



APLICACIÓN DE LA COMPUTACIÓN

SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN DE CONDENSADORES EN CIRCUITOS DE DISTRIBUCIÓN PRIMARIA MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

PLACEMENT CAPACITORS PROBLEM SOLUTION FOR PRIMARY DISTRIBUTION NETWORK BY GENETIC ALGORITHM

Julio Rafael - Gómez Sarduy
Noxoly - Díaz Stable

Recibido: Mayo del 2011
Aprobado: Septiembre del 2011

Resumen/ Abstract

Este trabajo está relacionado con el problema de la ubicación de condensadores para mejorar la eficiencia en la explotación de las redes logrando una disminución de las pérdidas técnicas. Se presenta el desarrollo teórico y la validación de un modelo empleado para la selección y localización de bancos de condensadores, sujeto a restricciones técnicas y operativas propias de los sistemas eléctricos. Para solucionarlo se utiliza un algoritmo genético (AG) con funciones de cruzamiento y mutación modificadas, cuya población inicial se genera de manera aleatoriamente controlada. Para validar el modelo se emplea un circuito de 33 nodos utilizado por otros investigadores y se aplica posteriormente al circuito 81 de distribución de la Ciudad de Cienfuegos, tomado como caso de estudio. Se calculan las pérdidas antes y después de la compensación y los beneficios asociados a la reducción de las mismas. El programa devuelve las capacidades y localizaciones del esquema de compensación.

Palabras claves: condensadores, potencia reactiva, algoritmo genético, pérdidas, circuitos de distribución

The problem of the placement of capacitors achieving a decrease of the technical losses and improve of the efficiency is considered in this paper. Theoretical model and validation for selection and placement capacitors have been realized. The technical and operating restrictions of electric systems are considered. A basic genetic algorithm is constituted by a controlled random creation of the initial population and the functions of crossover and mutation are modified for the quest of the optimal solution. One circuit of 11 kV and 33 nodes are used to validate the model, which have been utilized by another investigators are utilized too. Methodology is applicable at the 81 circuit of Cienfuegos's city. Losses before of the compensation and the benefits are calculated by this methodology. The program returns the capabilities and locations of the capacitors in the scheme of optimal compensation proposed.

Key words: capacitors, reactive power, genetic algorithm, losses, distribution networks

INTRODUCCIÓN

El indicador fundamental de eficiencia en las empresas de transmisión y distribución de energía eléctrica son las pérdidas que tienen lugar en los circuitos. Estas pérdidas se desglosan en técnicas y comerciales según la naturaleza de las mismas, y de manera global, en Cuba todavía alcanzan valores del 17 %. En este sentido se han realizado diversos esfuerzos encaminados a reducirlas, siendo uno de los más importantes la remodelación de las redes existentes.

Una parte de las pérdidas técnicas se debe a la circulación de energía reactiva demandada por las cargas lo que es sin dudas un problema muy serio a tener en cuenta. Si se parte del punto de vista de que cuando se ubica un banco

de condensadores con el objetivo de mejorar el perfil de tensión o el factor de potencia de una instalación o sistema eléctrico se está contribuyendo a la vez a que la energía reactiva que circula por las líneas desde el Sistema Electro Energético Nacional (SEN) sea de menor magnitud, entonces se logra que las pérdidas disminuyan, permitiendo también una disminución del costo por este concepto.

Para ubicar estos condensadores en la red, primero se deben considerar todos los bancos que ya existen y verificar que sus capacidades y localización cumplan con el propósito para el cual fueron ubicados. Para calcular los nuevos bancos a colocar hay que tener en cuenta un correcto análisis técnico-económico debido a que constituyen una inversión, y si bien esto no es un problema nuevo, es algo que continúa siendo investigado en el mundo, sobre todo a partir del desarrollo de herramientas de búsqueda más potentes que permiten soluciones más cercanas al óptimo.

En la referencia [1] se realiza un estudio del estado del arte en la ubicación óptima de condensadores mostrando la revisión de 14 artículos significativos de este tema comprendidos entre los años 1 983 y 2 004. En ese trabajo se muestra como la solución propuesta varía de un autor a otro, siempre teniendo en consideración la obtención de un mayor beneficio y se plantea que la manera de abordar el problema por los diferentes autores puede clasificarse de acuerdo al método utilizado en analíticos, heurísticos, combinación de lógica difusa y algoritmos genéticos y métodos que consideran la distorsión armónica.

