Métodos computacionales para el análisis y optimización de sistemas de suministro eléctrico en presencia de desbalance y armónicos

Autoría principal

Dr. Ignacio Pérez Abril¹.

Otros autores

Dr. José Ángel González Quintero¹, Dr. Davel Borges Vasconcellos².

Colaboradores

MSc. Michel Álvarez Cuellar, Ing. Juan Ramón Ferrer Méndez, Ing. Ovel Concepción Díaz, Ing. Ramón Bernal, MSc. Yandy Gallego Landera, Ing. Cindy Domínguez López, Dr. Jandecy Cabral Leite, Dr. Vicente León Martínez, Ing. Alfredo González Digón, Ing. Herschell Iglesias García, Ing. Luis Javier Morodo González*, Ing. José Manuel Santandreu Valdesuso*, Ing. Abdoulsalam Mohamed Osman*, Ing. Carlos González León*, Ing. Yunier Rafael González Morales*, Ing. Alexis Quintanilla Concepción*, Ing. Dorgi Monzón*, Ing. Alejandro Hernández Suárez del Villar*, Ing. Ángel Ernesto Marrero León*, Ing. Kemel Díaz Ramírez*, Ing. Lester Julio Marrero Rodríguez*, Ing. Alexander Plass Sigvold*, Ing. Julio César González*, Ing. Orlen Armas Arguelles*, Ing. José A. Pérez de Morales*, Ing. Carlos Daniel Urquijo*, Ing. Roberto Peñate*, Ing. Hamly Macias*, Ing. Michel García Abreu*, Ing. Orlando Borrego Carbonell*.

*Participaron siendo estudiantes de pregrado.

Entidad ejecutora principal

¹Centro de Estudios Electroenergéticos, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

Entidades participantes

²Universidad de Camagüey “Ignacio Agramonte y Loynaz”

Autor para correspondencia

Dr. Ignacio Pérez Abril
Universidad Central de Las Villas
Carretera a Camajuaní Km 5½
54830 Santa Clara, Villa Clara, Cuba
iperez@uclv.edu.cu

Aporte científico de cada autor al resultado

- ✓ Dr. **Ignacio Pérez Abril** (52%): Director general del grupo investigador. Participa en todas las líneas de trabajo y realiza las investigaciones sobre el balanceo de circuitos de distribución primaria y análisis de armónicos.
- ✓ Dr. **José Ángel González Quintero** (16%): Investigaciones sobre compensación de potencia reactiva en sistemas eléctricos contaminados por armónicos y reconfiguración de redes.
- ✓ Dr. **Davel Borges Vasconcellos** (16%): Investigaciones sobre compensación de potencia reactiva en sistemas eléctricos del sector terciario con baja penetración de armónicos.

Resumen

Antecedentes: No existen

Problema que se ha resuelto

El análisis y optimización de sistemas de suministro eléctrico en presencia de desbalance y armónicos, que comprende: la reconfiguración de redes eléctricas de distribución, el análisis de armónicos y la compensación de la potencia reactiva y los armónicos en sistemas de suministro eléctrico.

Resultados

Los resultados obtenidos son modelos y métodos computacionales que poseen una alta novedad científica, avalada por la publicación de 5 artículos en revistas de la corriente principal de la ciencia, 14 artículos en revistas de reconocimiento internacional y la presentación de 21 trabajos en eventos internacionales de alto nivel en Cuba y el extranjero. Estos resultados poseen además un probado valor práctico, expresado en 5 premios CITMA y dos del Fórum de Ciencia y Técnica, así como 9 avales de aplicación de estos trabajos en la Unión Nacional Eléctrica (UNE), el Despacho Nacional de Carga (DNC), dos empresas eléctricas provinciales, la empresa Electroquímica de Sagüa y la delegación del MINTUR en Camagüey. Estos resultados han estado vinculados a un Proyecto Ramal con el DNC y varios proyectos institucionales de la Universidad Central de Las Villas. En el marco de esta investigación han sido defendidas 2 tesis de doctorado y 2 de maestría, así como 19 trabajos de diploma.

Conclusiones

Los modelos y métodos desarrollados han sido probados con éxito en casos reales y son la base para nuevos desarrollos en el análisis y optimización de sistemas de suministro con perturbaciones de la calidad de la energía.

