



1er. Taller de Computación



ISBN: 959-16-0034-8

1er Taller de Computación aplicada a la Ingeniería Eléctrica

Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL).

Junio/1999 La Habana, Cuba.

ESTUDIO DE LA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN REDES DE SUMINISTRO INDUSTRIAL CON EL USO DE LA PROGRAMACIÓN DINÁMICA.

MC. Ileana A. González Palau.

Dr. Secundino Marrero Ramírez.

MC. Jose Luis Montero O'farill.

Departamento de Ing. Eléctrica del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

RESUMEN:

En el presente trabajo se analiza una metodología para el cálculo de la compensación óptima de la potencia reactiva con ayuda de la programación dinámica, utilizando como criterio de optimización la minimización de la función gasto. Este método permite evaluar y seleccionar la ubicación del sistema de compensación en los nodos del sistema teniendo en cuenta los indicadores técnico-económicos.

I. INTRODUCCIÓN.

En el sector industrial producto de la característica de la carga existe un consumo de potencia reactiva, que como es conocido tiene un efecto nocivo para el sistema de suministro eléctrico, ya que provoca variaciones de voltaje y pérdidas de energía, lo que reduce la capacidad de

carga del sistema. Por ello la compensación óptima de la potencia reactiva constituye un factor decisivo en el control de las redes industriales.

Para la minimización de los gastos en la compensación son utilizados diferentes métodos que emplean como función a optimizar los gastos anuales o la potencia activa y reactiva. La minimización de los gastos debe ir aparejada a la ubicación del sistema de compensación en los distintos nodos del sistema.

La programación dinámica nos permite evaluar la compensación teniendo en cuenta los aspectos antes mencionados, ya que al aplicarse el principio de optimalidad de Bellman es posible utilizar modelos como sistemas en etapas. Esto permite hallar una solución más amplia que la lograda a través del cálculo diferencial y variacional.

II. METODOLOGÍA PROPUESTA

La efectividad del uso de la energía y el equipamiento en los sistemas de suministro eléctrico dependen de la selección correcta de los medios de conmutación y distribución de la fuente de potencia reactiva en el circuito. Para evaluar la efectividad económica de una variante del sistema de compensación, utilizaremos como criterio de optimización la minimización de los gastos capitales anuales.

$$G = C + K_{ip} K = \min$$

(1)

donde:

G - gastos totales, compuesto por los gastos en la generación de potencia reactiva y gastos originados por la producción y distribución de potencia reactiva.

La función gasto G debe cumplir las siguientes condiciones:

1- El balance de potencia reactiva

$$Q_{total} - Q_{Ctotal} - \Delta Q_{total} + Q_s = 0$$

(2)

donde:

Q_{total} - potencia reactiva total

Q_{Ctotal} - potencia reactiva total de la carga

ΔQ_{total} - pérdidas totales de potencia reactiva

Q_s - potencia generada en el sistema electroenergético

2- La corriente de la carga de todos los elementos del circuito no puede superar la admisible

$$I \leq I_{max}$$

(3)

3- La tensión en los bornes de los consumidores no puede superar la admisible

$$U_{min} \leq U \leq U_{max}$$

(4)

4- La potencia reactiva del compensador no puede superar la admisible

$$Q_{min} \leq Q \leq Q_{max}$$

(5)

La función de gastos G se determina con ayuda del método de programación dinámica, el cual permite obtener la solución en aquellos casos donde existen más de una variable considerando las restricciones (2), (3), (5). Además los gastos constantes se pueden asumir en la función gasto como una magnitud constante.

El método de programación dinámica está dirigido asía aquellos problemas donde el proceso de solución es factible realizar por etapas. La optimización de la potencia reactiva se puede dividir en etapas, donde en cada una de ellas se analizan las limitaciones técnicas.

En la primera etapa se analiza el circuito que contiene una sola fuente de potencia reactiva (o recomendada a instalar). En la segunda etapa se consideran dos fuentes y así sucesivamente.

