



Optimización y control de la compensación de potencia reactiva con el uso de la programación dinámica

Iliana González
Secundino Marrero

Recibido: Febrero del 2004
Aprobado: Abril del 2004

Resumen / Abstract

Se expone una metodología de cálculo para el control de la potencia reactiva en redes de suministro eléctrico industrial 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 óptima del sistema de compensación en los nodos del sistema teniendo en cuenta indicadores técnico-económicos. Palabras clave: potencia reactiva, compensación, programación dinámica, optimización, factor de potencia

The approach presented in this paper relays on the calculation methodology for the control of the reactive power in networks of industrial electric supply with the dynamic programming, using as approach of optimization the minimization of the function expense. This method allows to evaluate and to select the good location of the compensation system in the nodes of the system having in economic technical bill indicators.

Key words: power reactivates, compensation, dynamic programming, optimization, power factor

INTRODUCCIÓN

Para el cálculo en la compensación de potencia reactiva se emplea con frecuencia la programación lineal¹ y modelos óptimos de flujo de potencia basados en la descomposición de P/Q en un sistema eléctrico,^{2,3} donde se utiliza un método efectivo a través de un algoritmo que tienen como base funciones objetivos con el uso del método cuadrático sucesivo.⁴ Algunos autores,^{5,6} han incluido criterios económicos considerados en la función a optimizar, esto permite partir de la minimización de una función costo con el empleo de la matriz Y. Este enfoque económico da la posibilidad de minimizar los costos en la función objetivo considerando el costo total del reactivo que se incorpora a la red y su distribución, teniendo en cuenta las pérdidas mínimas como se describe en las referencias 7 y 8.

En este artículo se realiza la optimización de la potencia reactiva con el uso de la programación dinámica, partiendo de una función gasto a minimizar, aplicando el principio de optimalidad de Bellman, ya que permite utilizar modelos como sistemas en etapas, considerando los diferentes niveles de tensión y distintas fuentes, lo que posibilitó hallar una solución en un intervalo de óptimo para las diferentes etapas analizadas, se presenta el algoritmo del programa Reactiva y los resultados de un caso de estudio.³

METODOLOGÍA PROPUESTA

Para determinar la efectividad económica se partió de la utilización de la ecuación (1), para la minimización de los gastos anuales teniendo en cuenta la función mostrada en la referencia 7.

$$G = C + K_{ip} K = \min \quad \dots(1)$$

Con las siguientes restricciones:

- Balance de potencia reactiva.

$$Q_{total} - Q_{Ctotal} - \Delta Q_{total} + Q_s = 0 \quad \dots(2)$$

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 electro-energético.

- La corriente de la carga no debe superar la admisible.

$$I \leq I_{m\acute{a}x} \quad \dots(3)$$

- La tensión de los consumidores no puede sobrepasar la admisible.

$$U_{m\acute{i}n} \leq U \leq U_{m\acute{a}x} \quad \dots(4)$$

- La potencia reactiva del compensador no puede sobrepasar la admisible.

$$Q_{m\acute{i}n} \leq Q \leq Q_{m\acute{a}x} \quad \dots(5)$$

La función (1) se determina con ayuda del método de programación dinámica,¹ donde el estado del sistema se define por la sumatoria de los valores de la potencia reactiva generada en cada una de las K etapas de las fuentes de potencia reactiva Q_k , analizándose diferentes variantes para la obtención de los gastos anuales $G(Q_{Ktotal})$.

$$G = \sum_1^n G_k(Q_{k-1total}, Q_K) \quad \dots(6)$$

La función de optimización se puede plantear de la forma siguiente:

$$G_{1opt}(Q_{1total}) = G_1(Q_1) \quad \dots(7)$$

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

donde:

G_{kopt} : Función optimal de los gastos en k etapas.

G_k : Gastos en las k fuentes de potencia reactiva.

Para el resultado iterativo de las n etapas se determinan:

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

Función optimal de los gastos para $k = (2, 3 \dots n)$ etapas

$Q_{k1opt}(Q_{ktotal})$: Función optimal de control.