Comunicación Corta

Introducción

El objetivo de este trabajo ha sido desarrollar modelos, algoritmos y programas computacionales para el análisis y optimización de sistemas de suministro eléctrico en presencia de desbalance y armónicos. Los resultados alcanzados poseen un alto valor científico y una probada aplicación práctica en las redes eléctricas cubanas. Estos resultados han sido obtenidos en las siguientes direcciones científico-técnicas: reconfiguración de redes eléctricas de distribución, análisis de armónicos en redes de suministro eléctrico, y compensación de la potencia reactiva y los armónicos en sistemas de suministro eléctrico. Todas estas direcciones científicas son coherentes al tema central de este trabajo, lo que se demuestra en la estrecha interrelación entre los diferentes modelos y herramientas computacionales desarrolladas en el transcurso de la investigación.

Los resultados obtenidos en el campo de la reconfiguración de redes eléctricas de distribución se vincularon al desarrollo de algoritmos y programas para:

- Reconfiguración de redes de distribución mediante balance de fases.
- Reconfiguración de redes de distribución mediante intercambio de ramas.

En el análisis de armónicos en redes de suministro eléctrico, los resultados fundamentales se vincularon a:

- Nuevo modelo en coordenadas de fase del transformador monofásico con derivación central para el análisis de redes desbalanceadas a frecuencia fundamental y de armónicos.
- Modelos en coordenadas de fase y de secuencia para el análisis de redes de suministro eléctrico a frecuencia fundamental y de armónicos.

En el caso de la compensación de la potencia reactiva y los armónicos, se desarrollaron algoritmos y programas para:

- Compensación de la potencia reactiva y los armónicos en sistemas eléctricos industriales y del sector terciario.
- Compensación de la potencia reactiva y los armónicos en redes eléctricas de distribución.

Los resultados obtenidos poseen una alta novedad científica, avalada por la publicación de 5 artículos en revistas de Grupo I (corriente principal de la ciencia) y 14 artículos en revistas de Grupo II (referenciadas en bases de datos especializadas de reconocimiento internacional). Además, 21 trabajos vinculados a estos resultados se han presentado en diferentes eventos internacionales de alto nivel en Cuba y el extranjero. Estos resultados poseen además un probado valor práctico, expresado en 5 premios CITMA y dos del Fórum de Ciencia y Técnica a nivel provincial, así como 9 avales de aplicación de estos trabajos en la Unión Nacional Eléctrica (UNE), el Despacho Nacional de Carga, dos empresas eléctricas provinciales, la Empresa Electroquímica de Sagüa y la delegación del MINTUR en Camagüey. Estos resultados han estado vinculados a un Proyecto Ramal con el Despacho Nacional de Carga de la UNE y varios proyectos institucionales de la Universidad Central de Las Villas. En el marco de esta investigación han sido defendidas 2 tesis de doctorado y 2 de maestría, así como 19 trabajos de diploma.

NOTA: Todas las referencias que se van a realizar en el texto de esta comunicación corresponden a avales de introducción (5.1-5.9) y a la producción científica original de los autores (6.1-6.64) que se encuentran contenidas en las secciones 5 y 6 de esta propuesta de premio.

Reconfiguración de redes eléctricas de distribución

La reconfiguración de redes eléctricas de distribución persigue la obtención de ventajas técnicas y económicas con la modificación de la configuración original de las redes analizadas. Los circuitos de distribución primaria en Cuba son desbalanceados por el empleo de ramales bifásicos y monofásicos, así como por el uso bancos asimétricos de transformadores o de transformadores monofásicos de distribución. Por otra parte, la práctica de explotación de estas redes y el continuo incremento de la carga, provocan la adición de nuevos bancos de transformadores o la modificación de los ya existentes, lo que muchas veces se hace sin atender a consideraciones de balance en el circuito.

