



Aportes a la optimización de la calidad de la energía en sistemas eléctricos de distribución primaria

ENTIDAD EJECUTORA PRINCIPAL: Centro de Estudios Electroenergéticos, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (CEE-UCLV)

Entidad ejecutora participante: Instituto de Educación y Tecnología Galileo, de la Amazonía (ITEGAM), Brasil

AUTORES PRINCIPALES: Dr. C. Ignacio Pérez Abril¹, Dr. Jandecy Cabral Leite², Dr. Manoel Socorro Santos Azevedo²

Filiación de los autores: ¹Centro de Estudios Electroenergéticos, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (CEE-UCLV), ²Instituto de Educación y Tecnología Galileo, de la Amazonía (ITEGAM), Brasil

Colaboradores: Dr. C. Carlos Alberto de León Benítez¹, Dra. Maria Emilia de Lima Tostes², Dr. Roberto Celio Limão de Oliveira², Dr. Adelson Bezerra de Medeiros², Dr. Ubiratan Holanda-Bezerra², Ing. Juan Ramón Ferrer Méndez³, Reiner Herrera Casanova³, Omar Álvarez Fleites³, Sergio Manuel Alcina Pupo³, Armando Nemesio Guelmes Rodríguez³, Lisdany Ciruta Jiménez³, Osniel López Ruiz³, Luis Daniel Martínez Claro³, Rafael Daniel Pérez Santos³

¹Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas; ²Instituto de Educación y Tecnología Galileo, de la Amazonía (ITEGAM), Brasil; ³Alumnos de posgrado y pregrado de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV)

Palabras clave

optimización; calidad de la energía; sistemas eléctricos; distribución primaria

RESUMEN

El objetivo de este trabajo ha sido desarrollar modelos, algoritmos y programas computacionales para la optimización de la calidad de la energía en sistemas eléctricos de distribución primaria. Los resultados alcanzados poseen un alto valor científico y aplicabilidad práctica en las redes eléctricas cubanas de distribución de media tensión. Estos resultados han sido obtenidos en las direcciones científico-técnicas: balance de fases en redes de distribución de media tensión; algoritmo de inclusión e intercambio de variables para la ubicación de capacitores, y compensación de la potencia reactiva y los armónicos con capacitores y filtros pasivos de armónicos. Todos estos problemas son coherentes con el incremento de la calidad de la energía en estas redes eléctricas, así como con el ahorro de energía en ellas. Los resultados obtenidos son modelos y métodos computacionales que poseen una alta novedad científica, avalada por la publicación de 7 artículos en revistas de la corriente principal de la ciencia y 6 artículos en revistas de reconocimiento internacional, así como la presentación de 7 trabajos en eventos internacionales de alto nivel en Cuba y el extranjero. Estos resultados poseen además un probado valor práctico, expresado en 9 premios, de ellos 3 CITMA y 3 del Fórum de Cien-

El objetivo de este trabajo ha sido desarrollar modelos, algoritmos y programas computacionales para la optimización de la calidad de la energía en sistemas eléctricos de distribución primaria. Los resultados alcanzados poseen un alto valor científico y aplicabilidad práctica en las redes eléctricas cubanas de distribución de media tensión. Estos resultados han sido obtenidos en las direcciones científico-técnicas:

- Balance de fases en redes de distribución de media tensión.
- Algoritmo de inclusión e intercambio de variables para la ubicación de capacitores.
- Compensación de la potencia reactiva y los armónicos con capacitores y filtros pasivos de armónicos.

Todos estos problemas son coherentes con el incremento de la calidad de la energía en estas redes eléctricas, así como con el ahorro de energía en las mismas.

Los resultados obtenidos poseen una alta novedad científica, avalada por la publicación de 7 artículos en revistas del grupo I (corriente principal de la ciencia) y 6 artículos en revistas del grupo II (referenciadas en bases de datos especializadas de reconocimiento internacional). Además, 7 trabajos vinculados a estos resultados han sido presentados en diferentes eventos internacionales de alto nivel en Cuba y el extranjero. Estos resultados han recibido 9 premios de diversa índole, de ellos 3 del CITMA y 3 del Fórum de Ciencia y Técnica a nivel provincial, además del premio al trabajo de mayor interés para la Unión Nacional Eléctrica (UNE) en el Fórum Nacional de Estudiantes de Ciencias Técnicas en 2017. El autor principal de esta propuesta obtuvo en el 2015 la Distinción Especial del Ministerio de Educación Superior por su destacada labor y sus resultados relevantes en el trabajo de ciencia y técnica en la educación superior. Se dispone de 5 avales de aplicación de varias de las metodologías presentadas de diferentes instancias de la UNE. En el marco de esta investigación han sido defendidos una tesis de maestría y 8 trabajos de diploma.

