

CONCLUSIONES

- El simulador corrobora las propiedades de explotación de un Sistema de Accionamiento Eléctrico Automatizado por las técnicas del control clásico.
- Se ofrece un programa para preparar un Sistema Controlador-Convertidor-Motor con opciones de manejo adaptable del mismo (Richard 1988).
- Abre el camino para realizar futuros estudios en el área del Control de Electrónica de Potencia asistida por las técnicas de Inversores con Filtros Resonantes que alimentan Motores de Inducción gobernados por la Teoría del Campo Orientado.

BIBLIOGRAFÍA

- ANDERSON, G. y S. SVENSON: «Digital and Analog Simulation of Integrated AC and DC Power System» CIGRE, 14-02, 1984.
- ARAI, J. y Y. NORO: «An Induction Machine Model for an Analog Power System Simulator» IEEE, *Transaction on Power Systems*, 8 (4), Nov. 1993.
- DOI, H.; M. GOTO; T. KAWAI; YOKOKAWA yd T. SUZUKI: «Advanced Power System Analog Simulator», 90 WM242-8 PWRs, IEEE 7 PES Winter Meeting, 1990.
- ERTEM, S. y Y. BAGHZOUZ: «Simulation of Induction Machinery for Power System Studies», IEEE / PAS Summer Meeting 88SM685-0, 1988.
- IVANOV, I. y N. SMOLENSKI: *Máquinas eléctricas*, tomo III, Moscú, Editorial Mir, 1988.
- JASMIN, G.: «Electronic Simulation of a HydroGenerator with Static Excitation», IEEE Trans on PAS, Vol. PAS-100, No. 9, Sep. 1981.
- KEYHANI, A. y H. TSAI: «Ispice Simulation of Induction Machines with Saturable Inductances» IEEE / PAS Summer Meeting 88SM685-0, 1988.
- KRAUSE, P. y C.H. THOMAS: «Simulation of Symmetrical Induction Machinery», IEEE Trans on PAS, Vol. PAS-84, No.11, Nov. 1965.
- KOPILOV, I.P.: *Máquinas eléctricas*, Moscú, Editorial Mir, 1986.
- HERRANZ, E.: *Convertidores electromecánicos de energía*, Moscú, Editorial Mir, 1989.
- NORO, Y.; J. ARAI y M. OTSUKI: «Development of High-Precision Power System Simulators», IFAC Symposium on Power Systems and Power Plant Control, Korea, August. 22, 1989.
- RICHARDS, G.: «Reduced Order Models for an Induction Motor Group during Bus Transfers», IEEE / PAS Summer Meeting, 88SM685-0, 1988.
- SHIEH, LEANG-SAN; WANG WEI-MIN y W. JOHN SUNKEL: «Design of PAM and PWM Controllers for Sampled-Data Interval Systems», *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 118, December 1996.
- VENIKOV, L.: *Procesos transitorios de potencia*, Moscú, Editorial Mir, 1988.

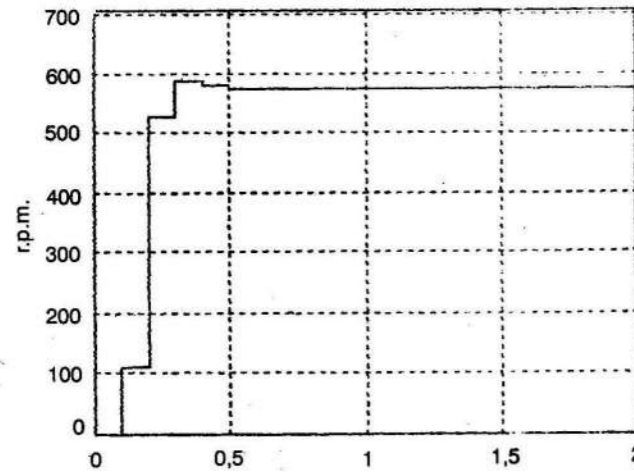


FIGURA 5. Comportamiento de la velocidad.