El desbalance de las corrientes de fase produce un incremento de las pérdidas de energía en los conductores, mientras que una elevada corriente de desbalance en operación normal dificulta la detección de las fallas a tierra por las protecciones correspondientes. Los trabajos sobre balance de fases se dedican a determinar las mínimas operaciones de reconexión necesarias de los bancos de transformadores y los ramales bifásicos y monofásicos que minimicen el desbalance de las corrientes y las pérdidas de energía en el circuito. Es importante destacar que el balance de fases en los circuitos de distribución es un proceder obligatorio para mantener un comportamiento óptimo de estas redes. Además, las operaciones de reconexión necesarias no requieren prácticamente recursos para su realización, lo que hace muy atractivo este proceder. Una sucesión de contribuciones han mostrado el desarrollo logrado en este tema. Inicialmente [6.16, 6.35] se utilizó un Algoritmo Genético Simple (SGA) que posteriormente se modificó [6.14, 6.31, 6.34] para lograr un Algoritmo Cíclico con el uso de SGA que se ha aplicado con éxito a múltiples casos reales de la práctica [5.3-5.4, 5.6-5.7] con un ahorro anual de 306 MWh en solo dos circuitos [5.3]. Este método fue publicado en la revista "IEEE Latin America Transactions" [6.5]. El referido algoritmo cíclico se adaptó al uso del método de optimización multiobjetivo Algoritmo Genético por Ordenamiento No-dominado (NSGA-II) [6.22] y se aplicó exitosamente a circuitos reales [5.6]. Finalmente se logró una modelación revolucionaria del problema que evita el uso del algoritmo cíclico y logra una implementación del NSGA-II [6.21] suficientemente novedosa para publicarse en la revista "Electric Power System Research" [6.2]. Otros resultados en el tema de reconfiguración se deben a trabajos encaminados a modificar la estructura original de uno o varios circuitos de distribución de forma tal que se minimicen las pérdidas de potencia del sistema satisfaciendo las restricciones de operación, para lo cual se han desarrollado diferentes algoritmos de optimización con buenos resultados [6.8, 6.23, 6.27].

Análisis de armónicos en redes de suministro eléctrico

El análisis de armónicos comprende la modelación de las redes eléctricas para estudios de generación y propagación de armónicos. Este tipo de análisis es imprescindible cuando hay redes que suministran cargas no-lineales como hornos de arco-eléctrico, convertidores electrónicos, etc. Por otra parte, siempre que se pretenden instalar bancos de capacitores en un circuito deben realizarse los análisis de armónicos correspondientes para evitar resonancias y lograr el cumplimiento de las normas de calidad de la energía sobre distorsión armónica. Los primeros resultados obtenidos en este tema se deben a trabajos sobre el modelo de cargas no-lineales [6.19], el desarrollo de un programa de Penetración de Armónicos para sistemas balanceados [6.18] y un Programa de Barrido de Frecuencia que se empleó exitosamente para determinar los nodos y las máquinas del Sistema Electroenergético Nacional (SEN) que potencialmente serían más afectados por la inyección de armónicos desde los hornos de arco eléctrico de "Antillana de Acero" o de "Acinox las Tunas" [5.8]. Considerando la presencia de desbalances estructurales en las redes eléctricas de distribución,

industriales y de servicio, se desarrollaron nuevas formulaciones en coordenadas de fase para los programas de Flujo de Potencia a Frecuencia Fundamental [6.36], así como de Penetración de Armónicos y Barrido de Frecuencia [6.4, 6.9, 6.29] que tienen como aspecto distintivo la posibilidad de representar bancos de transformadores monofásicos de tres o dos transformadores, así como otros tipos de asimetrías presentes en las redes. Precisamente, el desarrollo de un nuevo modelo [6.7, 6.28] para el transformador monofásico con derivación central (existente en los circuitos de distribución cubanos), que elimina imprecisiones del modelo previamente publicado internacionalmente, permitió la obtención de sendas publicaciones en las revistas "IEEE Latin America Transactions" [6.3] y "Electric Power Systems Research"[6.4].

Compensación de la potencia reactiva y los armónicos en redes de suministro eléctrico

