

del 100 % del Ni que potencialmente puede aportar la reducción, el pronóstico de Co a extraer todavía está por comprobar debido a su relatividad con respecto al tipo de mineral y a la situación actual de cada empresa.

Para el resto del circuito tecnológico, la experiencia de la QNI es ejemplar (Reid, 1991; Taylor 1995), a tal punto que la magnitud de la recuperación general de la tecnología no se diferencia en gran medida de la obtenida por GRV (ver Tabla 4) a pesar de la notable disminución de la extracción potencial de Co en QNI. La introducción de las modificaciones al tradicional proceso CARON basada en la extracción por solvente orgánico (Nielsen & Siemens, 1983; Taylor, 1995) disminuyeron las pérdidas de Co hasta 1-5 % y las de Ni hasta 1-2 % con respecto a la extracción lograda después de lixiviado y lavado el mineral.

CONCLUSIONES

Sin aspirar a una aceptación masiva de algunas e incluso de todas las direcciones de trabajo propuestas para incrementar la eficiencia metalúrgica por Ni y Co, estas demuestran las diversas posibilidades que existen para disminuir los costos de producción de Ni + Co y hacer más competitiva la tecnología carbonato-amoniaca a nivel mundial.

BIBLIOGRAFÍA

- ALMAGUER, F. A.: «Estudio de la distribución de Fe, Ni y Co en los tamaños de los granos que componen el perfil de las cortezas de intemperismo de las rocas ultrabásicas hasta un desarrollo laterítico y su relación con la mineralogía», en: *Minería y Geología*, 2 (2):17-27, 1993.
- BERNAL, H.S.: «Dirección de la calidad de la mena en el yacimiento Moa», Resumen de la disertación para Doctor en Ciencias Técnicas, San Petersburgo, Rusia. 1989, 20 pp. (en ruso)
- BURKIN, A.R. et al.: *Extractive Metallurgy of Nickel*, Imperial College, London, 150 pp., 1987.
- CASTELLANOS, S.J.: «Algunos aspectos sobre la transformación de fases durante la reducción de la serpentina con aditivo y su influencia en la recuperación de Ni», en: *Revista Tecnológica*, (1) :51-55, 1987.
- COELLO, V.A.: «Perfeccionamiento de la tecnología de molienda de las menas lateríticas», Resumen de la disertación para Doctor en Ciencias Técnicas, Instituto MEJANOBR, San Petersburgo, Rusia, 20 pp., 1993 (en ruso).
- COLVIN, N. y J.W. GULYAS: «The Marinduque Surigao Nickel Refinery», in: *International Laterite Symposium*, AIME, N.Y., New Orleans, pp. 346-356, 1979.
- CORDEIRO, N.C. y otros: «Determinación experimental de la distribución del Ni en las macrofases del material laterítico cubano», en: *Minería y Geología*, (2): 57-71, 1987.
- CHANDERS S. y V.N. SHARMA: «Reduction Roasting/Ammonia Leaching of Nickeliferous Laterites», en: *Hydrometallurgy*, (7):315-327, 1981.

