máxima distorsión de tensión por la de potencia reactiva total a la fundamental que en este caso se maximiza, es decir:

$$\begin{aligned} \min \{ f_1 = THDI \} \\ \min \{ f_2 = C_F \} \\ \max \{ f_3 = Q_{F_1} \} \end{aligned} \quad (32)$$

Esta formulación se resuelve con ayuda del método de PSO.

Una formulación idéntica a (31) es considerada en 2008 y 2009 por Na He et. al. [31,32]. En la misma se optimizan filtros sintonizados y de segundo orden teniendo en cuenta casos pesimistas de desvalorización de las componentes de los filtros. Se utilizan restricciones especiales del tipo (12) para evitar resonancias en el sistema.

Chia-Nan Ko et. al. [33] regresan en 2009 a las formulaciones [25,27,29] con la modificación de añadir las pérdidas de los filtros al problema de la siguiente manera:

$$\min \left\{ f = \sum_{i=1}^n w_i \cdot THDV_i + w_{n+1} \cdot TDD + w_{n+2} \cdot P_F + w_{n+3} \cdot P_F \right\} \quad (33)$$

La solución se realiza por el método PSO con “Nonlinear Time-varying Evolution” (PSO-NTVE).

Adel M. Sharaf y Adel A. A. El-Gammal [34] plantean un método en 2009 que utilizando el método de “Discrete Particle Swarm Optimization (DPSCO)”, minimiza una función compuesta por varios objetivos: mínima corriente de distorsión I_{S_h} en el sistema, máxima corriente de armónicos I_{F_h} en el filtro, mínima tensión armónica V_h en el punto de conexión del filtro, todos con respecto a la corriente de armónico de la carga I_h , así como mínima relación cuadrática de la corriente del sistema con respecto a la del filtro.

$$\begin{aligned} \min \{ f = \alpha_1 (I_{S_h} / I_h) + \dots \\ \alpha_2 / (I_{F_h} / I_h) + \alpha_3 (V_h / I_h) + \alpha_4 (I_{S_h} / I_{F_h})^2 \} \end{aligned} \quad (34)$$

En otra contribución [35], estos autores utilizan el método “Discrete Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)” y reformulan el problema mediante las tres funciones objetivos siguientes:

$$\begin{aligned} \min \{ f_1 = I_{S_h} / I_h \} \\ \max \{ f_1 = I_{F_h} / I_h \} \\ \min \{ f_3 = V_h / I_h \} \end{aligned} \quad (35)$$

En 2010 y 2011, José M. Maza-Ortega et. al. [36,37]

publican un programa para diseño de filtros que puede emplear diferentes tipos de funciones objetivos, dentro de las que se encuentran: mínima corriente RMS en el sistema, mínimo THDI de dicha corriente, mínimo THDV, combinación lineal de THDI y THDV, costo de los filtros, etc. Se expresan rigurosamente un conjunto de restricciones para evitar resonancias del sistema con los filtros.

Vishal Verma y Bhim Singh [38] presentan una función objetivo compuesta para optimizar con SGA. Esta función incluye la minimización de: la corriente de armónicos I_{s_h} en el sistema, la corriente de frecuencia fundamental en el filtro (equivale a minimizar la admitancia del filtro a dicha frecuencia $1/Z_{F1}$) y la diferencia entre la potencia reactiva deseada a frecuencia fundamental Q_{S1} y la suma de potencia reactiva generada por cada filtro k , $Q_{F_{k,1}}$.

$$\min \left\{ f = \sqrt{\sum_h \left(I_{s_h} + \frac{\alpha}{Z_{F1}} + \beta \left(Q_{S1} - \sum_k Q_{F_{k,1}} \right)^2 \right)^2} \right\} \quad (36)$$

Otra función objetivo compuesta se presenta por Rachid Dehni y Slimane Sefiane en 2011 [39] para ser resuelta con “Ant Colony Optimization (ACO)”. La misma incluye el costo de los filtros sintonizados y el THDI de la corriente en el PCC.

$$\min \{ f = C_F + THDI \} \quad (37)$$

Sanjeev Singh y Bhim Singh [40] utilizan en 2011 un algoritmo basado en PSO para maximizar una función objetivo que comprende el promedio del factor de potencia FP_k y la reducción del $THDI_k$ para un conjunto de M estados de carga diferentes:

$$\max \left\{ f = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M (w_1 P_{F_k} + w_2 (1 - THDI_k)) \right\} \quad (38)$$

La optimización se realiza para filtros sintonizados y de segundo orden para convertidores de doce pulsos.

