



# APLICACIÓN DE LA COMPUTACIÓN

## Compensación de la potencia reactiva en sistemas de baja tensión mediante bancos de condensadores fijos, utilizando algoritmos genéticos

### *Reactive compensation in low voltage power systems with fixed capacitors banks using genetic algorithms*

Davel Borges - Vasconcellos.  
Ignacio Pérez - Abril

Alfredo González - Digón  
Herschell Iglesias - García

Recibido: Mayo del 2009

Aprobado: Diciembre del 2009

#### Resumen/ Abstract

Una óptima selección de estos, presupone tres aspectos: la selección de la capacidad de los bancos, el tipo de compensador a utilizar, así como la ubicación en el sistema eléctrico de baja tensión. Existen referencias de métodos que consideran los tres aspectos de manera conjunta, basados en la programación matemática, pero estos presentan limitantes dado que no pueden representar todos los efectos de la compensación y se basan en técnicas de programación continua, siendo este un problema de optimización complejo de espacio de búsqueda discreto. En tal sentido, hemos desarrollado un método con el empleo de los algoritmos genéticos que posibilita una formulación más exacta del problema. El método ha sido programado con ayuda del MATLAB, versión 7.5 (R2007b), utilizando las estructuras de programación de Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox. La efectividad del mismo se muestra en un ejemplo real de aplicación al sistema eléctrico de baja tensión de una instalación hotelera del Grupo Cubanacan de la provincia de Camagüey.

Palabras clave: bancos de condensadores, compensación de potencia reactiva, algoritmos genéticos

*A good selection of these, presupposes three aspects: the selection of the banks capacity, the compensator type to use, as well as the location in the low voltage system. References of methods that consider the three aspects in a same problem are based on the mathematical programming, but these cannot represent all the effects of the compensation and these based in technical of continuous programming, being this a complex optimization problem of discrete search space. In the paper, we have developed a method with the employment of the genetic algorithms, which facilitates a more exact problem formulation. The method has been programmed in MATLAB, version 7.5 (R2007b), using programming structures of Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox. The effectiveness is shown in an example of real application to the low voltage system of a hotel installation of the Cubanacan Company in Camagüey.*

*Key words: capacitor banks, reactive power compensations, genetic algorithms*

#### INTRODUCCIÓN

Se puede definir como sistema eléctrico a la infraestructura formada por el conjunto de medios electrotécnicos encargados de la generación, transporte y consumo de la energía eléctrica [1]

Como es conocido, este proceso en la casi generalidad de los casos se realiza en forma de corriente alterna trifásica, debido a las ventajas que esto reporta en cuanto a la capacidad de los

medios electrotécnicos y a la reducción de las pérdidas en sentido general, entre otras.

Sin embargo, esta transferencia de energía trae aparejado de forma perjudicial la existencia en mayor o menor medida de fenómenos de desfase [2] que se manifiestan en estos sistemas teniendo tres orígenes fundamentales:

- La presencia de elementos almacenadores de energía (inductores y condensadores).
- La presencia de elementos no lineales (electrónicos por lo general).
- El desbalance del sistema (en las fuentes y/o los receptores eléctricos).

Estos fenómenos limitan la capacidad de los sistemas e incrementan las pérdidas de energía, ocasionando gastos innecesarios, con un impacto nocivo hacia el medio ambiente.

La cuantificación de cada fenómeno se realiza mediante una potencia de desfase o no activa (potencia reactiva, potencia de distorsión armónica y potencia de asimetría, respectivamente)<sup>[3]</sup>, existiendo en la literatura métodos para compensar o limitar sus efectos negativos, a través principalmente de dispositivos externos de compensación, de manera individual o conjunta (solo encontrado en el caso de la compensación de la potencia reactiva y de distorsión armónica).

De estos tres fenómenos, sin dudas la compensación de la potencia reactiva es el más conocido por ser el más tratado en la literatura especializada.

Sin embargo, aún en este caso, los métodos de compensación basados en la selección y ubicación de dispositivos externos en el caso de los sistemas eléctricos de baja tensión no aseguran una solución óptima, más cuando se trata de sistemas con alto predominio de carga monofásica, del sector terciario principalmente.

Teniendo como premisas que:

1. La compensación de potencia reactiva para sistemas eléctricos de baja tensión del sector terciario constituye un problema de optimización complejo con espacio de búsqueda discreto.
2. Para la solución de este tipo de problemas los algoritmos genéticos han demostrado ser eficaces.