- CHANDRA, AD.; R.E. SIEMENS y O.R. CLAYTON: «Electron-Optical Characterization of Laterites Treated with a Reduction-Roast/Ammoniacal - Leach System», en: *Journal of Metals*, 32 (5) : 26-33, 1980.
- CHANG, A.R.: «Perfeccionamiento de la tecnología de la Empresa «René Ramos Latour» Nicaro, Cuba, Tesis de Doctorado en Ciencias Técnicas, Universidad Técnica de San Petersburgo, Rusia, 1989, 150 pp. Depositado en fondo de I. C. T. de la Academia de Ciencia de Cuba en 1990 (en ruso).
- CHANG, A.R. y otros: «Estudio de las particularidades estructurales y composición de fase de los productos de la hidrólisis de los iones de hierro a partir de licores carbonato-amoniaca», en: *Tsvetnie Metally*, (9) : 30-34, 1995 (en ruso).
- : «Cinética de la lixiviación carbonato-amoniaca del mineral laterítico reducido industrialmente bajo aereación diferenciada», en: *Minería y Geología*, 15 (3): 23-29, 1998.
- DOBROJOTOV, G.N.: «Composición sustancial de las mezclas carbonato-amoniaca», *Izv. Vuzov. Tsvetnaya Metallurgia*, (6): 71-75, 1986 (en ruso).
- GRIGORIEVA, K.I. y otros: «Solubilidad del Níquel y Cobalto (II) en medios carbonato-amoniaca», *Izv. Vuzov. Tsvetnaya Metallurgia*, (1) : 37-41, 1987 (en ruso).
- NIELSEN, D.N. y R.E. SIEMENS: «Disposition and Control of Impurities in Nickel and Cobalt Solvent Extraction Circuits in the Processing of Laterite-Derived Ammoniacal Leach Liquors», en: *International Solvent Extraction Conference*, Denver, Colorado, 1983, Amer. Institute of Chem. Engin., N.Y., 323 pp.
- OKAJIMA, Y.: «SMM Ammonia Leaching Process for Latertic Ore», *Met. Rev.* MMIJ, 3 (1) : 94-106, 1986.
- OSSEO-ASARE, K. y otros: «Cobalt Extraction in Ammoniacal Solution: Electrochemical Effect of Metallic Iron», in: *Metallurgical Transactions B*, Vol. 14B, December, pp. 571-576, 1983.
- REID, J.G.: «Some Observations of Roasting, Leaching, and Washing Characteristics of Greenvale Lateritic Ore», in: *Hydrometallurgy, Research, Development and Plant Practice*. AIME, New York, pp.109-120, 1982.
- : Conferencia sobre «Disminución de las pérdidas de Ni y Co en Queensland Nickel», en: Seminario Internacional sobre Tecnología de Lixiviación Ácida de minerales lateríticos. SITLA '91. Moa, Cuba, Noviembre, 1991.
- REZVANOV, G.F.: «Extracción de cobalto de las menas de BURUKSTAL, empleando la tecnología hidrometalúrgica», en *Tsvetnie Metally*, (1) : 9-14, 1985 (en ruso).
- ROJAS PURÓN, L.A.: Principales minerales portadores de Ni en los horizontes limoníticos del yacimiento de Moa, *Tesis de Doctorado en Ciencias Geológicas*, 150 pp., 1995. Depositado en fondo de I. C. T. de la Academia de Ciencia de Cuba y del Instituto Superior Minero-Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba.
- SIEMENS, R.E., et al.: «Process for Recovery of Non-Ferrous Metals from Oxide Ores and Concentrates», Cert. Pat (U.S.A.) No. 3,929,468. C.I.P. - C22 B 23/04. Publicado el 30.12.1975.
- TAYLOR, A.: «Process Selection», En Nickel/ Cobalt Laterites Seminar. The How-To's of Project Development, Melbourne, Australia, Organised by: ALTA METALLURGICAL SERVICES, May 4-5, 1995.
- : «Laterites-has the Time Finally Come?», *Mining Magazine*, pp. 167-170, March, 1995.

Simulador para análisis de motores de inducción con mando adaptivo de inversores sinusoidales de potencia

Luis Delfín Rojas Purón

Profesor de Máquinas y Accionamientos Eléctricos Automatizados. Departamento de Eléctrica. ISMM

INTRODUCCIÓN

El análisis de sistemas de potencia y el ajuste de controladores en los dispositivos que intervienen en los procesos de conversión de energía usualmente necesitan de una cualidad determinada en sus parámetros principales (Herranz, 1989), no solo para garantizar la adecuada coordinación del sistema, sino también porque se pone en juego la racionalidad del aprovechamiento de la energía.

Es de nuestro interés, mostrar un sistema que le permita al especialista evaluar con suficiente predicción el comportamiento del sistema, en especial un sistema Inversor Sinusoidal de Voltaje (VSI) con modulación por ancho de pulso (PWM), muy utilizado en accionamientos de bombas, ventiladores, compresores, máquinas herramientas con cargas típicas ventilador, donde se exige una regulación relativamente suave de la velocidad a torque constante.

Hoy en día, estos convertidores operan con filtros resonantes para aprovechar los efectos de almacenamiento de energía en bobinas y capacitores, y obtener un proceso más adecuado para los dispositivos de control y protección. El uso de simuladores está justificado también en sistemas de protección sobre todo cuando estos se preparan para trabajar en tiempo real (Anderson y Svenson 1984, Arai y Noro 1993, Doi, Goto y Kawati 1990).