Hao Yue et. al. [41] presentan una aplicación del Algoritmo Genético por Ordenamiento No-dominado NSGA-II [42] al problema de los filtros de armónicos. La formulación utilizada incluye la minimización de: el costo de los filtros C_F y las pérdidas en la red ΔP .

$$\begin{aligned} \min \{ f_1 = C_F \} \\ \min \{ f_2 = \Delta P \} \end{aligned} \quad (39)$$

En 2012, Shengqing Li et. al. [43] aplican el método de “Multi-island PSO” para optimizar una formulación con cuatro objetivos diferentes: maximizar la potencia reactiva a la frecuencia fundamental, así como minimizar el $THDI$, el $THDV$ y el costo de los filtros.

$$\begin{aligned} \max \{ f_1 = Q_{F1} \} \\ \min \{ f_2 = THDI \} \\ \min \{ f_3 = THDV \} \\ \min \{ f_4 = C_F \} \end{aligned} \quad (40)$$

Finalmente, Junpeng Ji et. al. [44], presentan otra aplicación del método de PSO para resolver una formulación multiobjetivo compuesta por tres funciones a minimizar: el costo de los filtros, el negativo de la potencia reactiva a la fundamental (para maximizar esta) y una suma pesada de las distorsiones de tensión y corriente.

$$\begin{aligned} \min \{ f_1 = C_F \} \\ \min \{ f_2 = C - C_{F1} \} \\ \max \{ f_3 = \alpha_1 \cdot THDV + \alpha_2 \cdot THDI \} \end{aligned} \quad (41)$$

Donde C es una constante de alto valor para que f_2 siempre sea positiva.

4. Conclusiones

A partir del análisis realizado, pueden formularse las siguientes conclusiones:

1) La diferencia fundamental entre las formulaciones mono-objetivo y las de múltiples objetivos es que las primeras se dirigen generalmente a determinar los filtros de mínimo costo que garantizan el cumplimiento de las restricciones de distorsión pertinentes, mientras que las segundas agregan como objetivos la minimización de los índices de distorsión fundamentales.

2) Las formulaciones multi-objetivo son superiores a las primeras, ya que:

- El cumplimiento de las normas de calidad de la energía no implica la ausencia de problemas por este concepto. La situación ideal es la reducción a cero de la distorsión de tensión y corriente.
- La máxima eficiencia en las funciones de filtrado solo se consigue expresando dichas funciones dentro de los objetivos de la optimización.
- Una solución de igual o ligeramente inferior efectividad económica estimada puede tener un desempeño muy superior desde el punto de vista de la reducción de los índices de distorsión.

3) Varias formulaciones multi-objetivo utilizan un método de optimización no adaptado a este tipo de problemas. Las mismas emplean una única función objetivo compuesta por la suma ponderada de varios sub-objetivos, lo cual trae aparejado varios problemas:

- La solución que se obtiene es altamente dependiente de los pesos relativos de cada objetivo, los que se dejan a la selección del usuario.
- Los diferentes tipos de objetivos pueden tener distinto significado físico y magnitud.
- Se obtiene una única solución al problema.

4) Las formulaciones multi-objetivo que utilizan métodos desarrollados para este tipo de problemas, permiten la obtención de un conjunto de soluciones óptimas que constituyen la frontera de Pareto del problema. Una vez

obtenido este conjunto de soluciones, el usuario debe ejercer su criterio para seleccionar cual o cuales de estas soluciones son las mejores para el problema considerado.

Agradecimientos

A el Instituto de Tecnología Galileo de la Amazonía - ITEGAM, a la Fundación para la Investigación del Estado de Amazonas - FAPEAM por apoyar financieramente esta investigación.