El estado del sistema se va a definir a través de la sumatoria de los valores de la potencia reactiva generada en cada una de las K etapas de las fuentes.

Se analizan diferentes variantes de distribución de la potencia reactiva a través de la función de los gastos anuales optimizada donde se cumple que:

$$G = \sum_1^n G_k(Q_{k-1, \text{total}}, Q_k)$$

(6)

El estado del sistema en la primera etapa k solo depende del estado anterior del sistema en y del parámetro control de Qk en esta etapa.

El valor óptimo de la función para cada etapa se determina como:

$$G_{1opt}(Q_{total}) = G_1(Q_1)$$

$$G_{kopt}(Q_{ktotal}) = \min[G_k(Q_k) + G_{k-1opt}(Q_{ktotal} - Q_k)]$$

(7)

donde:

G_{kopt} - función óptima de los gastos en k etapas.

G_k - gastos en las k fuentes de potencia reactiva

Para el resultado consecutivo de las n partes del problema se determinan dos funciones

$$G_{k1opt}(Q_{ktotal})$$

función óptima de los gastos para k = (2, 3 n) etapas

$$Q_{k1opt}(Q_{ktotal})$$

función óptima de dirección

La dependencia G_k para cualquier fuente de potencia reactiva se puede representar a través de una ecuación de segundo grado

$$G_k = K_0 + K_1 Q_k + K_2 Q_k^2$$

(8)

donde:

K_0 - gastos constantes; USD

K_1 - gastos específicos de 1Mvar de potencia generada; USD/ MVar

K_2 - gastos específicos de 1Mvar de potencia generada; USD/ MVar

Para la primera etapa en la ecuación (7) considerando las pérdidas en la línea se obtiene:

$$G_{1opt} = K_{0,1} + K_{1,1} Q_1 + K_{2,1} Q_1^2$$

(9)

donde:

donde:

$$K_{0,1} = K_0 + K_p Q_n^2$$

$$K_{1,1} = K_1 - 2K_p Q_n$$

$$K_{2,1} = K_2 + K_p$$

$$K_p = \frac{C_0 R_g 10^3}{U_n^2}$$

(10)

Para la segunda etapa la función objetivo tiene la siguiente forma

$$G_{2opt} = \min \left\{ k_0 + k_1 Q_2 + k_2 Q_2^2 + k_{0,1} + k_{1,1} Q_1 + k_{2,1} Q_1^2 \right\}$$

(11)

$$Q_{min} \leq Q_1 \leq Q_{1max}$$

$$Q_{2min} \leq Q_2 \leq Q_{2max}$$

$$Q_{2total1}[min,max] = \left(\frac{k_{2,1}}{k_2} + 1 \right) Q_1[min,max] + \frac{k_{1,1} - k_1}{2k_2}$$

(12)

$$Q_{2total2}[min,max] = \left(\frac{k_2}{k_{2,1}} + 1 \right) Q_2[min,max] - \frac{k_{1,1} - k_1}{2k_{2,1}}$$

(13)

donde:

$Q_1[min,max]$; $Q_2[min,max]$.
 fronteras admisibles de la magnitud de la potencia de la primera y segunda fuente sucesivamente.

Primer intervalo

$$Q_{2total2max} \leq Q_{2total} \leq Q_{2totalmax}$$

$$Q_{2opt} = Q_{2max}$$

(14)

Segundo intervalo

$$Q_{2totalmin} \leq Q_{2total} \leq Q_{2total1min}$$

(15)

$$Q_{1opt} = Q_{1min}$$

En ambos intervalos se debe cumplir que:

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2$$

El empleo de esta metodología, no solo es factible para realizar la correcta selección del método de compensación, sino en aquellos sistemas industriales donde existe control automatizado de la red de suministro o se disponga del modelo matemático, es posible realizar la compensación óptima teniendo en cuenta las condiciones de funcionamiento de la red industrial y los indicadores técnico-económicos. Para ello resulta conveniente la utilización de las restricciones conjuntamente con los modelos aproximados de corriente y tensión, y así poder evaluar cada variante de distribución de la potencia reactiva a generar por el sistema de compensación en los distintos nodos de la red con vista a obtener el menor gasto posible de facturación por consumo de energía, ya que en ocasiones la optimización de la función gastos anuales no resulta suficiente. Esto ocurre mayormente en aquellos sistemas industriales donde existe bajo tiempo de operación de sus cargas y el empleo de bancos fijos de compensación para alcanzar el $\cos\phi$ deseado puede originar el incremento de las pérdidas de energía producto de la desproporción de los bancos que se instalan para obtener la máxima bonificación del factor de potencia.

IV. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

Se evaluará una de las subestaciones del sistema de suministro eléctrico en la planta de Hornos de una planta metalúrgica, compuesto por una subestación con dos transformadores donde la potencia instalada del primer transformador es de 0.45 MW y 0.40 MVar para un factor de potencia de 0.74 y en el segundo transformador es de 0.405 MW y 0.345 MVar para un factor de 0.75. Se desea mejorar el factor de potencia hasta 0.96 para la subestación.

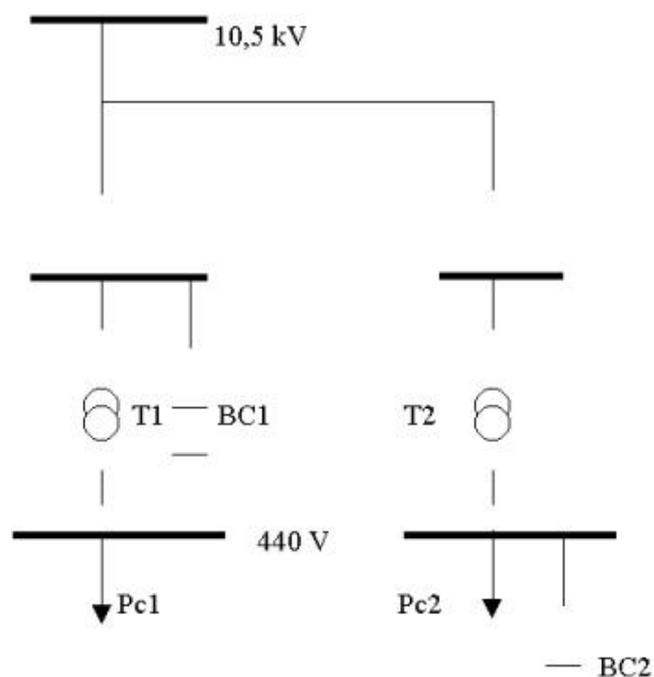


Fig. 1 Esquema de conexión de los bancos de condensadores

En la tabla N° 1 se muestran los valores de los gastos constantes, específicos y los gastos de pérdidas de las baterías de condensadores durante la primera y segunda etapa de cálculo en ambos transformadores, utilizando el sistema de ecuaciones (10).

Tabla N° 1

Transformador N°1				Transformador N°2			
K_0 BC1	0	K_p	453	K_0 BC1	0	K_p	408
K_0 BC2	100	$K_{1,1}$	4579	K_0 BC2	100	$K_{1,1}$	4573
K_1 BC1	4900	$K_{2,1}$	453	K_1 BC1	4900	$K_{2,1}$	408
K_1 BC2	4100	$K_{0,1}$	57	K_1 BC2	4100	$K_{0,1}$	65,28

Atendiendo a la carga instalada por transformador y a la potencia reactiva capacitiva que se necesita se asumen las siguientes restricciones

Restricciones $0 \leq Q_1 \leq 0.30$
 en bajo voltaje del transformador N⁰¹
 $0 \leq Q_1 \leq 0.25$
 en bajo voltaje del transformador N⁰²
 $0 \leq Q_2 \leq 0.80$
 en la barra de alto voltaje

Una vez obtenida la función gasto optimizada a través de las expresiones (9) y (11) y los intervalos (14) y (15) de existencia de Q_{2total} se procede a evaluar la distribución de la energía reactiva capacitiva en los distintos nodos del sistema, debiendo cumplirse que para cada intervalo de la función gastos la suma de los valores asumido de Q_1 y Q_2 deben ser igual al valor seleccionado de Q_{2total} .