Balance de fases en redes de distribución de media tensión

Los sistemas de distribución de media tensión contienen múltiples asimetrías que son fuente del desequilibrio de las

corrientes de fase a través de toda la extensión de estos circuitos. Si existe un desequilibrio excesivo de las corrientes de fase en funcionamiento normal, la corriente de desequilibrio puede interpretarse como una corriente de falla a tierra por las protecciones correspondientes. Se pueden colocar varios interruptores en diferentes secciones del circuito, así como en las interconexiones entre diferentes circuitos. Por lo tanto, el desequilibrio máximo de corriente en cada uno de estos conmutadores debe minimizarse considerando todas las condiciones operativas que pueden cambiar la topología de red.

A partir de estas consideraciones, se ha definido el problema de balanceo de fases como la minimización de: 1) el desequilibrio máximo de corriente en puntos seleccionados del circuito para todas las posibles condiciones de funcionamiento; 2) las pérdidas en los conductores del alimentador primario, y 3) el número de reconexiones necesarias para alcanzar los dos objetivos anteriores. El desarrollo de la nueva metodología de balanceo fue publicado en la *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, revista del grupo I, y en *Ingeniería Energética*, revista del grupo 2.

El programa de optimización se complementa con una aplicación desarrollada para estimar las cargas del circuito a partir de las mediciones disponibles. La metodología de balanceo comprende: 1) el celaje detallado de los circuitos y la estimación de los gráficos de carga a partir de las mediciones disponibles en la subestación; 2) la determinación de las variantes de balanceo mediante el programa de optimización, y 3) la ejecución de la variante de balanceo seleccionada y la evaluación de sus resultados a partir de las mediciones.

La figura 1 muestra el excelente balance de las corrientes conseguido con la metodología presentada.

Algoritmo de inclusión e intercambio de variables para la ubicación de capacitores

Se desarrolla el algoritmo de inclusión e intercambio de variables para obtener los tamaños, la ubicación y el control en el tiempo de los bancos de capacitores que logran el máximo ahorro de costo total anual en un circuito de distribución. Este trabajo, que parte de conceptos y desarrollos obtenidos en la tesis doctoral del autor principal de esta propuesta se publicó en *Electric Power Systems Research (EPSR)*, revista de grupo I, donde se describen los principios y se demuestran las ventajas del método presentado.

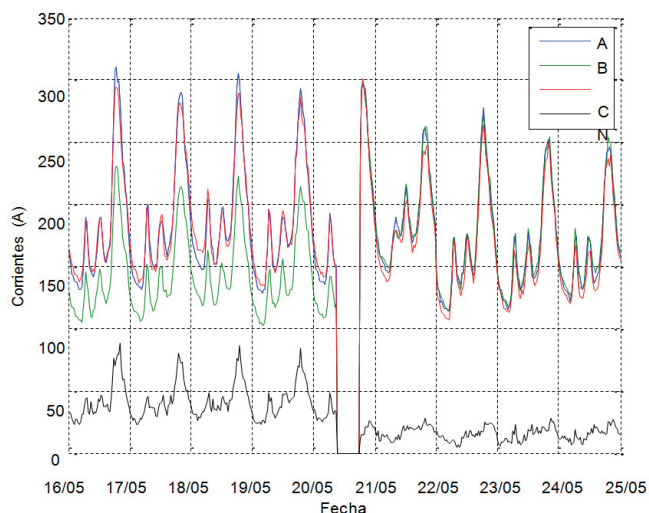


Fig. 1. Resultados del balanceo en las corrientes de fase y neutro.

Este nuevo método de búsqueda es totalmente original, mejora los resultados obtenidos en las contribuciones previas y se caracteriza por su eficiencia computacional. El método considera todas las posibles localizaciones para ubicar capacitores, así como la correcta interrelación entre los tamaños de los capacitores de tipo fijo y controlado. La única consideración hecha para desarrollar esta formulación es que todas las cargas del circuito siguen un mismo patrón de variación diaria. Se considera la interrelación entre los capacitores conectados en nodos diferentes y en distintos estados de carga. Además, la formulación permite incluir restricciones de máxima y mínima tensión. Así mismo, garantiza la obtención de soluciones factibles que cumplen las restricciones de tensión y se componen por unidades estándar de capacitores.

En lugar de ubicar los capacitores en nodos candidatos, seleccionados previamente por factores de sensibilidad, y entonces seleccionar su control, el método presentado examina la ubicación de los capacitores en todas las posiciones posibles (nodo, control), evaluando directamente los efectos de la inclusión y el intercambio de variables (capacitores) en el valor de la función objetivo.

El hecho de que la optimización de la ubicación y control de los capacitores se coordina con la selección de sus tamaños permite obtener soluciones de alta calidad para el problema de optimización.

El algoritmo desarrollado es extremadamente eficiente cuando resuelve el problema no restringido. Por otra parte, el tiempo de cálculo, cuando resuelve el problema restringido, es menor que el empleado por los métodos en uso. La efectividad del método presentado se comprueba mediante la optimización de varios ejemplos de la literatura y la comparación de las soluciones obtenidas con las publicadas por otros autores

para estos ejemplos. Para que se tenga una idea, se han determinado nuevas soluciones para 16 ejemplos publicados entre los años 2010 y 2016 que reducen considerablemente el tiempo de ejecución y mejoran la calidad de las respuestas (ahorro total alcanzado) con respecto a las soluciones obtenidas por los métodos utilizados en estas referencias.