Referencias

- [1] Dugan, R.C., McGranaghan, M.F., Santoso, S. and Beaty, H.W., *Electrical Power Systems Quality*, Second Edition 2004.
- [2] Czarnecki, L.S. and Ginn III, H.L., The effect of the design method on efficiency of resonant harmonic filters, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20 (1), pp.286-291, 2005.
- [3] Ginn III, H.L., Improvement of resonant harmonic filter effectiveness in the presence of distribution voltage distortion, PhD Dissertation Louisiana State University, USA, 2002.
- [4] Arrillaga, J. and Watson, N.R., *Power systems harmonic*, 2nd ed, New York Wiley, 2003.
- [5] Au, M.T. and Milanovic, J.V., Planning Approaches for the Strategic Placement of Passive Harmonic Filters in Radial Distribution Networks, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22 (1), pp.347-353, 2007.
- [6] Stone, P.E.C., et al., Efficient harmonic filter allocation in an industrial distribution system, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59 (2), pp. 740-751 2012. DOI: 10.1109/TIE.2011.2157279
- [7] Cheng H., et al., New method for both harmonic voltage and harmonic current suppression and power factor correction in industrial power systems, *Proceedings of the 1995 Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*, DOI: 10.1109/ICPS.1995.526986, IEEE 1995.
- [8] Chang, T.-T. and Chang, H-Ch, Application of differential evolution to passive shunt harmonic filter planning, international conference on harmonics and quality of power ICHQP '98, Athens, Greece, Oct. 1998. pp; 149-153, DOI: 10.1109/ICHQP.1998.759866
- [9] Hsiao, Y.-T., Design of filters for reducing harmonic distortion and correcting power factor in industrial distribution systems, *Tamkang Journal of Science and Engineering*, 4 (3), pp.193-199, 2001.
- [10] Pérez-Abril, I. and González-Quintero, J.A., VAR Compensation by sequential quadratic programming, *IEEE Transactions on Power Systems*, 18 (1), pp.36-41, 2003.
- [11] Zobaa, A.F., Cost-effective applications of power factor correction for nonlinear loads, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20 (1), pp.359-365, 2005. DOI: 10.1109/TPWRD.2003.817532
- [12] Zobaa, A.F., Maintaining a good power factor and saving money for industrial loads, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53 (2), pp. 710-711, 2006.
- [13] IEEE Std. 18-1992, IEEE Standard for shunt power capacitors, 1992.
- [14] Chang, G.W., Chu, S.-Y. and Wang, H.-L. A new method of passive harmonic filter planning for controlling voltage distortion in a power system, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 21 (1), pp.305-312, 2006.
- [15] Ghiasi, M., Rashtchi, V. and Hoseini, H., Optimum location and sizing of passive filters in distribution networks using genetic algorithm, *International Conference on Emerging Technologies IEEE-ICET 2008*, Rawalpindi, Pakistan, pp.18-19, 2008
- [16] Ruihua, Z., Yuhong, L. and Yaohua, L., Optimal parameters for filter using improved genetic algorithms. *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, SUPERGEN 2009*. pp. 1-5, 2009. DOI: 10.1109/SUPERGEN.2009.5348353
- [17] Luiz, A.-S.A. and Cardoso-Filho, B.J., Minimum reactive power filter design for high power converters, *13th International Power Electronics and Motion Control Conference. EPE-PEMC 2008*, pp. 1345-1352, 2008. DOI: 10.1109/EPEPEMC.2008.4635455.
- [18] Chang, G.W., Wang, H.-L., Chuang, G.S. and Chu, S.-Y., Passive harmonic filter planning in a power system with considering probabilistic constraints, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24 (1), pp. 208-218, 2009.
- [19] Hong, Y.-Y. and Chiu, Ch.-S.. Passive filter planning using simultaneous perturbation stochastic approximation, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25 (2), pp. 939-946, 2010.
- [20] Zobaa, A.F., Vaccaro, A., Zeineldin, H.H., Lecci, A. and Abdel-Monem, A.M., Sizing of passive filters in time-varying nonsinusoidal environments, pp. 1-8, IEEE 2010. DOI: 10.1109/ICHQP.2010.5625346
- [21] Kovernikova, L.I. and Thanh, N.Ch., An optimization approach to calculation of passive filter parameters based on particle swarm optimization, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREQP'12)*, Santiago de Compostela, Spain, 2012.
- [22] Aleem, S.H.E.A, Zobaa, A.F. and Aziz, M.M.A., Optimal C-type passive filter based on minimization of the voltage harmonic distortion for nonlinear loads, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59 (1), pp. 281-289, 2012.
- [23] Pandi, V.R., Zeineldin, H.H. and Xiao, W., Passive harmonic filter planning to overcome power quality issues in radial distribution systems, *IEEE Conference Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-6, IEEE 2012. DOI: 10.1109/PESGM.2012.6345247
- [24] Ertay, M.M., Tosun, S. and Zengin, A., Simulated annealing based passive power filter design for a medium voltage power system, *International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA) 2012*, pp. 1-5, 2012. DOI: 10.1109/INISTA.2012.6247042
- [25] Chang, Y.-P. and Wu, Ch.-J., Design of harmonic filters using combined feasible direction method and differential evolution, *International Conference on Power System Technology, POWERCON 2004*, Singapore, Vol. 1, pp. 812-817, 2004. DOI: 10.1109/ICPST.2004.1460105
- [26] IEEE Std. 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, 1993.
- [27] Chang, Y.-P., Tseng, W.-K. and Tsao, T.-F., Application of combined feasible-direction method and genetic algorithm to optimal planning of harmonic filters considering uncertainty conditions, *IEE Proc. Generation Transmission and Distribution*, 152 (5), pp. 729-736, 2005.
- [28] Chen, Y.-L., Optimal multi-objective single-tuned harmonic filter planning, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20 (2), pp. 1191-1197, 2005.
- [29] Chang, Y.-P., Low, Ch. and Wu, Ch.-J., Optimal design of discrete-value passive harmonic filters using sequential neural-network approximation and orthogonal array, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22 (3), pp. 1813-1821, 2007.
- [30] Huang, L., He, N. and Xu, D., Optimal design for passive power filters in hybrid power filter based on particle swarm optimization, *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, Jinan, China*, pp. 1468-1472, 2007. DOI: 10.1109/ICAL.2007.4338802
- [31] He, N., Huang, L., Wu, J., Xu, D., Study on optimal design method for Passive Power Filters set at high voltage bus considering many practical aspects, *Applied Power Electronics Conference and Exposition APEC 2008*, pp. 396-401, 2008. DOI: 10.1109/APEC.2008.4522752
- [32] He, N., Xu, D. and Huang, L., The application of particle swarm optimization to passive and hybrid active power filter design, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56 (8), pp. 2841-2851, 2009.
- [33] Ko, Ch.-N., Chang, Y.-P. and Wu, Ch.-J., A PSO method with nonlinear time-varying evolution for optimal design of harmonic filters, *IEEE Transactions on Power Systems*, 24 (1), pp. 437-444, 2009.
- [34] Sharaf, A.M. and El-Gammal, A.A.A., A discrete particle swarm optimization technique (DPSO) for power filter design, *4th International Design and Test Workshop (IDT)*, pp. 1-6. 2009. DOI: 10.1109/IDT.2009.5404376
- [35] Sharaf, A.M. and El-Gammal, A.A.A., A novel discrete multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) of optimal shunt