La compensación de potencia reactiva persigue objetivos técnicos y económicos en los sistemas de suministro eléctrico. La liberación de capacidad eléctrica en los circuitos, la reducción de las pérdidas de energía y la reducción de las caídas de tensión son beneficios que se obtienen con la instalación de bancos de capacitores. A esto se unen los grandes beneficios económicos por mejorar el factor de potencia en los consumidores industriales o de servicio que incluyen una cláusula de factor de potencia en su tarifa eléctrica. Sin embargo, en las condiciones actuales de los circuitos, donde se utilizan cada vez más cargas con comportamiento no-lineal, hay que considerar la distorsión producida por los armónicos de estas cargas y la posible aparición de resonancias entre los elementos inductivos del sistema y los bancos de capacitores existentes. De esta manera, en un circuito contaminado por armónicos, la variante más económica de localización y selección de capacitores considerando solo los resultados a frecuencia fundamental, puede incrementar los índices de distorsión y por lo tanto ser inviable desde el punto de vista de calidad de la energía. Otros medios compensadores de la potencia reactiva más adecuados para circuitos contaminados por armónicos son los filtros pasivos de armónicos, los cuales unen a su acción de filtrado la función de inyección de potencia reactiva a las redes. Uno de los resultados iniciales en este tema fueron los trabajos dedicados a la compensación de la potencia reactiva en sistemas contaminados por armónicos mediante filtros pasivos sintonizados utilizando el método de Programación Cuadrática Secuencial [6.20, 6.37-6.40], lo que se concretó en una Tesis Doctoral [6.43] y posteriormente en una publicación en la revista "IEEE Transactions on Power Systems" [6.6]. La solución mediante filtro de armónico para compensar la potencia reactiva en la empresa Electroquímica de Sagua fue una aplicación de esta metodología [6.17, 6.41] cuyos resultados se avalan en [5.1-5.2]. Otros trabajos se dirigieron a evaluar la influencia del desbalance en la optimización de la compensación de la potencia reactiva mediante bancos de capacitores en sistemas de suministro eléctrico con baja penetración armónica empleando algoritmos genéticos [6.11-6.13, 6.26, 6.32], trabajo que se concretó en una Tesis Doctoral [6.42], un registro de software [5.1], y que cuenta con un aval de aplicación de la Delegación del MINTUR en Camagüey [5.5] donde se destaca un ahorro anual de 293.4 MWh y 41045 CUC en solo dos Hoteles de dicha provincia. Tras el desarrollo de herramientas computacionales para el análisis de armónicos en coordenadas de fase, de una metodología propia para el cálculo de parámetros de filtros pasivos de armónicos [6.10]

y el análisis de la evolución del problema de la optimización del filtrado de armónicos en sistemas de suministro eléctrico, se hizo posible el desarrollo de una nueva formulación multiobjetivo del problema de la compensación de la potencia reactiva y los armónicos en sistemas de suministro eléctrico mediante el empleo de bancos de capacitores y/o filtros pasivos de armónicos sintonizados y de segundo orden. Esta nueva formulación se optimiza con el algoritmo NSGA-II y puede emplearse para sistemas eléctricos de distribución, industriales [6.24, 6.25] y del sector terciario. Gracias a las ventajas de este método de optimización, se logran cumplimentar las restricciones pertinentes de calidad de la energía, así como las restricciones de estrés máximo de los capacitores empleados. Una aplicación actual de las herramientas de diseño de filtros se ha realizado para evaluar nuevas variantes de compensación ante la reconversión tecnológica de la Empresa Electroquímica de Sagüa [5.9] con buenos resultados.

Conclusiones

Los resultados obtenidos, revelan la gran potencialidad de los métodos desarrollados para el análisis y optimización de sistemas de suministro eléctrico en presencia de perturbaciones de la calidad de la energía como el desbalance y los armónicos. Los problemas que se resuelven están interrelacionados tanto en su campo de aplicación, como en los métodos computacionales empleados para su solución. Estos aportes tienen una reconocida novedad científica por su publicación en revistas de alto impacto y han sido aplicados en la práctica con buenos resultados. Nuevos desarrollos de los métodos expuestos se están implementando para analizar el balance de fases de redes de distribución reconfigurables, así como de nuevas formulaciones de optimización que empleen compensadores controlados de potencia reactiva y armónicos.

Referencias

- [1] Y.-Y. Hong, S.-Y. Ho, "Genetic algorithm based network reconfiguration for loss minimization in distribution systems", IEEE Power Engineering Society General Meeting 2003, Vol. 1, pp. 490, July 2003.
- [2] J.-P. Chiou, C.-F. Chang, C.-T. Su, "Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, Issue 2, pp. 668-674, May 2005.
- [3] H. Mori, Y. Ogita, "A parallel tabu search based method for reconfigurations of distribution systems", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 2000, Vol. 1, pp. 73-78, 2000.
- [4] C.-T. Su, C.-F. Changand, J.-P. Chiou, "Distribution network reconfiguration for loss reduction by ant colony search algorithm", EPRI, Vol. 75, Issue 2-3, pp. 190-199, August 2005.
- [5] M. Siti, DV. Nicolae, AA. Jimoh, A. Ukil. "Reconfiguration and Load Balancing in the LV and MV Distribution Networks for Optimal Performance", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, Issue 4, pp. 2534-2540, 2007.
- [6] R. F. Chang, CN. Lu. "Feeder Reconfiguration for Load Factor Improvement", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 2, Issue 1, pp. 980-984, 2002.
- [7] A. Delbem, A. de Carvalho, NG. Bretas, "Main Chain Representation for Evolutionary Algorithms Applied to Distribution System Reconfiguration", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, Issue 1, pp. 425-436, 2005.