El propio autor de [1] propone un método de búsqueda exhaustiva para demostrar que los métodos anteriores, aunque son efectivos desde el punto de vista de tiempo y recursos computacionales, no siempre conducen a la solución óptima. También en [2] se reporta que la literatura publicada con el problema de ubicación de condensadores es abundante y sobrepasa los 400 artículos técnicos publicados desde 1 950 hasta el 2 000, principalmente por el Institute of Electrical and Electronic Engineering (IEEE). También plantea que este problema se puede abordar desde diferentes perspectivas que comprenden la definición del problema, formulación, objetivos y métodos de solución propuestos. En casi todas las aplicaciones la función objetivo es modelada como una maximización de los ahorros por reducción de pérdidas y demanda considerando los costos de instalación y mantenimiento de los condensadores. Los autores de [2] presentan dos métodos para la ubicación racional de bancos de condensadores en circuitos de distribución. El primero de ellos es una heurística fundamentada en criterios empíricos sencillos que orientan la búsqueda hacia los nodos de mayor sensibilidad y determina el tamaño, ubicación y número de condensadores a ser instalados en un sistema de distribución de topología conocida y para un determinado nivel de carga. El segundo método emplea un algoritmo genético (AG) en su formulación, técnica que ya ha sido utilizada ampliamente en estudios anteriores pero que es usada como método de validación, sustento y apoyo de la técnica heurística concebida.

La eficiencia del AG como método de optimización, reflejada en la calidad de la solución final ha hecho que sea un método preferido en investigaciones actuales de alta complejidad [3- 5]. En resumen, en la mayoría de los trabajos se trata de adaptar una de las técnicas de búsqueda estocástica modernas para resolver el problema de optimización, siendo una de las más utilizadas los AG. En este trabajo se propone un AG con codificación entera que se aplica a un circuito de distribución real de 62 nodos con resultados que muestran beneficios potenciales por disminución de pérdidas.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El problema de cómo ubicar los condensadores de manera que se logre alcanzar o maximizar los beneficios frente al costo del equipamiento es a lo que se denomina *problema de ubicación de condensadores* y consiste en seleccionar el tamaño, tipo y localización de los mismos, así como el esquema de control en el caso de que se consideren varios niveles de carga en la operación del sistema. Todo esto se modela mediante una función objetivo con las restricciones pertinentes y determina la complejidad del problema.

Los circuitos de distribución tienen una serie de particularidades que es necesario tener en cuenta para establecer las consideraciones que simplifiquen este problema. En primer lugar, debe tenerse en cuenta la topología de estos circuitos; generalmente radiales con alimentación en el nodo principal que se corresponde con la subestación de media tensión que alimenta la red. Pero, aunque esta característica pudiera simplificar los cálculos de flujos de potencia, en la actualidad se está comenzando a implementar configuraciones en anillo con el fin de aumentar la seguridad del sistema mejorando el nivel de respaldo [4].

Otras particularidades importantes son la diversidad de conexiones además de la trifásica y la presencia de cargas de distinta naturaleza (residenciales, comerciales, industriales y alumbrado público) con un factor de potencia específico para cada una de ellas y un determinado comportamiento frente a variaciones de tensión. Además, en estos circuitos de distribución la poca existencia de mediciones en el sistema, excepto en la subestación principal y consumidores mayores, dificulta la obtención de curvas de carga reales de los grupos de consumidores, lo que unido a la dinámica a corto plazo de las cargas hace que los estimados de pérdidas y otros estudios que involucran cálculos de flujo de carga tengan inexactitudes presentes [6]. Basados en las características descritas anteriormente, para la formulación y solución del problema de ubicación de condensadores, para este estudio se hacen las siguientes consideraciones:

- 1-La red constituye un sistema trifásico balanceado, de manera que se puede representar por fase y el cálculo de flujos de potencia es monofásico.
- 2-El sistema puede tener interconexiones entre las diferentes ramas de tal forma que no necesariamente tenga configuración radial.
- 3-Todas las cargas varían de acuerdo a la curva de duración de la carga definida para la subestación principal y se aproximan a través de niveles discretos.
- 4-Solo se considerarán bancos fijos, o sea, el método de selección no contempla ningún esquema de control para dar seguimiento a las variaciones reales de la demanda de reactivo de las cargas.
- 5-Se considera que la tensión en la barra de la subestación es controlada.

La función objetivo a ser maximizada, representa los ahorros económicos obtenidos por la instalación de bancos de condensadores en el circuito de distribución e incluye tanto los costos asociados a las pérdidas de energía como también el costo de instalación y mantenimiento de los condensadores y puede expresarse matemáticamente de la siguiente manera:

$$\text{Costo} = \sum_{i=1}^N \Delta P_i \cdot K_{e_i} \cdot \Delta t_i - [Q_c \cdot K_{cap} + n_f \cdot (K_i + K_f)] \quad (1)$$

Donde: N es el máximo número de niveles de carga que se consideran en el sistema; ΔP_i es la reducción de pérdidas de potencia del i -ésimo nivel de carga, en kilo watt; K_{e_i} es el precio de la energía en el i -ésimo nivel de carga, en pesos por kilo watt hora; Δt_i es la duración anual de cada nivel de carga, en horas; Q_c es la potencia total de los bancos de condensadores instalados, en kilo voltampere reactivos; K_{cap} es el costo anualizado de los condensadores, en pesos por kilo voltampere reactivos; K_i es el costo anualizado de instalación de un banco de condensadores, en pesos; K_f es el costo fijo anual por banco de condensadores (mantenimiento), en pesos; n_f es el número de bancos fijos que se instalan en el sistema.