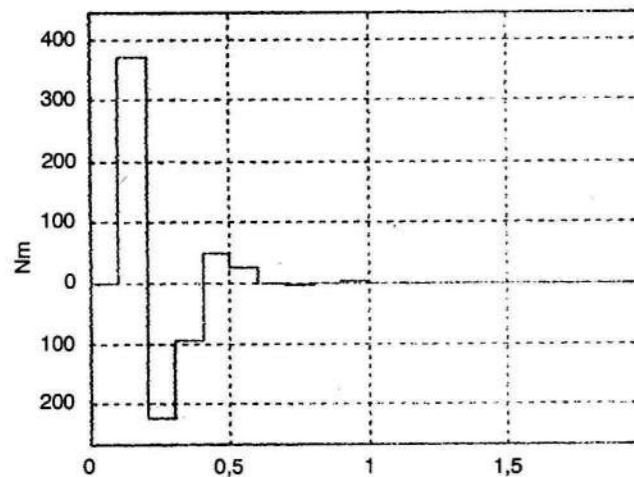


FIGURA 6. Comportamiento del Momento.

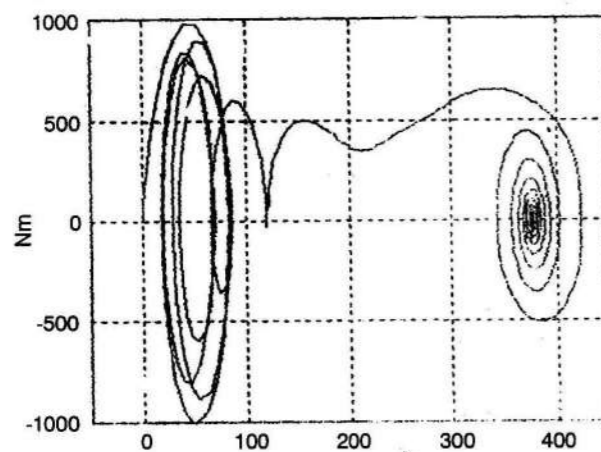


FIGURA 7. Característica Mecánica.

Compensación de la potencia reactiva en sistemas eléctricos

Ileana González Palau¹
Secundino Marrero Ramírez²

¹Ingeniera eléctrica. Profesora Asistente del Departamento de Eléctrica. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
²Doctor y Profesor Titular del Departamento de Eléctrica. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

INTRODUCCIÓN

El ahorro de energía es una tarea de vital importancia por su incidencia en los indicadores técnico-económicos de la producción industrial. Un factor fundamental que garantiza una mayor eficiencia y ahorro en la producción y distribución de la energía eléctrica es el control de los indicadores energéticos en la carga, los cuales permiten evaluar el costo asociado al consumo de energía reactiva por los consumidores industriales.

Los motores sincrónicos sobreexcitados y, fundamentalmente, los bancos de capacitores estáticos, son empleados en los sistemas industriales como fuentes generadoras de potencia reactiva.

El consumo de potencia reactiva tiene efectos perjudiciales para la operación del sistema eléctrico: incrementa las pérdidas de energía por las transferencias de componente de la carga, disminuye el voltaje de operación de los nodos de carga, reduce la capacidad eléctrica de los generadores, transformadores, líneas y otros elementos componentes del circuito, además de tener un efecto económico negativo por la reducción del factor de potencia.

De la energía eléctrica consumida en el sector industrial, un 60 % se emplean en motores sincrónicos, un 20 % en transformadores e inductores, equipos todos que responden a un porcentaje elevado del componente reactivo de la carga debido a que un motor de inducción en su funcionamiento necesita mantener su campo magnético giratorio, aún cuando el motor esté girando en vacío sin efectuar ningún trabajo. Esto hace que el equipo se convierta en el consumidor de energía reactiva más importante. Le sigue en importancia los transformadores que necesitan de un flujo magnético para inducir y mantener el voltaje en sus enrollados secundarios. La otra fuente de consumo de energía reactiva a nivel industrial la constituyen las inductancias que se utilizan en las lámparas de gas (mercurio, sodio, fluorescentes) comunes en el alumbrado de talleres, oficinas y otras áreas.

Por otra parte, debe considerarse que la demanda reactiva de la industria no sólo afecta la operación del sistema de suministro eléctrico industrial, sino también el sistema electroenergético.