Los modelos para una máquina de inducción (MI), y una máquina sincrónica (MS) son aceptablemente definidos. El modelo del motor de inducción (MMI), ha sido muy manipulado, pero la fuente VSI con la carga MI no ha sido analizada en su conjunto como sistema con los elementos resonantes. Otro aspecto interesante lo es el manejo vectorial de estos con la Teoría del Campo Orientado.

El desarrollo de simuladores de alta precisión se obtiene cuando en ellos se incluyen todas las características (Krause y Thomas, 1965) y especificidades de las fuentes y los tipos de cargas del sistema en cuestión. La máquina de inducción ha sido examinada en detalles en computadoras, con modelos que en esencia no difieren mucho unos de otros (Keyhani y Tsai, 1988). Lo más interesante está en concebir la máquina como elemento de salida conectada a una red de corriente alterna como consumidor reactivo de corriente (Arai y Noro, 1993). Otro brinda un modelo como interface de un voltaje de entrada y corriente de salida con la red (Ertm y Baghzouz, 1988). Esto fue mejorado por Junichi Arai y Yasuhiro Noro en sus análisis, en 1993.

Nuestro simulador, para mayor aplicación, es concebido para el manejo del VSI-MI con circuitos resonantes y sin ellos, porque en nuestras industrias se instalan sistemas convertidores de diversos tipos.

RESUMEN: Se ofrece una herramienta para el estudio de inversores sinusoidales de voltaje con mando PWM para motores de inducción que operan a frecuencias elevadas con el objeto de disminuir reactivos, y de esta forma aprovechar más racionalmente la potencia electromagnética de la máquina. El control del inversor se asiste por un sistema adaptativo, el cual brinda mejores cualidades de regulación con ajuste casi simultáneo de la sinusoide, lo cual facilita el manejo en conjunto del convertidor-motor-filtros, en aras de disminuir reactivos en el motor. Con este programa se consigue facilitar la simulación de los procesos de operación del accionamiento bajo control adaptable.

ABSTRACT: To offer a tool for the study of Voltage Sinusoidal Inverter with drives PWM of Induction Motors that operating to high frequency, thus its takes less reactives and the machines works a electromagnetic power more rational. The Inverter Controlled to aids through Adaptive system, which has best quality of regulation with setpoint just instanted of the sinusoide wave, its facility drives together of group Filter-Motor-Converter, with object to reduce reactivos. This program facility the simulation of the process of Electric Drives Adaptive Controlled.

Palabras claves: simulación, inversores sinusoidales, control adaptable, motores de inducción.

DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA VSI - MMI

Las consideraciones para nuestro sistema son las siguientes:

- El motor de inducción está modelado en los ejes dd-qq.
- El entrehierro uniforme.
- El circuito magnético lineal.
- Los circuitos del estator y rotor son simétricos.

El modelo general de la máquina de inducción en el sistema de coordenadas parte de su circuito equivalente (Figura 1).

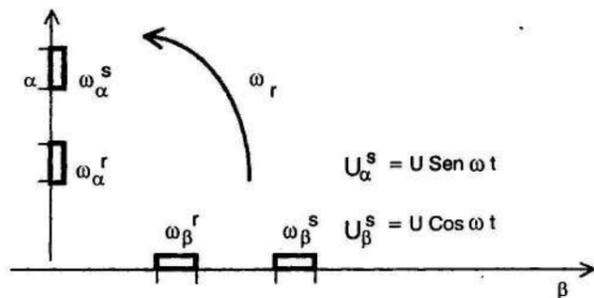


FIGURA 1. Circuito equivalente de la máquina de inducción.

La matriz de la máquina de inducción está determinada por:

$$\begin{pmatrix} U_\alpha^s \\ 0 \\ 0 \\ U_\beta^s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_\alpha^s + d/dtL_\alpha^s & d/dtM & 0 & 0 \\ d/dtM & r_\alpha^r + d/dtL_\alpha^r & L_\beta^r \omega_r & M\omega_r \\ -M\omega_r & -L_\beta^r \omega_r & r_\beta^s d/dtL_\beta^s & d/dtM \\ 0 & 0 & d/dtM & r_\beta^s d/dtL_\beta^s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_\alpha^s \\ i_\alpha^r \\ i_\beta^s \\ i_\beta^r \end{pmatrix}$$

Esta matriz constituye conjunto de ecuaciones (1).

$$M_{em} = (m/2) \cdot M (i_\beta^s \cdot i_\alpha^r - i_\beta^r \cdot i_\alpha^s) \quad (2)$$

donde:

U_α^s, U_β^s , son los voltajes en los devanados del estator.