La reducción de las pérdidas de potencia ΔP_i es la diferencia entre las pérdidas de potencia en el circuito sin bancos de condensadores instalados y las pérdidas de potencia cuando se consideran los bancos de condensadores. Las restricciones operacionales están dadas por las magnitudes de las tensiones en los nodos del circuito y la mantención de la naturaleza inductiva del circuito. Si el circuito está bien diseñado, las variaciones de la demanda solo provocan cambios sutiles en la tensión, por lo tanto, se pueden establecer restricciones de tensión independientemente del nivel de carga i -ésimo. Estas restricciones se expresan como:

$$U_{min} \leq U_l \leq U_{max}; \quad l=1, 2, \dots, nbus \quad (2)$$

Donde: l es el número del nodo que se considera, $nbus$ es el número máximo de nodos o barras del circuito analizado y U_{min} y U_{max} son los valores de tensiones mínimas y máximas admisibles en el circuito.

Con esta restricción se garantiza que la tensión en cada uno de los nodos del circuito se mantenga dentro de ciertos límites preestablecidos. En este trabajo se establecen límites entre el 95 y el 105 % de la tensión nominal.

Para garantizar que el circuito se mantenga inductivo, se restringen la capacidad de los condensadores a instalar en el circuito por debajo de la demanda reactiva máxima que está presente en el circuito, de manera que se puede escribir matemáticamente:

$$Q_c \leq Q_{max} \quad (3)$$

Donde: Q_c y Q_{max} son la potencia total de los condensadores, y la máxima demanda de potencia reactiva del circuito respectivamente, ambas en kilo voltampere reactivos.

Las restricciones técnicas responden a que normalmente los bancos de condensadores tienen capacidades que son múltiplos enteros de unidades estándar de 50 kvar, o sea:

$$C_j \geq 3 \cdot n \cdot 50 \text{ kvar} \quad (4)$$

Donde: C_j es la capacidad total del banco j , en kilo voltampere reactivos y n es el número de unidades estándar que componen el banco, $n = 1, 2, 3, \dots$

IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO

Los algoritmos genéticos (AG) son una familia de modelos computacionales inspirados en el modelo evolutivo de las especies y actualmente han encontrado aplicaciones en diversos campos de la ciencia y la técnica.

La implementación de un AG comienza generando un conjunto de posibles soluciones de un problema que han sido debidamente codificadas (población inicial). De esta manera cada una de estas potenciales soluciones pasa a ser una estructura de datos conocida como cromosoma o individuo, integrantes de una misma población (generación). A esta población se le aplican operadores que le permiten evolucionar, generación tras generación, hacia la obtención de soluciones de mejor calidad.

Los componentes del AG diseñado para dar solución a este problema a partir del toolbox de AG del Matlab en su versión R2009a se explican a continuación:

- *Representación y codificación de las soluciones.* Un individuo debe especificar los nodos escogidos y el número o capacidad que debe ser instalado en los nodos seleccionados, que considerando todos los niveles de carga especificados garantice los mayores beneficios. La población queda representada por una matriz que tiene un número de filas igual al tamaño de la población ($npob$) y con un número de columnas igual al número de nodos ($nbus$) del circuito.

- *Población.* Una buena práctica, para garantizar diversidad, es seleccionar una cantidad de individuos mayor que el número de barras. En este trabajo se emplea $npob = 100$.

En los problemas de ubicación de condensadores las mejores soluciones son aquellas que localizan un número reducido de bancos y la mejor forma de crear la población inicial es de manera aleatoriamente controlada generando matrices porosas cuyos valores diferentes de cero son números enteros de valores medios de condensadores (150, 300 y 600). Estas se combinan para formar la población inicial de tamaño predeterminado por la variable $npob$. La matriz resultante tiene baja densidad y contiene soluciones con pocos bancos de condensadores pero que abarca en la propuesta valores múltiplos de 150 kvar.

- *Operadores genéticos.* La selección es estocástica uniforme con elitismo. En este trabajo se emplea el predeterminado en el Matlab para la función Elitcount, cuyo valor es 2 y se emplea una función de selección *uniforme estocástica*.