Se puede conformar la siguiente hipótesis:

Un modelo de compensación de potencia reactiva para sistemas eléctricos de baja tensión del sector terciario, basado en la técnica de algoritmo genético, debe dar mejores resultados, en relación con los métodos tradicionalmente empleados.

Por lo que nos trazamos como objetivo general de la investigación obtener un método de compensación de potencia reactiva con bancos fijos, que resulte en la selección y ubicación de bancos de condensadores, para sistemas eléctricos de baja

tensión del sector terciario, basado en la técnica de algoritmo genético.

## ASPECTOS DE LA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA

El problema de la compensación de potencia reactiva en sistemas eléctricos de baja tensión, exige de tres aspectos como parte del procedimiento:

- La selección de la magnitud de la compensación, que condiciona la potencia de compensación necesaria del dispositivo (CkVAr).
- La selección del tipo de compensación, que condiciona el tipo de dispositivo (fijo o variable) con sus parámetros técnicos.

La ubicación óptima de la compensación, que condiciona la localización de los dispositivos de compensación.

Estos aspectos son abordados, a través de métodos independientes en la casi totalidad de la literatura consultada sobre el tema. Sin embargo, desde el punto de vista técnico cada uno de estos depende del resto y todos tienen una implicación económica, lo que obliga a la necesidad de su consideración de forma conjunta (en un mismo problema).

En la mayoría de las aplicaciones prácticas se determina el punto de ubicación de la compensación y el tipo a emplear (fija o variable) bajo criterios muchas veces empíricos basados generalmente en el costo de la inversión y la experiencia del proyectista y luego, a partir de allí, se seleccionan los parámetros de los dispositivos a emplear aplicando métodos desarrollados por la literatura para tales efectos.

En los últimos años se han logrado métodos que tienen en cuenta los tres aspectos de forma conjunta, basados en una función no lineal de optimización, con restricciones lineales, que se resuelve aplicando la programación matemática continua no lineal [<sup>4-5]</sup>

Sin embargo, la programación matemática continua no lineal presenta las siguientes limitaciones:

1. La necesidad de expresar los efectos de la compensación a través de un

modelo matemático, implica que no se puedan considerar todos los efectos posibles, reduciendo la exactitud de la solución.

2. La solución del problema (capacidad de compensación) se expresa a través de números reales y luego es necesario un proceso de estandarización, por cuanto los dispositivos se fabrican con valores de capacidades estándares.
3. La gran cantidad de variables en el proceso de optimización dificultan de manera significativa la solución del método, con demoras en las corridas (por su funcionamiento secuencial) e incluso, dificultades de convergencia si el problema (función objetivo y espacio de búsqueda definido por las restricciones) no es cuidadosamente esbozado.

Resumiendo, podemos decir que el método de selección de la compensación de potencia reactiva parte de un problema de optimización complejo porque son múltiples los efectos que se pueden lograr, con la imposibilidad de representarlos todos a través de un modelo matemático preciso.

El espacio de búsqueda del problema por su parte es discreto, ya que los valores de unidades capacitadoras a ubicar responden a estándares de fabricación.

Ante esta dificultad nos planteamos la solución del problema de compensación de potencia reactiva, aplicando algoritmo genético.

## LOS ALGORITMOS GENÉTICOS

Los algoritmos genéticos fueron introducidos en los años sesenta y actualmente forman parte de la familia de procedimientos de optimización basados en la inteligencia artificial [6].

Es una técnica de búsqueda basada en la teoría de la evolución de Darwin, que funciona análogo al proceso de cruzamiento biológico de cromosomas que comparten información genética para crear un nuevo individuo. Al final, llegan a obtener un individuo de alta adaptación, lo que en el argot matemático no significa una solución óptima, pero sí la "mejor solución".

Los algoritmos genéticos, se diferencian de los algoritmos de optimización tradicionales, dentro del cual se encuentra la programación matemática, en cuanto a que [7]:

- Son algoritmos estocásticos. Dos ejecuciones distintas pueden dar dos soluciones distintas.
- Son algoritmos de búsqueda múltiple, de los cuales es posible obtener varias soluciones.