$i_\alpha^s, i_\alpha^r, i_\beta^s, i_\beta^r$, son las corrientes del estator y rotor en los ejes α, β .

$L_\beta^s, L_\alpha^s, L_\beta^r, L_\alpha^r$, son las inductancias propias de los devanados α, β .

$$L = M + L\sigma$$

Las expresiones (1) y (2) describen el proceso de conversión de energía en una máquina de inducción para los regímenes estáticos y transitorios.

Desarrollando la expresión (1) obtenemos:

$$U_\alpha^s = r_\alpha^s i_\alpha^s + d/dtL_\alpha^s i_\alpha^s + d/dtM i_\alpha^r \quad (3)$$

$$0 = d/dtM i_\alpha^r + i_\alpha^r r_\alpha^r + d/dtL_\alpha^r i_\alpha^r + L_\beta^r \omega_r i_\alpha^r + M \omega_r i_\alpha^s \quad (4)$$

$$0 = -M \omega_r i_\alpha^s - L_\alpha^r \omega_r i_\alpha^r + r_\alpha^r i_\alpha^r + d/dtL_\alpha^r i_\alpha^r + d/dtM i_\alpha^s \quad (5)$$

$$U_\alpha^s = d/dtM i_\alpha^r + r_\alpha^s i_\alpha^s + d/dtL_\alpha^s i_\alpha^s \quad (6)$$

Para describir el régimen estacionario de trabajo de la máquina el operador diferencial d/dt se hace igual a $j\omega$, por lo que las expresiones (3) (4) (5) (6) quedan:

$$U_\alpha^s = r_\alpha^s i_\alpha^s + j\omega L_\alpha^s i_\alpha^s + j\omega M i_\alpha^r \quad (7)$$

$$0 = j\omega M i_\alpha^r + i_\alpha^r r_\alpha^r + j\omega L_\alpha^r i_\alpha^r + L_\beta^r \omega_r i_\alpha^r + M \omega_r i_\alpha^s \quad (8)$$

$$0 = -M \omega_r i_\alpha^s - L_\alpha^r \omega_r i_\alpha^r + r_\alpha^r i_\alpha^r + j\omega L_\beta^r i_\alpha^r + j\omega M i_\beta^s \quad (9)$$

$$U_\alpha^s = j\omega M i_\alpha^r + r_\alpha^s i_\alpha^s + j\omega L_\alpha^s i_\alpha^s \quad (10)$$

Aplicando la simetría de los ejes [5]:

$$L_s = L_\alpha^s = L_\beta^s; R_s = r_\alpha^s = r_\beta^s; j\omega L_s = j\omega M + j\omega L_\sigma^s$$

$$L_r = L_\alpha^r = L_\beta^r; R_r = r_\alpha^r = r_\beta^r; j\omega L_r = j\omega M + j\omega L_\sigma^r$$

$$X_o = \omega M : \text{reactancia de la rama de magnetización.}$$

$$X_{os} = \omega L_\sigma^s : \text{reactancia de dispersión del estator.}$$

$$X_{or} = \omega L_\sigma^r : \text{reactancia de dispersión del rotor.}$$

Luego de algunas transformaciones, donde se asume:

$$\omega L_s = \omega M + \omega L_\sigma^s = X_o + X_{ss} \text{ y } k = \omega_r / \omega$$

Puede escribirse:

$$U_s = R_s I_s + jX_{os} I_s + jX_o I_r + jX_o I_s \quad (11)$$

$$0 = -R_r I_r - jX_{or} I_r - jX_o I_s + jX_o I_s k + jX_o I_s k + jX_{os} I_r k \quad (12)$$

Teniendo en cuenta que $I_o = I_s + I_r; (1-k) = 1 - \omega_r / \omega_s = (\omega_s - \omega_r) / \omega_s$

Todas estas expresiones son bases para la simulación del motor, cuyo modelo se implementa en MATLAB y cuyas curvas características se muestran en las Figuras 5, 6 y 7 que aparecen al final. Para el trabajo de la MI los devanados del estator y del rotor se mezclan relativamente uno con otros, pero el ángulo entre sus ejes determina la velocidad de rotación (Ivanov y Smolenski 1988).