En el caso del cruzamiento, es de doble punto pero modificado para mantener la codificación de los cromosomas o individuos y cumplir con la restricción técnica de que las capacidades propuestas deben ser múltiplos enteros de 150.

- *Función de evaluación.* Para evaluar a cada uno de los individuos de la población es necesaria la solución de un flujo de carga y el análisis económico. Las pérdidas calculadas se comparan con el caso inicial para determinar su reducción y su influencia en la economía del sistema considerando la función objetivo representada por la ecuación (1), que incluye el costo anual del esquema de compensación de reactivo como ya se explicó.

- *Penalizaciones.* Los conjuntos de combinaciones en las cuales existan valores de condensadores negativos, o una propuesta que incluya demasiados condensadores y haga que el circuito se torne capacitivo por ejemplo, o al evaluarse una solución las pérdidas se incrementen en lugar de disminuir, o que la tensión en el nodo se eleve por encima de un valor establecido como permisible, son soluciones no factibles y en estos casos se penaliza la función de aptitud asignando valores extremadamente altos a la función de costo lo que hace que se aleje del mínimo.

VALIDACIÓN DE LA CALIDAD DEL MODELO DE SOLUCIÓN PROPUESTO

Para validar el desempeño del modelo propuesto se procede a realizar un análisis comparativo en órdenes de magnitud, entre los resultados arrojados por el programa y los resultados obtenidos por otros autores con un mismo caso de prueba, o sea, se comparará los ahorros, pérdidas y perfiles de tensión, teniendo en cuenta además, que como se conoce, el AG es capaz de obtener soluciones muy buenas cercanas al óptimo, sin que necesariamente coincidan con el óptimo global.

El sistema seleccionado para la validación es un sistema radial de 33 nodos con secciones de alimentador diferentes y distribución de carga no uniforme que opera con tensión nominal de 11 kV. Este ejemplo se utiliza en [2] para validar una metodología heurística y a la vez, es utilizado en [7] para validar otra metodología basada en sensibilidades lineales. Los datos técnicos del circuito que se usará para la validación y se exponen en la tabla 1.

Tabla 1 Parámetros del sistema y potencias demandadas.					
De	A	R(Ohm)	X(Ohm)	P	Q
0	1	0,1170	0,0480	230	142,5
1	2	0,1073	0,0440	-	-
2	3	0,1645	0,0457	230	142,5
3	4	0,1495	0,0415	230	142,5
4	5	0,1495	0,0415	-	-
5	6	0,3144	0,0540	-	-
6	7	0,2096	0,0360	230	142,5
7	8	0,3144	0,0540	230	142,5
8	9	0,2096	0,0360	-	-
9	10	0,1310	0,0225	230	142,5
10	11	0,1048	0,0180	137	84
2	12	0,1572	0,0270	72	45
12	13	0,2096	0,0360	72	45
13	14	0,1048	0,0180	72	45
14	15	0,0524	0,0090	13,5	7,5
5	16	0,1794	0,0498	230	142,5
16	17	0,1645	0,0457	230	142,5
17	18	0,2079	0,0473	230	142,5
18	19	0,1890	0,0430	230	142,5
19	20	0,1890	0,0430	230	142,5
20	21	0,2620	0,0450	230	142,5
21	22	0,2620	0,0450	230	142,5
22	23	0,3144	0,0540	230	142,5
23	24	0,2096	0,0360	230	142,5
24	25	0,1310	0,0225	230	142,5
25	26	0,1048	0,0180	137	85
6	27	0,1572	0,0270	75	48
27	28	0,1572	0,0270	75	48
28	29	0,1572	0,0270	75	48
9	30	0,1572	0,0270	57	34,5
30	31	0,2096	0,0360	57	34,5
31	32	0,1572	0,0270	57	34,5
32	33	0,0180	0,0180	57	34,5

En la tabla 2 se muestran los resultados alcanzados por [2], [7] y por el AG propuesto. Los resultados son coincidentes en cuanto a la compensación total y las tensiones alcanzadas en los nodos después de la compensación, sin embargo, la compensación que se propone con el modelo que se desarrolla en este trabajo contiene sólo 7 bancos (8 propone el método heurístico y 10 el de Estrada [7]) y las localizaciones por supuesto también son diferentes. Esto se puede explicar a partir de la diferencia en el diseño de la función objetivo, así como en el modelo y los datos del circuito para el flujo de carga.