- La convergencia es poco sensible a la población inicial. No existen restricciones en el espacio de búsqueda.
- Son algoritmos intrínsecamente paralelos, capaces de operar simultáneamente con varias soluciones, lo que asegura por lo general un funcionamiento más rápido en las corridas.

Resultan menos afectados por los máximos locales (falsas soluciones).

Por todo lo anterior, los algoritmos genéticos se han empleado de forma satisfactoria en diferentes ciencias en la solución de problemas de optimización complejos de espacio de búsqueda discretos, por lo que resultan ser una eficaz herramienta para la solución del problema de compensación de potencia reactiva en los sistemas eléctricos de baja tensión.

## MODELO DE CARGAS ELÉCTRICAS

Los modelos tradicionales de las cargas eléctricas usados en los modelos de optimización se basan en utilizar un patrón de comportamiento expresado en un gráfico de cargas (de potencia, activa, reactiva, corriente, etc.) que se obtiene como resultado de mediciones eléctricas con analizadores de redes en el mejor de los casos, durante un ciclo productivo o de servicios característico de la instalación; por lo general en 24 horas, con intervalos de medición constantes, mayores o iguales a una hora.

En el modelo de cargas eléctricas elaborado para su utilización con algoritmo genético, se establecen temporadas de comportamiento regular de la carga y adicionalmente se ajustan los valores de potencia activa y reactiva de gráficos de carga, a los valores de energía activa y reactiva mensual respectivamente, utilizados para la facturación del servicio eléctrico.

## OPTIMIZACIÓN DE LA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA A PARTIR DEL ALGORITMO GENÉTICO

Un problema de optimización es aquel que busca maximizar (o minimizar) una función con un número determinado de variables, estando los valores sujetos a ciertas limitaciones (restricciones).

A partir del problema real se formula el problema aproximado, el cual posteriormente es modelado matemáticamente y resuelto aplicando algún algoritmo de optimización conocido.

En este caso se pueden considerar todos los efectos de la compensación de potencia reactiva:

- Inversión de las unidades condensadoras ( $Kt$ ).
- Incremento de los gastos de pérdidas de energía activa de las unidades condensadoras ( $Cp$ ).
- Incremento de los gastos de amortización de las unidades condensadoras ( $Ca$ ).
- Mejora del factor de potencia, incluida la reducción de pérdidas de energía activa en el sistema ( $Bfp$ ).
- Liberación de cargas (si fuese necesario).

### ANÁLISIS Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Determinar la cantidad de unidades de compensación de cada capacidad disponible que conformarán un banco fijo de condensadores simétricos para compensar la potencia reactiva en el sistema eléctrico de baja tensión, tal que se obtenga el máximo de Valor Actual Neto.

### CONSTRUCCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Como variables de decisión del problema se considerarán las cantidades de unidades de compensación de cada capacidad disponibles para formar el banco.

Para esto, cada cromosoma tendrá una cadena de genes cuya posición representa la representación binaria de la cantidad de unidades.

Como función de adaptación (*Fitness*) se toma el -VAN, añadiendo una función de penalización (*Penal*) incrementada por una cantidad suficientemente grande. Esto se debe a que durante la implementación posterior lo que se logra es minimizar la función.

La función de penalización se compone de la suma de penalizaciones especificadas cuando se cumplen las condiciones siguientes:

- La potencia reactiva de compensación a ubicar en algún nodo ( $X_j$ ) es mayor que el mayor valor de potencia reactiva de cualquier nodo para cualquier estado de carga ( $Q_j$ ):
- La potencia reactiva de compensación total ( $X_t$ ) es mayor que el mayor valor de potencia reactiva de cualquier nodo para cualquier estado de carga ( $Q_j$ ):
- El menor valor de la tensión efectiva en cualquier nodo para cualquier estado de carga ( $V_{j\text{mín}}$ ) es menor que la mínima tensión permisible:

- El mayor valor de la tensión efectiva en cualquier nodo para cualquier estado de carga ( $V_{j\text{máx}}$ ) es mayor que la máxima tensión permisible:

Expresado matemáticamente, se necesita minimizar la función *Fitness*:

$$Fitness = -VAN + Penal = -Kt + (Bfp - Cp - Ca) \sum_{j=1}^n \frac{1}{(1+TD)^j} + 10 \cdot Penal$$

Sujeto a:

$$Penal = \sum_{j=1}^n (X_j - Q_j)^2 + \sum_{j=1}^n (X_t - Q_j)^2 + \sum_{j=1}^n (V_{j\text{mín}} - V_{m\text{ín}})^2 + \sum_{j=1}^n (V_{j\text{máx}} - V_{m\text{áx}})^2$$

### PROGRAMACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Con ayuda del MATLAB, versión 7.5 (R2007b), se programó el modelo, utilizando las estructuras de programación de Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox, teniendo en cuenta el empleo de una estructura de algoritmo genético simple para una población de 1000 individuos por generación, con el criterio de parada para un número máximo de generaciones de 50.

### PROGRAMACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

El pseudocódigo del algoritmo genético se plantea:

[Inicio] Generar una población aleatoria de  $n$  (1000) cromosomas, expresados en el vector fila binario  $x$ , de longitud  $n_{\text{nodos}} \times n_{\text{estados}} \times n_{\text{bit}}$  genes.

[Fitness] Evaluar la función *Fitness* para cada cromosoma  $x$  de la población.

[Nueva población] Crear una nueva población, repitiendo los siguientes pasos hasta que se cumpla la condición de parada, en este caso por el número de generaciones preestablecida en el algoritmo (50).

- [Selección] Seleccionar dos cromosomas padres de una población de acuerdo a su *Fitness*.
- [Crossover] Con un porcentaje de cruzamiento (80 %) crear una nueva descendencia.
- [Mutación] Con un porcentaje de mutación modificar la nueva población.

- [Aceptar] Colocar los nuevos descendientes en la nueva población.

[Reemplazar] Usar la nueva población generada para una futura corrida del algoritmo.

[Test] Si la condición de salida se satisface (generación es mayor que 50), parar y retornar la mejor solución (cromosoma  $x$ ) para la población actual.

[Loop] Regresar al paso 2.

### IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA

El método propuesto se aplicó en la selección de la compensación de potencia reactiva en el sistema eléctrico de un hotel del Grupo Cubanacán de la provincia de Camaguey, cuyo esquema topológico simplificado presentamos en la figura 1, teniendo en cuenta la disponibilidad de unidades condensadoras trifásicas fijas de compensación.

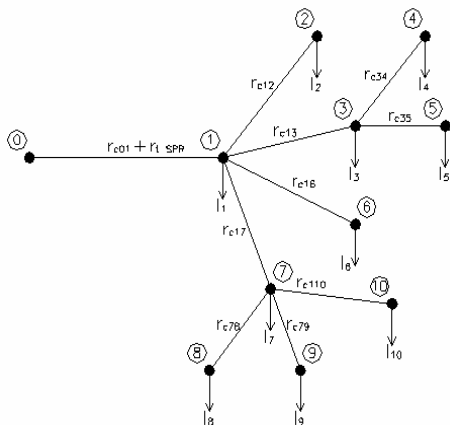


Fig.1 Esquema topológico del sistema eléctrico.

Con ayuda de un analizador de redes trifásico marca TES 3600 se obtuvieron mediciones de la potencia activa y reactiva por fase y trifásica, en los 10 nodos del sistema con intervalos de 30 minutos. Esto se realizó para dos temporadas turísticas de un mismo año.

Adicionalmente, se tomaron los parámetros de los elementos del sistema y se consideraron los costos de inversión de los condensadores comercializados por la empresa COPEXTEL Camaguey.

También fueron considerados los gastos de facturación de ese año de explotación de la instalación.

Se establecieron doce casos de pruebas a escala en condiciones de frontera para comprobar la efectividad del algoritmo. En cada caso se realizaron 10 corridas para comprobar la convergencia.

Los resultados en condiciones de frontera fueron los esperados con un alto porcentaje de convergencia en el algoritmo, lo que comprueba la efectividad del método. Finalmente se corrió el algoritmo considerando todos los efectos como parte del modelo.

La compensación teniendo en cuenta todos los efectos fue de 13,3 CkVAr (10x1+3,3x1) a ubicarse en el nodo 2, que resulta el tercero de mayor importancia en cuanto al valor de la impedancia de la trayectoria, pero uno de los de mayor carga. Los resultados aparecen en la figura 2.