En nuestro caso, consideramos la máquina como un convertidor energético (Herranz 1989) ya que transforma la energía eléctrica en energía mecánica y viceversa, alimentado a través de una fuente que es gobernada atendiendo a las exigencias de algunas variables como corrientes, voltajes y velocidad en cada una de las fases del motor.

MANEJO ADAPTIVO DE INVERSORES PWM CON FILTROS RESONANTES

Cada vez es más necesario garantizar la calidad de las ondas sinusoidales que entregan las fuentes inversoras de voltajes PWM porque las cargas industriales, en especial los motores de inducción, exigen para su funcionamiento una señal bien definida, sin demasiadas componentes de armónicos que distorsionan y causan efectos indeseables en el desarrollo de la potencia y el torque electromagnético.

Los inversores PWM poseen diversas configuraciones con cualidades adecuadas de conversión de señales, pero no están exentas de distorsiones ocasionadas por la presencia de armónicos de orden superior, los cuales se absorben mediante filtros, pero estos no resultan suficientes y todavía es un poco aparatoso el módulo

de filtrado en el convertidor; es por ello que una solución interesante puede brindarse a través del diseño de un controlador adaptable, donde incluye el mejoramiento de la onda sinusoidal atendiendo las especificidades de cambio y al carácter de la carga reactiva.

Para esto se cuenta con un diagrama que contempla lazos de control con regulación de voltajes y corrientes, los que permiten un manejo integral de las posibles perturbaciones provocadas por la carga o transitorios asociados a oscilaciones de energía reactiva almacenadas en los elementos inductivos-capacitivos de los circuitos.

Diseño del controlador

El trabajo del circuito inversor ofrecerá mejores prestaciones de acuerdo con la ley de control que se utilice. El esquema general para el control de nuestro sistema se muestra en la Figura 2.

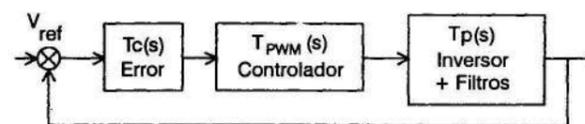


FIGURA 2. Diagrama de control de un sistema Controlador-Inversor.

La señal V_o de referencia no es una constante, es una señal sinusoidal, recordemos que se trata de un inversor trifásico de puente completo y se desea que la salida $V_o(s)$ siga a la señal de referencia lo más aproximadamente posible; es decir es conveniente diseñar un sistema de control seguidor o servo.

La ecuación de transferencia de la planta a controlar, es decir, la fuente inversora más el circuito de filtrado es:

$$T_p(s) = V_o(\omega_o, \omega_r) \cdot (s + \omega_o) / (s^2 + 2\beta \omega_o s + \omega_o^2)$$

donde:

$$\omega_o = 1 / \sqrt{LC}$$

y el coeficiente de amortiguamiento:

$$\beta = (1 / CR) + ((r_c + r) / L) / (Z \omega_o)$$

Pero podemos pensar en un sistema de control adaptable con referencia a un modelo MRAS cuyo esquema se muestra en la Figura 3.

Respecto al esquema es conveniente señalar que la señal de comando U_c a seguir es una onda seno. La señal de salida Y deberá aproximarse a la salida del modelo deseado Y_m (onda seno). Para el diseño de un sistema con control adaptable tenemos un método como el de gradiente (regla MIT) (Richard 1988), donde podemos considerar el lazo interno que se muestra en la Figura 4.

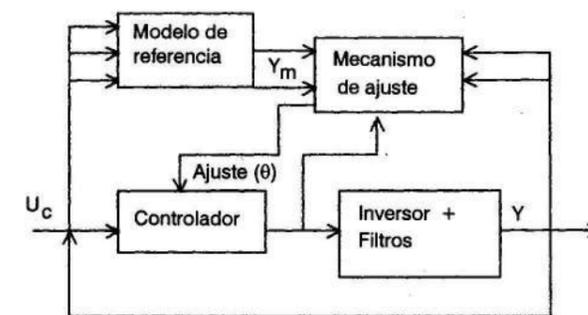


FIGURA 3. Modelo MRAS.