La función objetivo de este trabajo considera un término que es el producto del número de bancos por el costo fijo anual de los condensadores (K_f) y el número de bancos por el costo de instalación (K_i), por lo tanto al tratar de minimizar estos términos la solución buscará un esquema de compensación con menos bancos y por otro lado el flujo de carga tiene un modelo π de las líneas que considera la reactancia capacitiva y que la calcula a partir de la información del tipo de estructura de la línea, como estos datos no están considerados en los reportes de [2] y por lo tanto no están disponibles fueron asumidos, pero tienen poca influencia pues las líneas son cortas en estos circuitos. En resumen, el AG devuelve una propuesta muy acertada, que como se aprecia en la tabla 3 coincide con los resultados relevantes reportados por los autores anteriores [2] y [7].

Tabla 2 Resultados comparativos de la compensación por los modelos analizados						
Nodo	Compensación, en kilo voltampere reactivos			Tensiones, en pu		
	(Galarza y Riofrío, 2006) [2]	(Estrada, 2003) [7]	AG Gauss-Seidel y	(Galarza y Riofrío, 2006) [2]	(Estrada, 2003) [7]	AG Gauss-Seidel y
0	----	----	----	1,0000	1,0000	1,0000
1	0	0	0	0,9952	0,9953	0,9953
2	0	0	0	0,9911	0,9913	0,9912
3	300	300	0	0,9851	0,9855	0,9852
4	0	300	0	0,9800	0,9804	0,9801
5	600	0	300	0,9752	0,9756	0,9754
6	0	300	0	0,9716	0,9723	0,9719
7	300	0	0	0,9697	0,9704	0,9700
8	0	300	0	0,9674	0,9682	0,9679
9	300	300	0	0,9663	0,9671	0,9669
10	0	0	0	0,9658	0,9667	0,9664
11	0	0	0	0,9657	0,9665	0,9663
12	0	0	0	0,9907	0,9910	0,9910
13	0	0	0	0,9904	0,9906	0,9908
14	0	0	300	0,9903	0,9906	0,9908
15	0	0	0	0,9903	0,9906	0,9908
16	0	0	0	0,9712	0,9717	0,9717
17	0	0	300	0,9680	0,9684	0,9686
18	300	0	0	0,9644	0,9648	0,9651
19	0	300	0	0,9614	0,9620	0,9623
20	300	300	300	0,9589	0,9594	0,9599
21	0	0	300	0,9559	0,9564	0,9570
22	300	300	0	0,9534	0,9540	0,9546
23	0	300	0	0,9510	0,9516	0,9524
24	300	0	600	0,9499	0,9504	0,9514
25	0	0	0	0,9494	0,9499	0,9509
26	0	0	0	0,9493	0,9498	0,9508
27	0	300	0	0,9713	0,9721	0,9716
28	0	0	0	0,9711	0,9718	0,9714
29	0	0	0	0,9710	0,9717	0,9713
30	0	0	0	0,9660	0,9668	0,9667
31	0	0	600	0,9656	0,9665	0,9665
32	0	0	0	0,9655	0,9663	0,9664
33	0	0	0	0,9654	0,9662	0,9663

Tabla 3 Beneficios de los esquemas de compensación examinados.					
	Caso base (Galarza y Riofrío, 2006) [2]	Heurística (Galarza y Riofrío, 2006) [2]	(Estrada, 2003) [7]	Caso base AG y Gauss-Seidel	AG y Gauss-Seidel
Pérdidas, en kilo watt	221,8	160	159,8	220,45	159
Reducción de pérdidas, en kilo watt	-----	61,8	62	-----	61,45
Compensación, en kilo voltampere reactivos	-----	2 700	3 000	-----	2 700
Costo de compensación, en pesos por año	-----	884	1 060	-----	814
Beneficios por reducción de pérdidas, en pesos por año	-----	13 535	13 574	-----	13 457,44
Ahorros por la compensación, en pesos por año	-----	12 651	12 514	-----	12 643,44

En la tabla 2 se muestran los valores de tensión en los nodos del circuito de prueba como se reporta en [2] observándose un comportamiento similar del modelo que se propone con AG y flujo de carga Gauss-Seidel. Tanto para el caso base, sin compensación, como para el caso en que se opera con el esquema de compensación propuesto por el modelo desarrollado, se puede apreciar que coinciden el rango de valores obtenidos o sea, el perfil de tensiones es similar. Como los resultados de los beneficios y también los perfiles de tensión obtenidos por el método propuesto son equivalentes a otros métodos reportados en la literatura, en lo adelante se propone utilizar este modelo para el análisis de un caso de estudio real.

CASO DE ESTUDIO

Como caso de estudio para calcular la compensación óptima de reactivo y disminuir las pérdidas en un circuito de distribución se tomó el circuito 81 de la distribución primaria de la ciudad de Cienfuegos. Este circuito recorre una parte considerable del casco histórico de la ciudad y de Consejo Popular "Punta Gotica", tiene 62 nodos y opera a 4,16 kV.