Los motores sincrónicos sobreexcitados y, fundamentalmente, los capacitores estáticos son empleados en los sistemas industriales como fuentes generadoras de potencia reactiva que pueden ser localizados en los puntos de carga para compensar su demanda reactiva.

ANÁLISIS DE LA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA

Para la racionalización de los consumos con vista a mejorar las pérdidas de energía es necesario, primeramente, realizar un acomodo de la carga de la industria, para lo cual se deben tomar las siguientes medidas:

- Reorganizar el flujo de producción que garantice la productividad y al mismo tiempo la disminución del consumo de energía.
- Garantizar la calidad en las reparaciones del equipamiento.
- Sustituir los motores subcargados por motores de una menor capacidad.

- Siempre que sea factible y el régimen tecnológico lo permita, se deben realizar cambios de los motores de inducción por los motores sincrónicos.
- Limitar el trabajo en vacío de los equipos.
- Utilizar las técnicas modernas de accionamiento con vista a mejorar los regímenes de trabajo de las máquinas eléctricas.

Actualmente en la industria estos aspectos son tratados en las auditorías energéticas con el fin de definir

cuáles son los factores que inciden en su bajo factor de potencia. Esto puede efectuarse por la metodología que se muestra en la Figura 1, donde se tiene en cuenta un estudio de las condiciones de explotación de la red, actualización de los consumidores y sus características, el análisis de las mejoras posibles con el empleo de medidas organizativas, y la compensación en los diferentes niveles de tensión considerando las fuentes de potencia reactiva más apropiadas para ser empleadas, así como el resto de los indicadores técnico-económicos.