- [8] Z. Jinxiang, MY. Chow, Z. Chang, "Phase Balancing using Mixed Integer Linear Programming", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, Issue 4, pp. 1487-1492, Transactions on Power Systems, Vol. 14, Issue 4, pp. 1508-1513, 1999.
- [9] T.-H. Chen, J.-T. Cherng, "Optimal phase arrangement of distribution transformers connected to a primary feeder for system unbalance improvement and loss reduction using a genetic algorithm", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, Issue 3, pp. 994-1000, August 2000.
- [10] C.-H. Lin, C.-S. Chen, H.-J. Chuang, C.-Y. Ho, "Heuristic Rule-Based Phase Balancing of Distribution Systems by Considering Customer Load Patterns", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, Issue 2, pp. 709-716, May 2005.
- [11] C-H. Lin, C-S. Chen, H-J. Chuang, M-Y. Huang, C-W Huang, "An Expert System for Three-Phase Balancing of Distribution Feeders", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, Issue 3, pp. 1488-1496, 2008.
- [12] A. Ruiz, J. C. Galviz, R. Gallego, "Solution to the phase balancing problem and the primary feeders reconfiguration by three phase modeling using simulated annealing", Scientia et Technica, Vol. 12, Issue 30, pp. 1-6, 2006.
- [13] C.H. Lin, C.S. Chen, M.Y. Huang, H.J. Chuang, M.S. Kang, C.Y. Ho and C.W. Huang, "Optimal Phase Arrangement of Distribution Feeders Using Immune Algorithm", 14th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, ISAP 2007, November 4 - 8, 2007, Kaohsiung, Taiwan.
- [14] M. Y. Huang, C. S. Chen, C. H. Lin, M. S. Kang, H. J. Chuang, C. W. Huang, "Three-Phase Balancing of Distribution Feeders using Immune Algorithm". IET Generation, Transmission and Distribution, Vol. 2, Issue 3, pp. 383-392, 2008.
- [15] N. Gupta, A. Swarnkar, K. R. Niazi, "A novel strategy for phase balancing in three-phase four-wire distribution systems", IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego (CA), pp. 1-7, 2011.
- [16] R. A. Hooshmad, S. Soltani, "Fuzzy Optimal Phase Balancing of Radial and Meshed Distribution Networks Using BF-PSO Algorithm", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 27, Issue 1, pp. 47-57, 2012.
- [17] Ignacio Pérez Abril, "Genetic Algorithm for the Load Balance on Primary Distribution Circuits", IEEE Latin América Transactions, Vol. 8, Issue 5, Sept. 2010.
- [18] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan, "A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II", IEEE Trans. on Evolutionary Computation, Vol.6, Issue 2, pp 182 – 197, 2002.
- [19] Aravind Seshadri, "NSGA-II source code" available in <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/10429-nsga-ii-a-multi-objective-optimization-algorithm/content/NSGA-II/>

Publicaciones

Publicaciones en revistas de grupo I (Referenciadas en la corriente principal de la ciencia)

- ✓ Ignacio Pérez Abril, "NSGA-II phase balancing of primary distribution circuits by the reconnection of their circuit laterals and distribution transformers", Electric Power Systems Research, Vol 109, 2014, p.1-7. Referenciada por: SciVerse ScienceDirect (Elsevier).
- ✓ Ignacio Pérez Abril, "Correction to the phase-coordinate model of the single-phase transformer with mid-tap on the secondary side", IEEE Latin América Transactions, Vol. 11, Nro. 2, Marzo 2013, pp. 737-742. Referenciada por: <http://science.thomsonreuters.com>, <http://ieeexplore.ieee.org/>.
- ✓ Jandecy Cabral Leite, Ignacio Pérez Abril, Maria Emília de Lima Tostes, Roberto Célio Limão de Oliveira, "Frequency scan on a phase-coordinates frame for unbalanced systems",

Electric Power Systems Research, Vol 93, 2012, pp.113-119. Referenciada por: SciVerse ScienceDirect (Elsevier).