Este circuito tiene la característica de ser corto en longitud, con una carga altamente residencial muy concentrada y la carga no residencial predominante consiste en edificios administrativos y centros comerciales y de prestación de servicios. Los datos del mismo y de las cargas se muestran en las tablas 4 y 5 respectivamente.

Tabla 4. Datos técnicos del circuito 81									
Nodo inicio	Nodo final	Conductor	Longitud (metros)	Estructura	Nodo inicio	Nodo final	Conductor	Longitud (metros)	Estructura
1	2	CN3/0	319	CE8	51	52	CN3/0	102	CE7
2	3	CN3/0	96	CE8	52	53	CN3/0	30	CE7
3	4	CN3/0	98	CE8	53	61	CN3/0	52	CE7
4	5	CN3/0	60	CE8	61	62	CN3/0	15	CE7
5	6	CN3/0	30	CE8	49	56	CN6	53	CE7
6	7	CN3/0	90	CE8	56	57	CN6	25	CE7
7	8	CN3/0	40	CE8	49	58	CN6	114	CE7
8	9	CN3/0	56	CE8	58	59	CN6	33	CE7
9	10	CN6	120	CE8	58	60	CN6	32	CE7
10	11	CN6	42	CE8	47	54	CN6	72	CE8
11	12	CN6	46	CE8	47	55	CN3/0	64	CE8
12	13	CN6	52	CE8	9	26	CN3/0	60	CE8
13	14	CN6	45	CE8	26	27	CN3/0	60	CE8
14	15	CN6	36	CE8	7	28	CN6	80	CE8
15	16	CN6	30	CE8	7	29	CN6	34	CE8
14	17	CN6	44	CE8	29	30	CN6	34	CE8
12	18	CN6	34	CE8	30	31	CN6	36	CE8
18	19	CN6	60	CE8	31	32	CN6	100	CE8
19	20	CN6	34	CE8	32	33	CN6	50	CE8
20	21	CN6	98	CE8	32	34	CN4	78	CE8
21	22	CN6	34	CE8	31	35	CN4	55	CE8
22	23	CN6	78	CE8	6	36	CN6	40	CE8
19	45	CN6	57	CE8	6	37	CN6	70	CE8
19	46	CN6	40	CE8	4	38	CN6	28	CE8
9	24	CN3/0	40	CE8	4	39	CN6	70	CE8
24	25	CN3/0	30	CE8	3	40	CN6	50	CE8
25	47	CN3/0	50	CE8	40	41	CN6	20	CE8
47	48	CN3/0	30	CE7	3	42	CN6	52	CE8
48	49	CN3/0	68	CE7	2	43	CN6	34	CE8
49	50	CN3/0	46	CE7	2	44	CN6	68	CE8
50	51	CN3/0	91	CE7					

Nodo	P	Q	Nodo	P	Q
5	80,00	45,00	38	32,00	16,00
8	7,00	7,00	39	38,00	18,00
11	62,00	36,00	40	47,00	30,00
13	70,55	47,40	41	3,50	3,50
17	96,00	62,00	42	45,00	22,00
18	70,00	45,00	43	47,00	22,00
20	150,00	97,00	44	50,00	25,00
21	12,40	8,40	46	85,00	43,00
22	44,00	29,50	50	80,00	40,00
25	45,00	30,00	51	7,00	7,00
29	65,00	48,00	53	45,00	22,00
30	7,00	7,00	54	60,00	30,00
33	60,00	32,00	55	40,00	20,00
34	60,00	35,00	56	80,00	40,00
35	40,00	20,00	57	27,00	18,00
36	130,00	75,00	59	70,00	35,00
37	90,00	46,00	60	50,00	25,00

GRÁFICO DE CARGA

Las pérdidas se calculan usando un método de cálculo de flujo de carga Gauss-Seidel, para lo cual es necesario conocer cómo modelar las cargas. La demanda de energía eléctrica varía con el tiempo y depende del punto en el cual se tomen las mediciones. Esta demanda se representa normalmente por una curva de carga o más ventajosamente por una curva de duración de la carga. Se ha hecho el supuesto de que la curva de duración de carga se puede aproximar a través de niveles discretos y que todas las cargas varían de forma proporcional según el nivel de carga de que se trate. En este caso se aproxima por tres escalones que se corresponden con el nivel de carga máximo, intermedio y mínimo del circuito. Por tanto, las pérdidas de potencia se calculan para cada uno de estos niveles.

A partir de las mediciones de la subestación de distribución se construye el gráfico de carga y con este el gráfico de duración de la carga, el cual se muestra como gráfico 1. Este gráfico se aproxima a otro escalonado con tres niveles de carga de igual duración. El escalón correspondiente a carga máxima es de 1 pu, el de carga intermedia de 0,75 pu y el de carga mínima de 0,5 pu.