- power filter, IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, PSCE '09. pp. 1-7, 2009. DOI: 10.1109/PSCE.2009.4839957
- [36] Maza-Ortega, J.M. and Burgos-Payán, M., A Software-based tool for optimal design of passive tuned filters, IEEE International Symposium on Industrial Electronic, Bari, Italy, pp. 3273-3278, 2010.
- [37] Churio-Barboza, J.C., Maza-Ortega, J.M. and Burgos-Payán, M., Optimal design of passive tuned filters for time varying non-linear loads, IEEE Proceedings of the International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Torremolinos, Málaga, Spain. pp. 1-6, 2011. DOI: 10.1109/PowerEng.2011.6036491
- [38] Verma, V. and Singh, B., Genetic-Algorithm-based design of passive filters for offshore applications, IEEE Transactions on Industry Applications, 46 (4), pp. 1295-1303, 2010.
- [39] Dehini R. and Sefiane, S., Power quality and cost improvement by passive power filters synthesis using ant colony algorithm, Journal of Theoretical and Applied Information Technology 23 (2), pp. 70-79, 2011.
- [40] Singh S. and Singh, B., Passive filter design for a 12-pulse converter fed LCI-synchronous motor drive, Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) Power, India, pp. 1-8, 2010. DOI: 10.1109/PEDES.2010.5712371
- [41] Yue, H., Li, G., Zhou, M., Wang, K. and Wang, J., Multi-objective optimal power filter planning in distribution network based on fast nondominated sorting genetic Algorithms, 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), pp. 234-240, 2011. DOI: 10.1109/DRPT.2011.5993895
- [42] Frutos, M. and Tohmé, F., Evolutionary multi-objective scheduling procedures in non-standardized production processes, DYNA, 79 (172), pp. 101-107, 2003.
- [43] Li, S., Li, Y., Luo, X., Zeng, L. and He, Z., Multi-objective optimal design for passive power filters in hybrid power filter system based on multi-island particle swarm optimization, IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference - ECCE Asia, Harbin, China, Vol. 4, pp. 2859-2863, 2012. DOI: 10.1109/IPEMC.2012.6259320
- [44] Ji, J., Liu, H., Zeng, G. and Zhang, J., The Multi-objective optimization design of passive power filter based on PSO, Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), pp. 1-4, 2012. DOI: 10.1109/APPEEC.2012.6307477