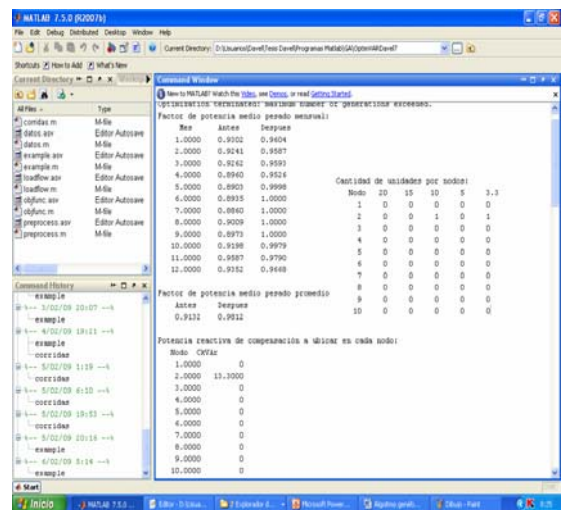


Fig.2. Ventana de resultados de corrida del algoritmo.

Como resultados se obtuvieron las consideraciones siguientes:

- Dentro de las entradas del VAN, sigue siendo el mayor atractivo económico de la compensación, los beneficios que se obtienen por la mejora del factor de potencia medio pesado, regulado en la resolución de facturación del servicio eléctrico. Cuando estos beneficios no se tienen en cuenta, no resulta económica la compensación.
- Por su parte, las salidas del VAN, quedan determinadas en primera instancia por los gastos de explotación en los años

considerados. En menor medida influyen en las salidas del VAN los costos de inversión.

Este último resultado invalida la posibilidad de desprestigiar como efecto los gastos de explotación de las unidades condensadoras, lo cual es una práctica usual en algoritmos tradicionales empleados con estos fines.

## CONCLUSIONES

El método de compensación de potencia reactiva propuesto resulta más efectivo en la solución del problema de optimización, que los métodos tradicionalmente empleados debido a que:

- ✚ Posibilita una formulación más exacta y sencilla de los efectos de la compensación.
- ✚ No es necesaria la desestimación de efectos como los gastos de las unidades condensadoras que pueden modificar los resultados.
- ✚ Asegura un espacio de búsqueda discreto, idóneo para este tipo de problema, dada la estandarización en la fabricación de las unidades de compensación.
- ✚ Es posible de implementar con facilidad a partir de la Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox del MATLAB, que aparece en versión 7 y superior.

## RECOMENDACIONES

- ✚ Incorporar al método propuesto el empleo de bancos de condensadores variables.
- ✚ Incorporar al método propuesto el diseño de los filtros para la compensación de la distorsión armónica en los sistemas eléctricos de baja tensión.

## REFERENCIAS

- [1] LEÓN MARTÍNEZ, V. Ineficiencias de los sistemas Eléctricos .Efectos, Cuantificación y dispositivos de mejora de la eficiencia. . Editado por: Ed. Universidad Politécnica De Valencia. 2001, .
- [2]. \_\_\_\_\_.: Fenómenos de desfase en los sistemas eléctricos. CD-ROM Primera Conferencia Internacional de Energía y Medio Ambiente. En: Universidad de Camagüey,. 2001. .
- [3] " Standard Definitions of the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Non sinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions. " *IEEE Std 1459-2000*. USA.

[4] PÉREZ ABRIL, I. *Compensación de potencia reactiva en sistemas industriales mediante bancos de capacitores*. Tesis de doctorado., Universidad Central Marta Abreu Las Villas, . 1994..

[5] GONZÁLEZ QUINTERO, J. A. *Compensación de la potencia reactiva en sistemas contaminados con armónicos*. Tesis de doctorado, Universidad Central Marta Abreu Las Villas. 2002..

[6] GOLDBERG David E.: *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. USA, 1989.

[7] FOGEL, D.: *Evolutionary Computation*. *IEEE Press*. USA, 1995.

## AUTORES

### Davel Borges Vasconcellos

Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica  
Profesor Auxiliar, Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Camagüey, Cuba.  
e:mail: davel.borges@reduc.edu.cu

### Ignacio Pérez Abril

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas  
Profesor Titular, Centro de Estudios de Electroenergética. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Villa Clara, Cuba  
e:mail: iperez@fie.uclv.edu.cu

### Alfredo González Digón

Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica  
Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad de, Camagüey, Cuba  
e:mail: alfredo.gonzález@reduc.edu.cu

### Herschell Iglesias García

Ingeniero Electricista. Especialista principal, Grupo de redes eléctricas División COPEXTEL, Camagüey, Cuba.