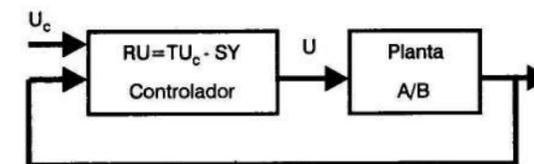


FIGURA 4. Lazo interno para el análisis de gradiente.

$$Y / U = B / A$$

$$A Y = B U : \text{modelo}$$

$$A_m Y_m = B_m U_c : \text{respuesta deseada.}$$

$$R U = T U_c - S Y$$

$$Y = ((B T) / (R A + B S)) \cdot U_c$$

$$U = ((A T) / (R A + B S)) \cdot U_c$$

$$e = Y - Y_m$$

$$d\theta / dt = -r e \partial e / \partial \theta$$

El mecanismo de ajuste se encargará de estimar los parámetros del controlador.

Los coeficientes de los polinomios R, S, T deben variar así:

$$\partial r_i / \partial r_i = r_o (p^{k-1} / A_o A_m)$$

$$\partial S_i / \partial \alpha = r_o (p^H / A_o A_m) \cdot Y$$

$$\partial \alpha_i / \partial \alpha = -r_o (p^{m-l} / A_o A_m) \cdot Y$$

Obteniéndose así la ley de control.

El simulador elaborado con la idea de tres módulos flexibles (Noro, Arai y Otsudki 1989) de controlador-convertidor-mecanismo industrial, ofrece luego de la adquisición de datos, la visualización o tabulación de las curvas características de operaciones fundamentales de estos dispositivos, sobre la base de que el sistema puede estar controlado en dos versiones, por el control clásico, o por el control adaptable. Se tiene acceso a algunos programas fuentes, de forma tal que este simulador permite incorporar otros tipos de modelos relacionados con INVERSORES SINUSOIDALES DE VOLTAJES CON MANEJO POR PWM Y CON OPCION DE CONTROL ADAPTIVO.

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.

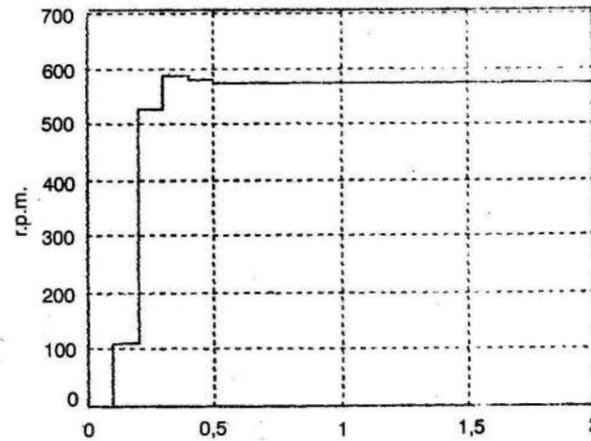


FIGURA 5. Comportamiento de la velocidad.

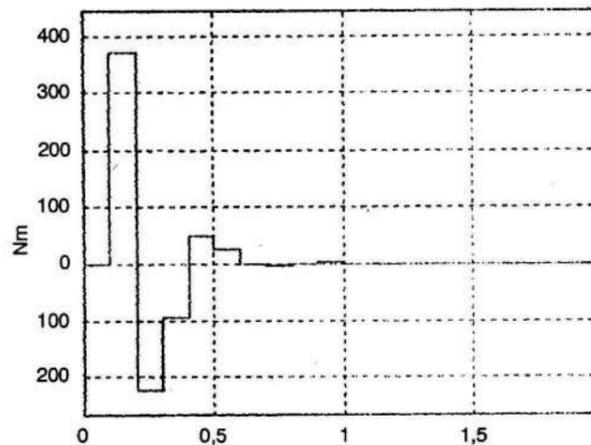


FIGURA 6. Comportamiento del Momento.

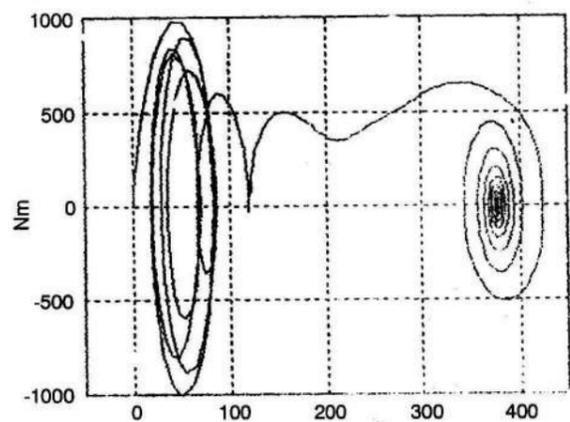


FIGURA 7. Característica Mecánica.

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.