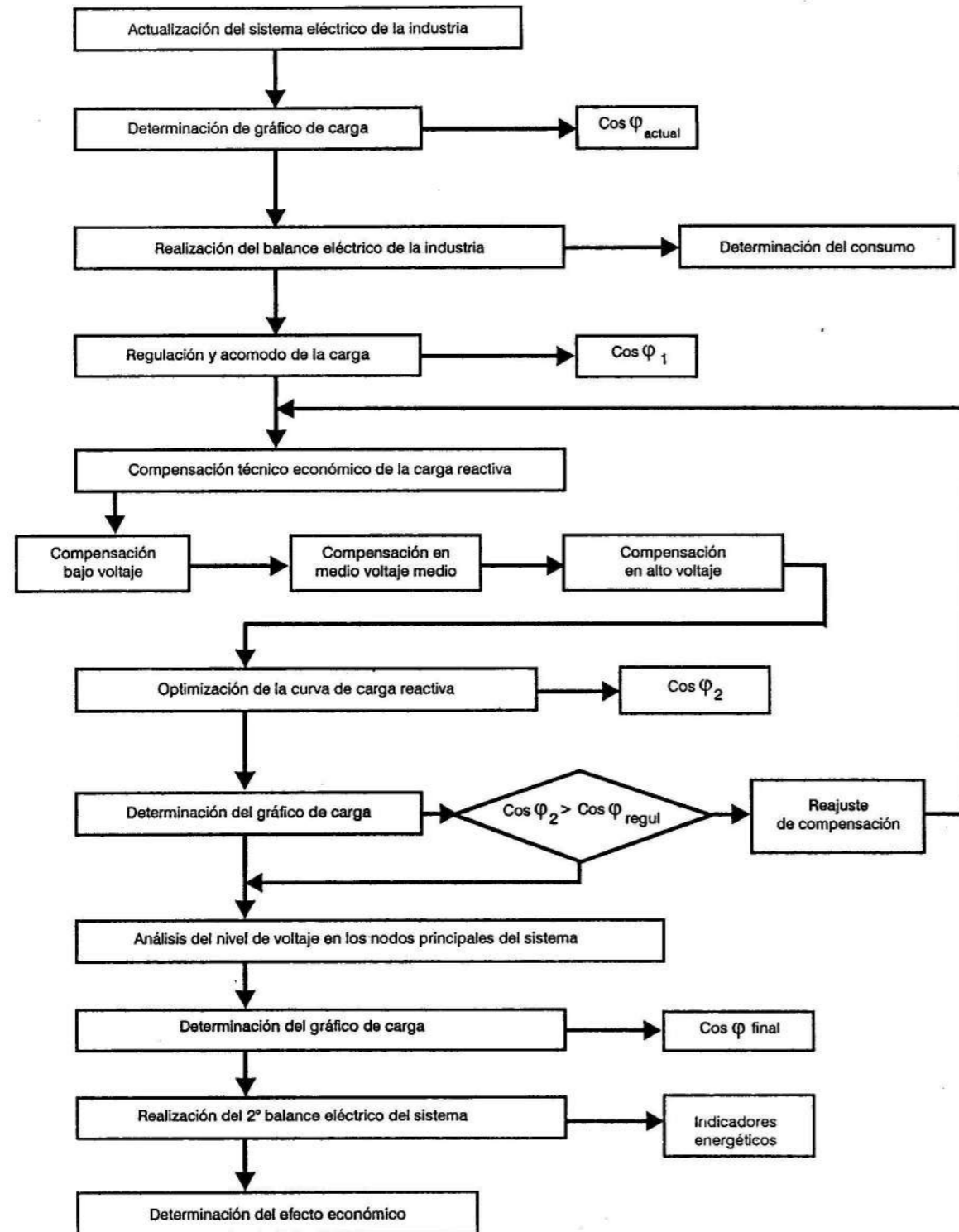


FIGURA 1. Metodología de cálculo para la minimización de las pérdidas de energía.

El nivel alcanzado en las técnicas de medición y la introducción de la computación permite la creación de sistemas informativos en redes eléctricas para el control óptimo del sistema electroenergético. En la Figura 2 se propone un algoritmo para la toma de información en un sistema eléctrico.

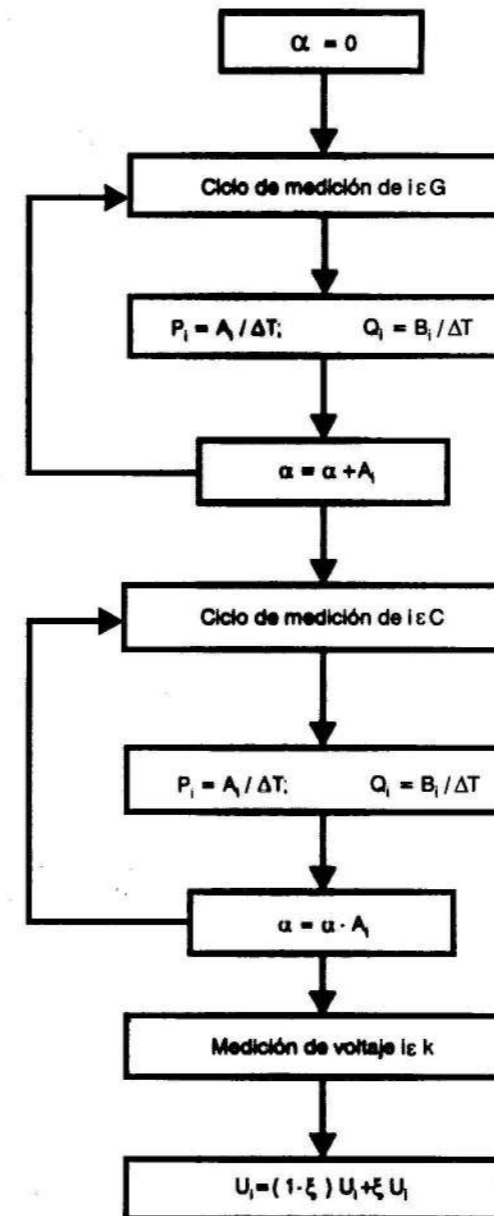


FIGURA 2. Algoritmo de programación dinámica.