J. Cabral-Leite, graduado en Matemática en la Universidad Federal de Rondônia (UNIR) en 1987 y en Ingeniería en Producciones Eléctricas del Centro de Educación Superior FUCAPI en 2006, MSc en Ing. Industrial y en Sistemas en la Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC) en 2001 y Dr. en Ing. Eléctrica de la Universidad Federal de Pará (UFPA) en 2013. Es Director Presidente e investigador del Instituto de

Tecnología y Educación Galileo de la Amazonía (ITEGAM), Brasil. Su área de interés incluye calidad de la energía, análisis, diseño y optimización de sistemas eléctricos de potencia.



I. Pérez-Abril, graduado en Ing. Eléctrica en 1984, en la Universidad Central de Las Villas, Cuba. Dr. en Ing. Eléctrica en 1995, de la Universidad Central de Las Villas, Cuba. Es director del Centro de Estudios Electroenergéticos y profesor de Sistemas Eléctricos Industriales de la Universidad Central de Las Villas, Cuba. Su área de interés incluye calidad de la energía y análisis, diseño y optimización de sistemas eléctricos

de potencia.



M.S. Santos-Azevedo, graduado en Procesamiento de Datos en 1999 y en Matemática en 1985 de la Universidad Federal de Amazonas, Brasil. MSc. en Ingeniería Eléctrica en 2006 de la Universidad Federal de Campina Grande, Brasil. Es profesor asistente de la Universidad del Estado de Amazonas (UEA), Brasil. Tiene experiencia en el área de Sistemas

Computacionales con énfasis en Modelos Analíticos y simulación de sistemas. Es coordinador de proyectos en ITEGAM.



M. E. de Lima-Tostes, graduada de Ing. Eléctrica en 1997 de la Universidad Federal de Pará (UFPA), Brasil. MSc. en Ing. Eléctrica en 1992 y Dra. en Ing. Eléctrica en 2003 por la Universidad Federal de Pará (UFPA), Brasil. Su área de interés es la calidad de la energía eléctrica en los sistemas eléctricos de potencia.



U. Holanda-Bezerra, graduado en Ing. Eléctrica en 1976 de la Universidad Federal de Pará (UFPA), Brasil. MSc. en Ing. Eléctrica en 1980 de la Universidad Federal Escuela de Itajubá (EFEI)-MG y Dr. en Ing. Eléctrica en 1988, de la Universidad Federal de Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), Brasil. Es profesor de la UFPA desde 1977. Actualmente es profesor en el área de Conversión de Energía. Su área de interés es Seguridad, Calidad de la Energía y Energía Renovable.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Eléctrica e Ingeniería de Control

Oferta de Posgrados

- **Maestría en Ingeniería - Ingeniería Eléctrica**

Mayor información:

Javier Gustavo Herrera Murcia
 Director de Área curricular
 ingelcontro_med@unal.edu.co
 (57-4) 425 52 64