Compensación de la potencia reactiva y los armónicos con capacitores y filtros pasivos de armónicos

Este trabajo unifica el problema de compensación de potencia reactiva con capacitores y el problema de compensación de armónicos con filtros pasivos en un único problema de optimización. Los resultados fundamentales se desarrollan en 5 publicaciones del grupo I: *EPSR, Electrical Engineering* (Springer-Verlag) y *Dyna*. En el método presentado se determina en conjunto de compensadores pasivos (capacitores o filtros sintonizados) de tipo fijo o controlado que logran el máximo ahorro anual de pérdidas y maximizan el incremento de la calidad de la energía en el circuito.

El ahorro anual se calcula como el valor presente equivalente del proyecto de compensación que considera de manera simultánea los beneficios de la compensación de la potencia reactiva y el costo de inversión en los compensadores. Los índices de calidad de la energía considerados son la magnitud de la tensión y los índices de distorsión armónica de tensión son definidos por la norma IEEE-519.

Mientras que varias contribuciones previas resuelven el problema multiobjetivo mediante la minimización de una función compuesta por varios subobjetivos, este trabajo emplea el algoritmo genético por ordenamiento no-dominado (NSGA-II) para optimizar varias funciones objetivos. Este método ha sido probado con ejemplos de la literatura.

Como se demuestra en este trabajo, la selección de las funciones objetivo a optimizar tiene un efecto notable en el número de soluciones factibles que se obtienen con la optimización. Por tanto, para obtener mejores resultados es conveniente introducir la maximización de la efectividad económica y, además, dos funciones adicionales que minimizar: máxima desviación de tensión y máxima distorsión de tensión.

En conclusión, los resultados obtenidos revelan la gran potencialidad de los métodos desarrollados para el incremento de la eficiencia y la calidad de la energía en las redes eléctricas de distribución. Estos aportes tienen una reconocida novedad científica por su publicación en revistas de alto impacto y han sido aplicados en la práctica o probados con ejemplos de la literatura en los cuales se han obtenido excelentes resultados.

Referencias bibliográficas

- Cabral Leite J, Pérez Abril I, *et al.* (2014). Evolution of the passive harmonic filters optimization problem in industrial power systems. *Dyna* 81.188: 21-28.
- Cabral Leite J, Pérez Abril I, *et al.* (2015). Otimização de filtros passivos de harmônicos em sistemas elétricos industriais. *Revista Sodebras*, 10(120): 58-64.
- Cabral Leite J, Pérez Abril I, *et al.* (2015). Otimização multiobjetivo de filtros harmônicos passivos para instalações industriais usando técnicas de NSGA-II. *Revista Sodebras* 10(114): 105-112.
- Cabral Leite J, Pérez Abril I, *et al.* (2016). Multi-objective optimization of passive filters in industrial power systems. *Electrical Engineering* 98.3. DOI 10.1007/s00202-016-0420-3.
- Cabral Leite J, Pérez Abril I, Santos Azevedo MS (2017). Capacitor and passive filter placement in distribution systems by nondominated sorting genetic algorithm-II. *Electric Power Systems Research*; 143: 482-489.
- Cabral Leite J, Santos Azevedo MS, Holanda Bezerra U, Pérez Abril I, de León Benítez CA (2016). Harmonic Propagation from the Low Voltage Four-Wire Delta Systems. *Journal of Power and Energy Engineering*, 4: 1-19.
- Manoel Socorro Santos Azevedo, Jandecy Cabral Leite, Ignacio Pérez Abril, *et al.* (2015). Localização de banco de capacitores em circuitos de distribuição considerando restrições de distorção harmônica. *Revista Sodebras*, 10(120): 46-51.
- Pérez Abril I. (2016). Multi-objective optimization of the balancing of phases in primary distribution circuits. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 82: 420-428.
- Pérez Abril I. (2016). Optimización multiobjetivo del balance de fases en circuitos de distribución primaria. *Ingeniería Energética* 37.2: 84-93.
- Pérez Abril I. (2017). Algorithm of inclusion and interchange of variables for capacitors placement. *Electric Power Systems Research*, 148:117-126.
- Pérez Abril I., Herrera Casanova R, Álvarez Fleites O (2017). Balanceo de Fases en Circuitos de Distribución de Santa Clara. *Ingeniería Energética* 38.3:188-197.
- Santos Azevedo MS, Pérez Abril I, Cabral Leite J, Bezerra de Meideiros A (2016). Capacitors placement by NSGA-II in distribution systems with non-linear loads. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 82: 281-287.
- Santos Azevedo MS, Pérez Abril I, *et al.* (2014). Multiobjective optimization of the reactive power compensation in electric distribution systems. *Dyna* 81.187: 175-183.

AUTOR PARA LA CORRESPONDENCIA

Dr. C. Ignacio Pérez Abril. Carretera a Camajuani, km 5½, 54830. Santa Clara, Villa Clara. Cuba. Correo electrónico: iperez@uclv.edu.cu