- ✓ Ignacio Pérez Abril, "Genetic algorithm for the load balance on primary distribution circuits", IEEE Latin America Transactions, Vol. 8, Nro. 5, Sept. 2010. Referenciada por: <http://science.thomsonreuters.com>, <http://ieeexplore.ieee.org/>.
- ✓ Ignacio Pérez Abril, José A. González Quintero, "VAR Compensation by Sequential Quadratic Programming", IEEE Transactions on Power Systems, Vol 18, Nro. 1, Feb. 2003, pp. 36-41. Referenciada por: <http://science.thomsonreuters.com>, <http://ieeexplore.ieee.org/>.

Publicaciones en revistas de grupo II (referenciadas en bases de datos especializadas de reconocimiento internacional)

- ✓ Ignacio Pérez Abril, "Modelación en coordenadas de fase del transformador monofásico con derivación central en el secundario", Ingeniería Energética Vol. XXXIV, Nro 3, Sept./Dic 2013, pp. 186-197. Referenciada por: SciELO.
- ✓ José Ángel González Quintero, "Algoritmo Heurístico para la Reconfiguración de Sistemas de Distribución Mediante Intercambio de Ramas", Ingeniería Energética, Nro.3, Vol. XXXIII, 2012, pp. 196-204. Referenciada por: SciELO.
- ✓ Ignacio Pérez Abril, Jandecy Cabral Leite, "Barrido de frecuencia en coordenadas de fase", Ingeniería Energética, Nro.3, Vol. XXXIII, 2012, pp. 196-204. Referenciada por: SciELO.
- ✓ Ignacio Pérez Abril, "Cálculo de parámetros de filtros pasivos de armónicos", Ingeniería Energética, Nro.1, Vol. XXXIII, 2012, pp. 35-45. Referenciada por: SciELO.
- ✓ Davel Borges Vasconcellos, Ignacio Pérez Abril, Vicente León Martínez, "Compensación de potencia reactiva en sistemas desbalanceados utilizando algoritmos genéticos". Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, Nro.3, Vol. 20, 2012, pp. 284-292. Referenciada por: SciELO.
- ✓ Davel Borges Vasconcellos, Ignacio Pérez Abril, Vicente León Martínez, "Modelación de los efectos de la compensación de potencia reactiva en sistemas de suministro eléctrico". Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, Nro.2, Vol. 20, 2012, pp. 160-169. Referenciada por: SciELO
- ✓ Davel Borges Vasconcellos, Ignacio Pérez Abril, Alfredo González Digón, Herschell Iglesias García, "Compensación de la potencia reactiva en sistemas de baja tensión mediante bancos de capacitores fijos, utilizando algoritmos genéticos", Ingeniería Energética, Nro 3, Vol XXXI, 2010, p.56-61. Referenciada por: SciELO.
- ✓ Ignacio Pérez Abril, "Optimización del balance de carga en circuitos de distribución primaria", Ingeniería Energética, Nro 1, Vol XXX, 2009, pp.46-54. Referenciada por: SciELO.
- ✓ Ignacio Pérez Abril, "Compensación de potencia reactiva mediante bancos asimétricos de capacitores", Ingeniería Energética, Nro 1, Vol XXX, 2009, p.37-45. Referenciada por: SciELO.
- ✓ Ignacio Pérez Abril, Leonardo Casas Fernández, "Balance de Carga en Circuitos de Distribución Primaria por Algoritmo Genético", Ing. Energética Nro1, Vol XXIV, 2008. Referenciada por: SciELO.
- ✓ Ignacio Pérez Abril, José A. González Quintero "Compensación de la potencia reactiva en la empresa Cloro Sosa de Sagua", Ingeniería Energética, Nro 3, Vol XXIII, 2002, p.57-64. Referenciada por: SciELO.

- ✓ José A. González Quintero, Ignacio Pérez Abril, "Flujo de carga con armónicos empleando la matriz impedancia de barras", Ingeniería Energética N°4, Vol XXII, 2001, pp. 47-51. Referenciada por: SciELO.
- ✓ José A. González Quintero, Ignacio Pérez Abril "Modelo de un rectificador controlado para estudios de propagación de armónicos", Ingeniería Energética, Nro 4, Vol XXII, 2001, p.41-46. Referenciada por: SciELO.
- ✓ José A. González Quintero, Ignacio Pérez Abril, "Compensación de potencia reactiva en sistemas de distribución contaminados por armónicos", Ingeniería Energética N°4, Vol XXII, 2001, pp. 52-56. Referenciada por: SciELO.