Sin embargo, no es posible efectuar el control óptimo de un sistema si no se tiene el volumen de información suficiente de los parámetros del sistema. La efectividad puede regirse por la siguiente expresión. (Leporski, 1984)

$$E / E^* = 1 - B_0 e^{-J/J_0} \quad (1)$$

donde:

- E : Efectividad económica lograda cuando se manipula la información.
- E^* : Efectividad económica límite
- J_0 : Volumen de información de trabajo del sistema
- J : Incremento del volumen de información

Las mediciones automáticas de la potencia P y Q en los nodos de generación y carga en el sistema eléctrico permiten dar solución a los problemas técnicos de los sistemas informativos. Con vista a obtener el vector X que caracteriza la variable de estado del sistema en un instante de tiempo dado, se utiliza la expresión.

$$X = (P, Q, q, U)^T \quad (2)$$

Donde:

- X : Vector de estado de sistema
- P, Q : Potencia activa y reactiva
- q, U : Ángulo y módulo de la tensión

Para la optimización del sistema no siempre es posible utilizar los métodos adaptivos debido a que en ocasiones la información que se posee no permite alcanzar los objetivos propuestos, por lo que es necesario en estos casos, la elaboración de modelos, los cuales en sentido general son elaborados a partir de los parámetros del sistema y no a partir de las perturbaciones. Para elegir el método a emplear se debe recurrir a un análisis técnico-económico.

El modelo del sistema puede ser estático o dinámico. En los casos en que se necesite realizar el control óptimo del sistema puede ser empleado un modelo estático que permite simplificar los cálculos partiendo del circuito equivalente.

Modelo estático del sistema

Consideraciones que se tienen en cuenta:

- Considerar los transformadores y los parámetros de las líneas, en el circuito equivalente del sistema.
- Seleccionar de los nodos de generación y de carga del sistema.
- Dar los valores del ángulo y módulo de la tensión (θ, U) en los nodos de generación y la potencia activa y reactiva (P, Q) en los nodos de la carga.

Para la elaboración del modelo estático se utiliza la primera ley de Kirchoff y la ley de Ohm, planteándose en cada nodo i del esquema.

$$\sum_{k \in c} J_{ik} = I_i \quad (3)$$

$k \in c$: nodos que tienen enlace con los nodos i

I_{ik} : corrientes en las ramas

I_i : corrientes que entran al nodo

i : nodos de generación

k : nodos de carga

Por la ley de Ohm

$$I_{ik} = Y_{ik} (U_i - U_k) \quad (4)$$

U_i, U_k : tensiones en los nodos de generación y carga

Y_{ik} : conductancia entre los nodos i y k

Sustituyendo (4) en (3)

$$Y_{ik} (U_i - U_k) = I_i \quad (5)$$

La potencia eléctrica se determina como la multiplicación del complejo de la tensión.

$$S = \hat{U} \hat{I} = P + jQ \tag{6}$$

A partir de la igualdad (5) se obtiene

$$\hat{I}_i = \sum_{k \in c} \hat{Y}_{ik} (\hat{U}_i - \hat{U}_k)$$

La expresión para la potencia en el nodo dado sería

$$U_i \sum_{k \in c} \hat{Y}_{ik} (\hat{U}_i - \hat{U}_k) = P_i + jQ_i \tag{7}$$

$$U = U e^{j\theta}$$

$$U = U e^{j\theta} \tag{8}$$

Colocando las expresiones (8) en (7) se obtiene

$$U_i^2 \sum_{k \in c} Y_{ik} e^{j\theta} - U_i \sum_{k \in c} Y_{ik} U_k e^{j(\theta_k + \theta_i - \theta)} = P_i + jQ_i \tag{9}$$

Obtenemos:

$$U_i^2 \sum_{k \in c} Y_{ik} \cos \varphi_{ik} - U_i \sum_{k \in c} Y_{ik} U_k \cos (\varphi_{ik} + \theta_k - \theta) = P_i \tag{10}$$

$$-U_i^2 \sum_{k \in c} Y_{ik} \sin \varphi_{ik} + U_i \sum_{k \in c} Y_{ik} U_k \sin (\varphi_{ik} + \theta_k - \theta) = Q_i \tag{11}$$

Las ecuaciones (10) y (11) se pueden escribir para todos los nodos del sistema y se resuelven por los métodos matemáticos conocidos. Se obtiene el factor de pérdida de potencia activa, (12), que constituye la función objeto, y permite elaborar el criterio de optimización teniendo en cuenta los factores que inciden en la eficiencia económica y la calidad de la energía suministrada.