Tabla N^o2

Capacidad de los bancos; cMVAR		Gastos óptimos; USD	
T1	T2	T1	T2
0.27	0.23	875.05	1134.34

Conocida la capacidad del banco a instalar en cada transformador se estableció una comparación de los gastos anuales para cada una de las posibles variantes, y en la Tabla 2 se muestra la variante más apropiada de colocación de los bancos según la función gasto optimizada, siendo más factible la colocación de los condensadores en alta tensión para el transformador T1 y para el transformador T2 en baja tensión (ver Fig1). Este resultado tiene en cuenta los costos del MVAR acorde a los niveles de voltaje y las exigencias técnicas del sistema.

V. SECUENCIA DE CÁLCULO DEL PROGRAMA.

Para facilitar el análisis de las distintas ramas del sistema se procedió a programar esta metodología cuya secuencia de cálculo se da continuación en la Fig.2.

Los resultados de cálculos obtenidos fueron utilizados para construir los circuitos y simularlos en el Matlab 5.2 a través de simulink.

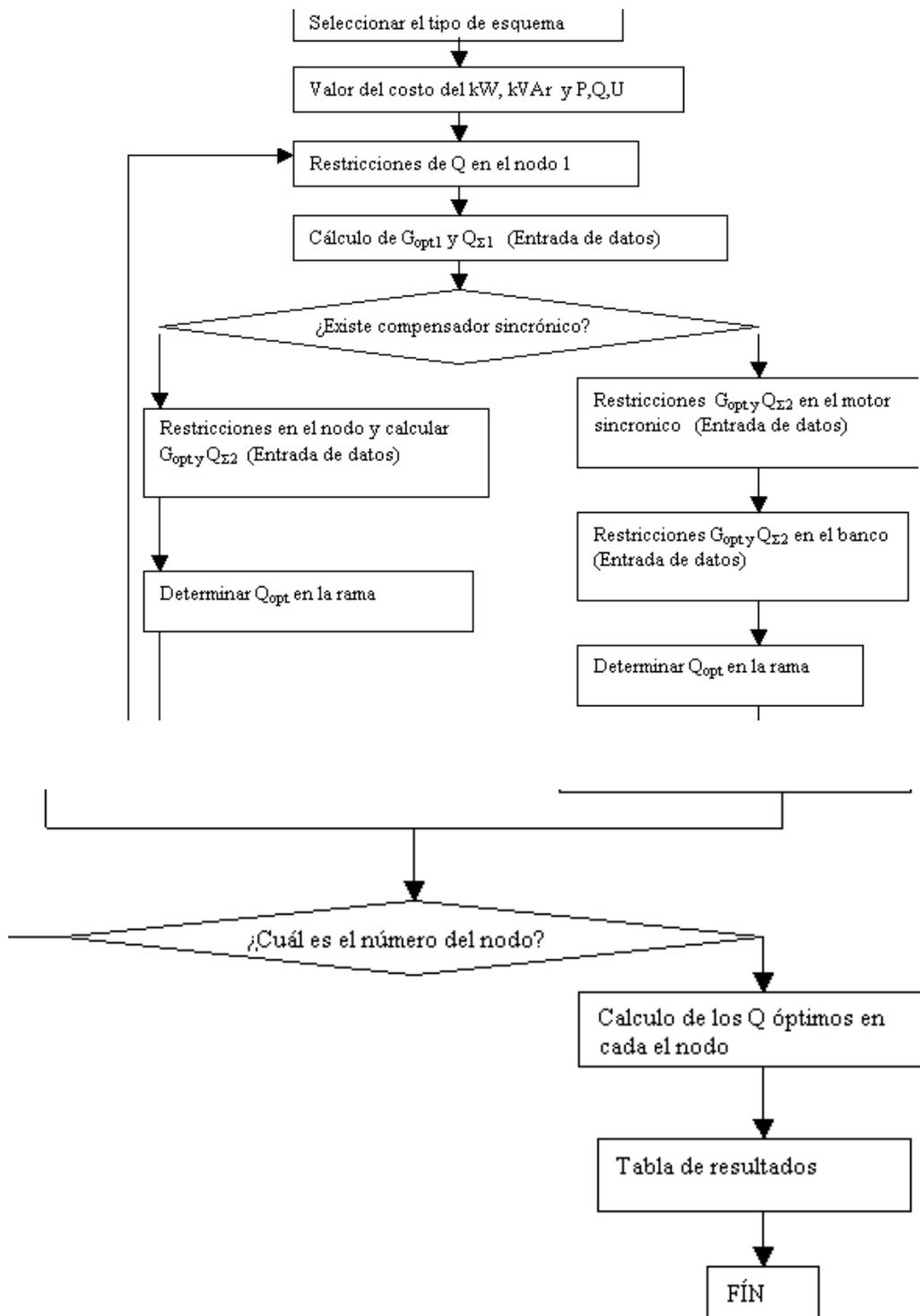


Fig. 3 Secuencia de cálculo del programa.

VI. CONCLUSIONES

Es factible el uso de la programación dinámica para la búsqueda de la variante óptima de compensación.

El uso del criterio de optimalidad de Bellman permite seleccionar la variante óptima de ubicación de los condensadores a través de la función gasto.

Esta metodología permite evaluar de forma simultánea el tipo de fuente a instalar para la compensación en los distintos nodos del sistema.

Esta estrategia de análisis del sistema en etapa facilita la implementación de algoritmo de control en los sistemas de suministro eléctrico, donde se pueden utilizar bancos regulables para el control de potencia teniendo en cuenta el comportamiento dinámico de la carga.