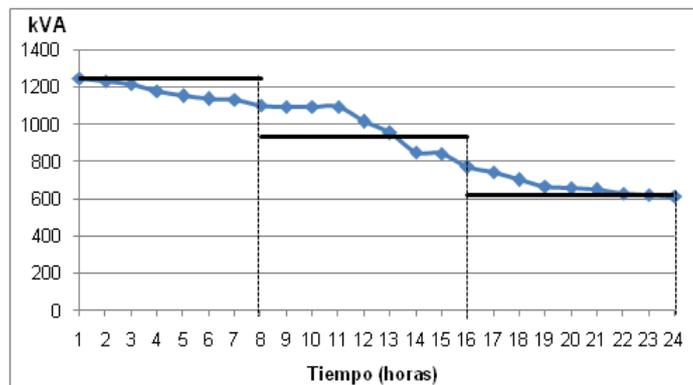


Gráfico 1. Duración de la carga para el circuito 81 y aproximación por escalones para tres niveles.

Otro dato que se toma de las mediciones en la subestación es la tensión en las barras de la misma la cual se considera constante en el flujo de carga y cuyo valor es 4,297 kV, o sea 1,033 pu de la tensión nominal.

Para el flujo de carga, las condiciones iniciales se toman como un vector de tamaño igual al número de nodos y cuyo primer elemento es 1,033 y el resto es 1 y se consideran todos los nodos como candidatos para la localización de bancos de condensadores. Un resumen de estos resultados del programa se puede ver en la tabla 6.

Tabla 6. Resumen de los resultados de la compensación		
	Antes de compensar	de Compensado
Pérdidas, en kilo watt	73	53,05
Reducción de pérdidas, en kilo watt	-----	19,95
Compensación, en kilo voltampere reactivos	-----	1 050
Costo de la compensación, en pesos por año	-----	3 150
Beneficios por reducción de pérdidas, en pesos por año	-----	11 361,45
Ahorros por la compensación, en pesos por año	-----	8 211,45

Los parámetros económicos utilizados para la comparación de alternativas son: Costo fijo de los condensadores, $K_f = 50$ \$/banco/año; Costo capital de los condensadores, $K_{cap} = 10$ \$/kvar; Costo de instalación, $K_i = 500$ \$/banco; Precio de la energía $K_e = 0,195$ \$/kWh y Vida útil de la inversión 5 años.

Con el objetivo de reducir el número de iteraciones y acelerar la convergencia se procede a buscar el factor de aceleración más adecuado para este circuito particular. Para ello se corre el caso base variando el factor de aceleración α y se escoge el valor para el cual el algoritmo converge más rápido, en este caso $\alpha = 1,6$. Como puede apreciarse debido a la reducción del flujo de reactivo por las líneas desde la subestación de distribución, se reducen las pérdidas de potencia en el circuito en 19,95 kW, lo que equivale a una reducción de pérdidas de energía en 58 263,85 kWh/año con un ahorro neto anualizado de \$ 8 211,45.

El algoritmo converge a una solución en 11 iteraciones y la propuesta es distribuir en el circuito bancos de la menor capacidad disponible (150 kvar). La localización de los bancos es en los nodos siguientes: 5, 10, 12, 19, 31, 48 y 52. Finalmente en gráfico 2 se puede ver el perfil de tensión en los nodos del circuito para cada uno de los niveles de carga antes y después de la compensación. Se puede observar cómo mejora la tensión y se mantiene en los niveles impuestos como restricción, o sea, en el rango de $\pm 5\%$.

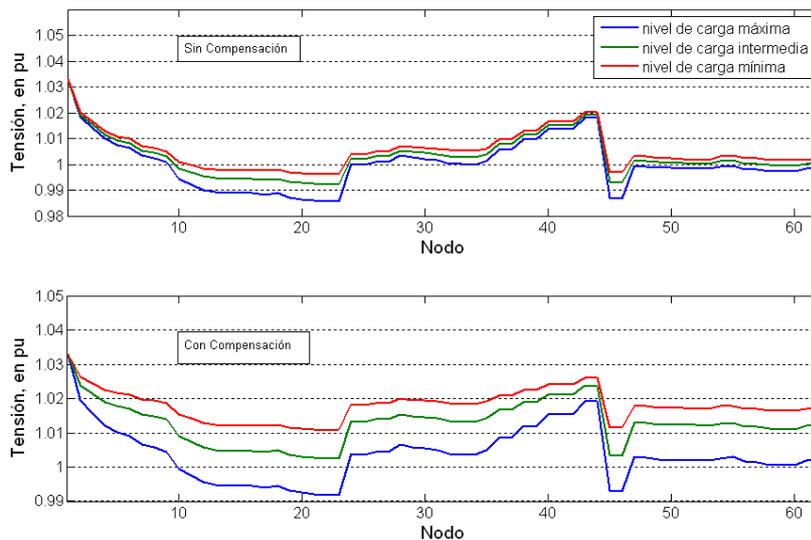


Gráfico 2. Perfiles de tensión del circuito 81 antes y después de la compensación para los tres niveles de carga.