$$\Pi = \sum_{i=1}^m P_i (\theta_i, \theta_k, U_i, U_k) \tag{12}$$

Una vez establecida la función objeto así como las restricciones se procede a realizar la optimización con el empleo de los métodos de optimización estática o dinámica. Esta última resulta más ventajosa ya que facilita el

control automático a través de una trayectoria óptima y considera el comportamiento dinámico de los indicadores de calidad de la energía. Habitualmente estas tareas se formulan por medio de un conjunto de ecuaciones diferenciales o ecuaciones en diferencia.

Si utilizamos la programación dinámica donde el vector de estado X se determina como:

$$X = (X_1, X_2, X_3, \dots, X_m) \tag{13}$$

Donde:

m : dimensión del objeto

La magnitud X asume todos los valores tecnológicos admisibles dando lugar al conjunto Q. El criterio de optimización se puede expresar a través de la función continua y escalar G(X). Se alcanza el óptimo para el vector de estado X*, que garantiza un mínimo o un máximo del criterio de optimalidad. Si consideramos que criterio de optimalidad se determina como un mínimo, entonces debemos hallar el vector de estado X* de la condición.

$$G(X^*) = \min_{x \in Q} G(X) \tag{14}$$

Para X se debe cumplir que:

$$X_i^{inf} \leq X \leq X_i^{sup}$$

X_i^{inf}, X_i^{sup} Representa los valores límites inferior y superior de variable de estado.

$l = 1, 2, 3, \dots, n$ -Índice de la función de restricción.

Para seleccionar las coordenadas de variación en cada uno de los pasos de la programación con vista a minimizar el criterio de optimalidad es factible utilizar la siguiente condición.

$$\min [g(X_i^k)(X_i^{k+1} - X_i^k)] \tag{15}$$

$g(X_i^k)$: derivada parcial del criterio de optimalidad.

El algoritmo general de la programación se muestra en la Figura 3.

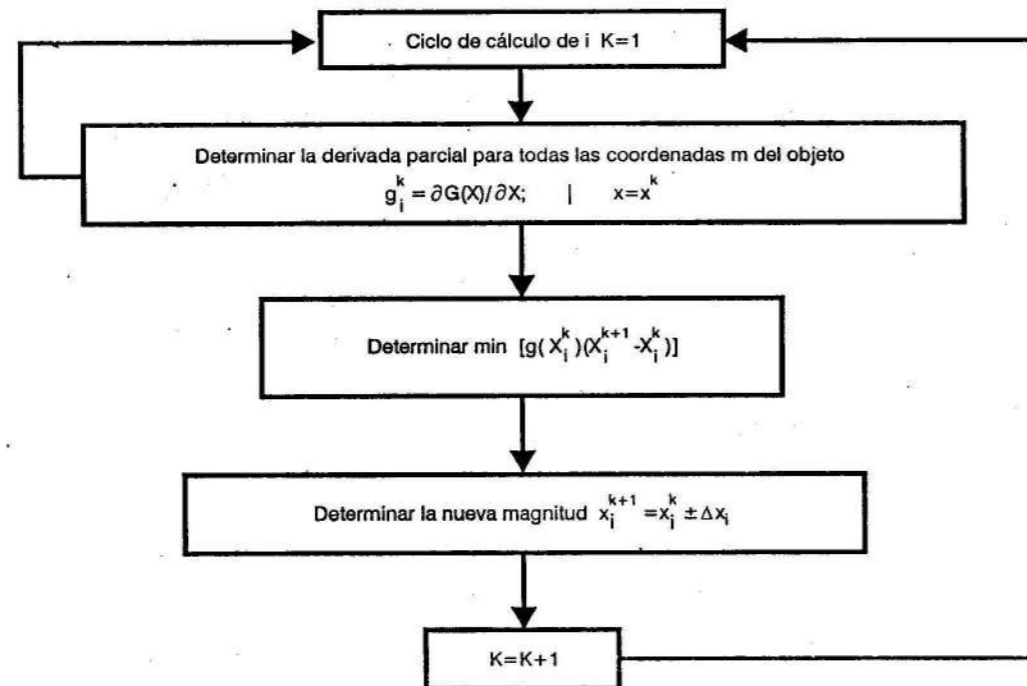


FIGURA 3. Algoritmo para la toma de información.