VII. BIBLIOGRAFÍA

1. Boizan M. A. Optimización. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana. 1988.
2. Pérez A. I. Compensación de potencia reactiva en sistemas industriales mediante bancos de capacitores. Tesis doctoral. Santa Clara. V. Clara. 1994.
3. Rodríguez J. L. Sánchez J. L. Distribución óptima de carga eléctrica mediante programación dinámica. Ing. Energética. Volumen II. 1994. pág 85-95.
4. Travers D. L. Kaye R. J. Dynamic dispatch by constructive dynamic Programming. IEEE. Transactions on power systems. Travers D. L. Kaye R. J. Dynamic dispatch by constructive dynamic Programming. IEEE. Transactions on power systems. Vol. 13 N^o 1. Febrero 1998.
5. Yehia M. Ramadan R. El-Tawil Z. Tarhini K. An integrated technico-economical methodology for solving reactive power compensation problem. IEEE. Transactions on power systems, Vol 13 N^o 1. Febrero. 1998.
6. González P. I., Marrero R. S. Compensación de la potencia reactiva en sistemas eléctricos. Geología y Minería. Vol. XVI, N^o 1. 1999. pag. 87-91.
7. González P. I., Estudios de portadores energéticos en la planta de Hornos de Reducción en la Empresa Ernesto Che Guevara. Tesis de maestría. ISMM. 1999.
8. Gonzalez P. I., Marrero R. S. Optimización de la potencia reactiva con el uso de la programación dinámica. Revista Tecnológica. Serie Niquel. Gonzalez P. I., Marrero R. S. Optimización de la potencia reactiva con el uso de la programación dinámica. Revista Tecnológica. Serie Niquel. V1 N^o 2. 1999.
9. Yehia M. Ramadan R. El-Tawil Z. Tarhini K. An integrated technico-economical methodology for solving reactive power compensation problem. IEEE. Transactions on power systems, Vol 13 N^o 1. Febrero, 1998.