La dependencia de G_k con respecto a las fuentes de potencia reactiva se puede representar a través de una ecuación de segundo grado:

$$G_k = K_0 + K_1 Q_k + K_2 Q_k^2 \quad \dots(8)$$

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

$$G_{1opt} = K_{0,1} + K_{1,1} Q_1 + K_{2,1} Q_1^2 \quad \dots(9)$$

donde:

$$K_{0,1} = K_0 + K_p Q_n^2 \quad \dots(10)$$

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

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

$$K_p = \frac{C_0 R_e 10^3}{U_n^2} \quad ; \text{ Coeficiente de pérdidas.}$$

Para la segunda etapa la función objetivo tiene la siguiente forma

$$G_{2opt} = \min \left\{ \begin{array}{l} k_0 + k_1 Q_2 + k_2 Q_2^2 + k_{0,1} \\ + k_{1,1} Q_1 + k_{2,1} Q_1^2 \end{array} \right\} \quad \dots(11)$$

$$Q_{m\acute{i}n} \leq Q_1 \leq Q_{1m\acute{a}x}$$

$$Q_{2m\acute{i}n} \leq Q_2 \leq Q_{2m\acute{a}x}$$

Resolviendo (11) y encontrando la dependencia

$Q_{2opt}(Q_{2total})$ y $Q_{1opt}(Q_{2total})$ se tiene que:

$$Q_{2opt} = \frac{k_{21}}{k_{21} + k_2} Q_{2tot} + \frac{k_{11-k1}}{2(k_{21} + k_2)} \quad \dots(12)$$

donde:

$$Q_{2total} = Q_{1opt} + Q_{2opt}$$

Sustituyendo la ecuación (12) en (14) se obtiene la función optimal de los gastos G_{2opt} en el intervalo de la restricción del min.

$$G_{2opt} = k_{0eq} + k_{1eq} Q_{2total} + k_{2eq} Q_{2total}^2 \quad \dots (13)$$

$$Q_{2total1} [\text{mín}, \text{máx}] = \left(\frac{k_{21}}{k_2} + 1 \right) Q_1 [\text{mín}, \text{máx}] + \frac{k_{11-k1}}{2k_2}$$

$$Q_{2total2} [\text{mín}, \text{máx}] = \left(\frac{k_2}{k_{21}} + 1 \right) Q_2 [\text{mín}, \text{máx}] - \frac{k_{11-k1}}{2k_{21}}$$

donde:

$Q_1 [\text{mín}, \text{máx}]$; $Q_2 [\text{mín}, \text{máx}]$: Fronteras admisibles de la magnitud de la potencia de la primera y segunda fuente sucesivamente.

$$Q_{2total1} \cap Q_{2total2} \quad \dots(14)$$

En el intervalo

$$Q_{2total2max} \leq Q_{2total} \leq Q_{2totalmax} \quad \text{la función de los gastos}$$

es igual a:

$$G_{2opt1} = k_{0eq1} + k_{1eq1} Q_{2total} + k_{2eq1} Q_{2total}^2 \quad \dots(15)$$

$$Q_{2opt} = Q_{2máx}$$

Para el intervalo

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

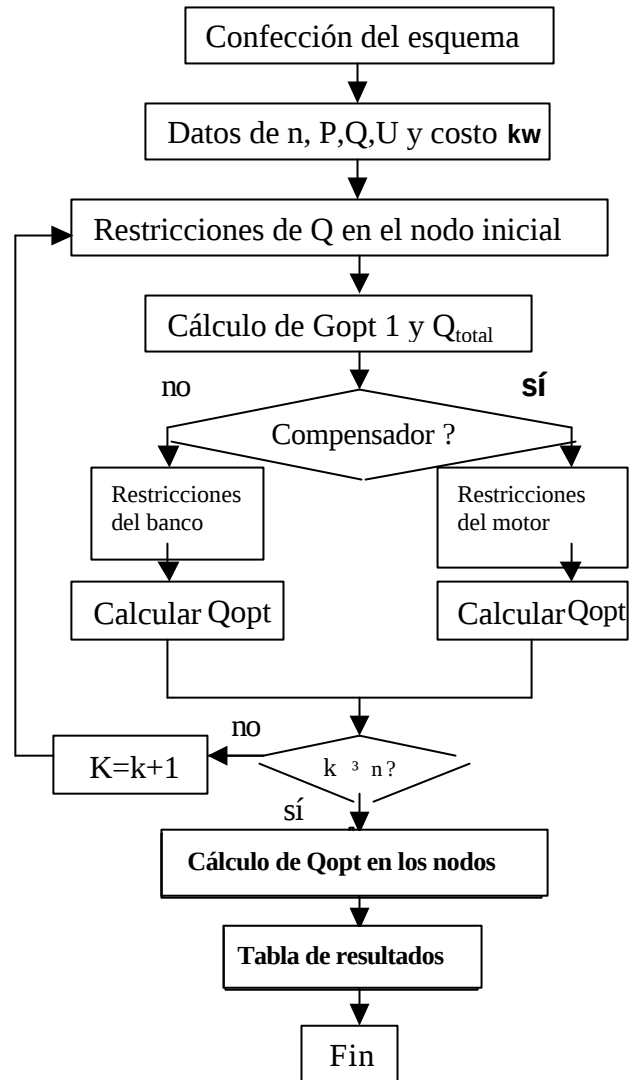
$$G_{2opt2} = k_{0eq2} + k_{1eq2} Q_{2total} + k_{2eq2} Q_{2total}^2 \quad \dots(16)$$

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

De manera tal que la función óptima de los gastos en la segunda etapa es una función discontinua por tramos, compuesta de tres polinomios (13), (15), (16).