Inicialmente para el valor $k = 1$ se obtiene la información del objeto de control, y se determina la magnitud del vector X^k ; una vez determinada la derivada parcial g_i^k para todas las coordenadas de estado del objeto se determinan a través de la condición:

$\min [g(X_i^k)(X_i^{k+1} - X_i^k)]$ si se tiene en cuenta el signo de la derivada se procederá a la variación del sentido de las coordenadas donde, ΔX_i es el incremento igual para todos los pasos, después se realiza la acción de control del objeto, luego de un tiempo de espera seleccionado con anterioridad se procede a incrementar el valor de K y se inicia nuevamente el ciclo de obtención de información sobre el objeto.

CONCLUSIONES

La metodología de cálculo mostrada y la aplicación del control óptimo permite la disminución de las pérdidas de energía y la compensación de la carga reactiva, lo cual implica beneficios económicos para la industria.

El uso de la optimización a través de una función objeto teniendo en cuenta la existencia de un sistema informativo adecuado garantiza la minimización de las pérdidas en el sistema.

El empleo de la modelación y la programación dinámica permite efectuar la optimización de forma automática teniendo en cuenta la fuente de compensación de energía reactiva mas racional según sea el caso, considerándose los indicadores de calidad de la energía.

BIBLIOGRAFÍA

ABRIL, I.P.: «Compensación de potencia reactiva en sistemas industriales mediante banco de capacitores», Resumen tesis doctorado, UCLV, Villa Clara, 1994.

ANDREI, R.G y A.J. KERI: Brige Capacitor Bank Installation Concept Reactive Power generation in EHV Systems. *American Electric Power Service*. IEEE, 1993 :1-5.

ANDREI, G.R.: *Instalación de capacitores en puente para la compensación de potencia reactiva*, American Electric Power Service, IEEE, Transaction on Power Systems, 2 (2), 1993.

BOIZAN, A.M.: *Optimización*, Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 1988.

LEPORSKI, D.V.: *Automatización, dirección, pérdidas tecnológicas y consumo de energía eléctrica*, Edit. Técnica, Kiev, 1984.

PÉREZ, L.M.: *Optimización de la generación de potencia activa usando programación lineal*, Ing. Energética. 2 (12), 94 :65-70.

RODRIGUEZ, L.J.: *Distribución óptima de la carga eléctrica mediante programación dinámica*, Ing. Eléctrica. 2 (13), 1992 :85-95.

RAYTHEON: *Engineers and Constructors*, Electric Distribution Systems Engineering Handbook, Third Edition, Canada, Printice Hall, 1992.

TESIS DE DOCTORADO DEFENDIDA EN EL CURSO 97-98 EN EL INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA

Vías para garantizar los trabajos en las minas asfálticas de Cuba en condiciones higiénico-sanitarias adecuadas

Autor: Roberto Lincoln Watson Quesada
Profesor Asistente del Departamento de Minas

Síntesis:

La formación de grandes nubes de polvo durante la explotación de los yacimientos subterráneos de asfaltita constituye un factor de riesgo para la salud de los mineros ya que para este tipo de materia prima, a diferencia de otras, no se conocen métodos de eliminación del polvo dentro de las minas.

A partir de la determinación experimental de las propiedades físicas de la asfaltita y de la caracterización del medio laboral en la mina, el autor propone métodos y medios para la eliminación del polvo. Entre los aspectos novedosos del trabajo se encuentran: la determinación del ángulo de las interfases líquido-sólido-gas que caracteriza la humectabilidad de la asfaltita; la construcción de las instalaciones de laboratorio; la elaboración de una metodología de experimentación para determinar las características aerodinámicas del polvo de asfaltita y la obtención de la fórmula de cálculo de la velocidad de precipitación del polvo, así como las curvas que caracterizan el régimen de precipitación.