CONCLUSIONES

En los circuitos de distribución primaria todavía existen altos niveles de pérdidas técnicas (11,97 % en la provincia de Cienfuegos) parte de ellas debido a las altas transferencias de potencia reactiva por las redes, lo cual justifica la utilización de herramientas computacionales aplicadas a la solución de esta problemática. Cuando se trata del problema de ubicación de condensadores, el estudio del estado del arte muestra diferentes métodos de solución basados en el uso de herramientas de inteligencia artificial tales como: Forraje Bacterial, Algoritmos Genéticos, Recocido Simulado o Enjambre de Partículas, siendo el AG el más utilizado.

Se desarrolló un modelo para la selección y ubicación óptima de condensadores, que permite alcanzar máximos beneficios con mínimos costos y cuyos resultados fueron validados con métodos propuestos por otros investigadores. Este modelo considera tres niveles de carga del sistema (máximo, intermedio y mínimo) y emplea bancos de condensadores fijos, manteniendo la tensión en los nodos dentro de un $\pm 5\%$ de la tensión nominal y que el circuito en todo momento se mantenga inductivo.

Para solucionar el problema se emplea un AG con codificación entera y se diseñaron nuevos operadores de cruzamiento y mutación. Estos operadores garantizan satisfacer la restricción técnica que implica la existencia de capacidades estándar en el mercado.

Para el circuito analizado como caso de estudio se pueden reducir las pérdidas de potencia en 19,45 kW con un ahorro de energía de 58 263,85 kWh/año. Esto se logra con la ubicación de 7 bancos de 150 kvar cada uno. El beneficio económico neto asociado a la reducción de pérdidas por compensación de reactivo en este circuito es de 8 211,45 \$/año.

REFERENCIAS

- [1] RIVERA RODRÍGUEZ, S. R. "Estado del arte en la ubicación óptima de capacitores y estudio de optimalidad de la solución mediante búsqueda exhaustiva". Revista Ingeniería e Investigación. 2004, vol.24, No.3, p. 67-72.
- [2] GALARZA ESPÍN, M. Y. R. R., C. Localización óptima de Capacitores en Redes Primarias de distribución mediante técnicas Heurísticas. Disponible: [en línea]: <http://bieec.epn.edu.ec:8180/dspace/handle/123456789/407>.
- [3] LI, F., ET AL. "Genetic Algorithms for Optimal Reactive Power Compensation on the National Grid System". IEEE Transactions on Power Systems. 2005, vol. 20, No. 1, p. 493-500.
- [4] LEIVA GÓMEZ, M. A. Localización óptima de condensadores en un sistema de distribución vía algoritmos genéticos. Tesis para optar por el título de Ingeniero Civil de Industrias, con Diploma en Ingeniería Eléctrica., Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica., Santiago de Chile. 2001.
- [5] ALENEAR DE SOUSA, B., DO NASCIMENTO ALVES, H. Y ALVES FERREIRA, H. "Microgenetic Algorithms and Fuzzy Logic Applied to the Optimal Placement of Capacitor Banks in Distribution Networks". IEEE Transaction on Power Systems. vol. 19, No. 2, p. 942-947.
- [6] LEAL, A. G. J., J. A.; MAGRINI, L. C. Y AHN, S. U. "Distribution Transformer Losses Evaluation: A New Analytical Methodology and Artificial Neural Network Approach". IEEE Transaction on Power Systems. 2009, vol. 24, No. 2, p. 705-712.
- [7] ESTRADA, G. Metodología Técnico-Económica de Localización de Capacitores para la reducción de pérdidas eléctricas .Instituto Tecnológico de Morelia, México: [Consulta: 10 de Junio 2010] Tesis para obtener el grado de Máster en Ingeniería Eléctrica. Disponible en: [en línea]. Disponible en Web: <http://elec.itmorelia.edu.mx/Tesis%20Gabriel%20Estrada%20Soria.pdf>.

AUTORES

Julio Rafael Gómez Sarduy,

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas. Investigador del Centro de Energía y Medio Ambiente (CEEMA), Universidad de Cienfuegos, Cuba.

e-mail: jgomez@ucf.edu.cu

Noxoly Díaz Stable, Ingeniero Electricista. Master en Eficiencia Energética. Cienfuegos, Cuba.

e-mail: noxoly@elecfcg.une.cu