ALGORITMO DE CÁLCULO

A continuación se presenta el algoritmo de cálculo desarrollado. La programación se realizó en Delphi, (figura 1).



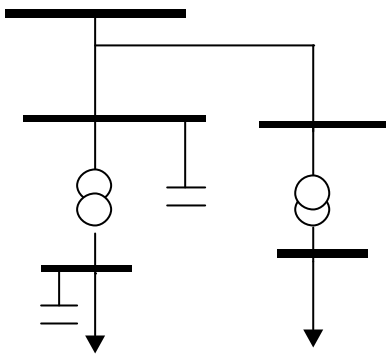
Algoritmo del programa.

1

Este algoritmo permite realizar la selección óptima del banco de condensadores y puede ser utilizado para evaluar el control del reactivo en una red industrial a partir de la modelación del sistema y la corrida de los flujos de potencia teniendo en cuenta los valores obtenidos en los distintos intervalos calculados.² Esto a su vez constituye una herramienta importante para la automatización de las subestaciones y facilitar la operación de los centros de cargas.⁷

CASO DE ESTUDIO

Para el esquema mostrado en la figura 2 se realizó una corrida, obteniéndose los resultados mostrados en las tablas 1 y 2.



Esquema de conexión de los bancos de condensadores.

2

Restricciones del sistema

$$0 \leq Q1 \leq 0,30$$

$$0 \leq Q1 \leq 0,25$$

$$0 \leq Q2 \leq 0,80$$

Tabla 1 Valores de los gastos		
	T1	T2
K_0 BC1	0	0
K_1 BC1	4900	4900
K_0 BC2	100	100
K_1 BC2	4100	4100
K_p	453	408
$K_{1,1}$	4579	4573
$K_{2,1}$	453	408
$K_{0,1}$	57	65,28

Tabla 2 Resultados obtenidos			
Capacidad de los bancos (MVar)		Gastos óptimos (\$)	
T1	T2	T1	T2
0,27	0,23	875,0	1134,3

Este resultado tiene en cuenta los costos del MVar acorde con los niveles de voltaje y las exigencias técnicas del sistema.

CONCLUSIONES

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

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.

REFERENCIAS

1. Arzola Ruiz, J.: *Sistemas de Ingeniería*, Ed. Félix Varela, Ciudad de La Habana, 2000.
2. Fuerte-Esquivel, C.R; E. Acha and H. Ambriz Pérez: "A Comprehensive Newton- Raspón UPFC Model for the Quadratic Power Flow Solution of Practical Power Networks", *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 15, No.1, February, 2000.
3. Graovac, D.; V. Katic and A. Rufer: "Power Quality Compensation Using Universal Power Quality Conditioning System, *IEEE Power Engineering Review*, December, 2000.
4. Grudin, N.: Reactive Power Optimization Using Successive Quadratic Programming Method, *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 13, No.4, November, 1998.
5. Palau, G. y S. M. Ramírez: "Compensación de la potencia reactiva en sistemas eléctricos", *Revista Geología y Minería*, Cuba, 1999.
6. Yehia, M.; R. Ramadan; Z. El-Tawil and K. Tarhini: "An Integrated Technico-Economical Methodology for Solving Reactive Power Compensation Problem", *IEEE, Transactions on Power Systems*, Vol. 13, No. 1, February, 1998
7. Travers, D. L. and R. J. Kaye: "Dynamic Dispatch by Constructive Dynamic Programming", *IEEE, Transactions on Power Systems*. Vol. 13, No. 1, February, 1998.
8. Barquin, J.; T. R. Gómez; R. J. Alba AND M. P. Sánchez: "Reactive Power Pricing: A Conceptual Framework for Remuneration and Charging Procedures. *IEEE, Transaction on Power Systems*, Vol. 15, No. 2, May, 2000.
9. Carrillo Caicedo, G. and J. F. Petit Suárez: "Fictitious Power Compensation of Distribution Feeders" *Large Engineering Systems Conference Series*, Halifax, Canada, 2000.

AUTORES

Iliana González Palau
Ingeniera Electricista, Profesora Auxiliar, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba
e-mail: igonzalez@ismm.edu.cu

Secundino Marrero Ramírez
Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Instituto Superior, Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba
e-mail: smarrero@ismm.edu.cu