

MODELO TERMICO PARA SISTEMA DE MONITOREO Y PROTECCION DE GRANDES MOTORES

M. ANIBAL VALENZUELA LATORRE et AL.

DEPTO. INGENIERIA ELECTRICA - UNIVERSIDAD DE CONCEPCION

RESUMEN

El bajísimo costo, mayor capacidad y rapidez alcanzados por los microprocesadores, memorias y conversores A/D hace muy atractivo el desarrollo de sistemas para el monitoreo, control y protección de los grandes motores. Una función importante en estos sistemas es la predicción en línea de las temperaturas alcanzadas por éstos en el estator y el rotor.

En el presente trabajo se desarrolla un modelo sencillo y confiable para el cálculo del calentamiento de los motores. Este modelo permite evaluar situaciones de arranque, operación con carga variable y con corrientes desequilibradas. Los parámetros requeridos por el modelo se obtienen de ensayos de calentamiento y de rotor bloqueado. A través de las lecturas de las corrientes instantáneas en las fases del motor se calcula el calentamiento acumulado y, eventualmente, se comandan distintas acciones de protección. Se considera tanto la situación de motores con RTD en el bobinado de estator como la de motores que carecen de sensores térmicos.

INTRODUCCION

Los grandes motores utilizados en las plantas industriales representan normalmente inversiones significativas. Asimismo, tienen una alta interrelación con el proceso por lo que su detención compromete normalmente la capacidad de producción de toda la planta. Todo esto justifica la inversión adicional que normalmente se hace para dotar a estos equipos de un adecuado sistema de protecciones que aseguren una rápida detección de anomalías y, si se requiere, la pronta desconexión del motor.

Particular interés tienen los procesos de arranque y detención en los cuales debe verificarse el adecuado funcionamiento de circuitos auxiliares. Por ejemplo, durante la partida se requiere verificar el funcionamiento del sistema de refrigeración y lubricación; si la partida es con reactor o auto-transformador se debe disponer de elementos que comanden el paso de una etapa a otra. Durante la detención se puede requerir una cierta secuencia de operaciones: cierre de válvulas, energización de bombas de enfriamiento, frenado eléctrico, habilitación de elementos calefactores. Adicionalmente se puede requerir algún comando sobre funciones auxiliares después que el motor se ha detenido; por ejemplo, en el caso de motores sincrónicos es frecuente agregar mecanismos de tiempo para evitar nuevos arranques del motor antes de un intervalo de tiempo determinado y/o mecanismos contadores que limitan el número de arranques en un cierto intervalo. En condiciones de operación del motor se deben proveer protecciones que alarmen y/o desconecten en situaciones anormales; entre ellas se consideran bajas de voltaje, desbalance de corrientes, pérdidas de excitación, pérdida de ventilación, sobrecargas, sobretensiones en bobinado y descansos y sobrecorrientes por fallas a tierra o entre fases.

Trabajo desarrollado con el auspicio y financiamiento de la Dirección de Investigación de la U. de Concepción, Proyecto N°20.92.09.

Para cumplir con las funciones señaladas los sistemas de control y protección convencionales disponen de una gran variedad de relés capaces de detectar las distintas anomalías y un cableado eléctrico entre ellos que incorpora una serie de enclavamientos que solo permiten la operación del equipo si todos los auxiliares operan satisfactoriamente y ningún relé acusa anomalías o falla.

El advenimiento de la tecnología de los microprocesadores permite realizar todas las funciones de control y protección de los motores en forma integrada, eliminando el cableado de control y los relés, reemplazándolos por programas que contienen las funciones, secuencias y enclavamientos residentes en memorias. El sistema va leyendo en línea las señales de corrientes de fases, voltajes, sensores térmicos y mediante el procesamiento de ellas discrimina las distintas situaciones de anomalía. Tiene la ventaja adicional de permitir incluir un modelo térmico del motor con el cual se puede evaluar en línea las temperaturas en los puntos críticos y tomar las acciones que correspondan. Este modelo térmico deberá tener una buena predicción del calentamiento real del motor, superior a los relés de sobrecarga actualmente utilizados, y ser de una evaluación simple que no represente un grado de carga excesiva al microprocesador que comprometa sus restantes funciones.

CALENTAMIENTO DE LOS MOTORES

Desde el punto de vista térmico los motores se pueden considerar como sistemas con fuentes calóricas distribuidas tanto en el estator como en el rotor. Desde los puntos donde ellas se generan, las pérdidas fluyen hacia las superficies de refrigeración. En el caso de grandes motores, el sistema de refrigeración está formado por un circuito de aire independiente, por lo que la capacidad de refrigeración no depende de la velocidad del motor.

Las fuentes de calor principales en un motor corresponden a las pérdidas joule en los enrollados de estator y rotor, pérdidas por corrientes parásitas e histéresis en el hierro y pérdidas mecánicas en los descansos. Las pérdidas joule en las bobinas de estator dependen de la corriente de estator y de la resistencia; como la resistencia de estator puede considerarse esencialmente constante, éstas dependen exclusivamente del grado de carga del motor. Las pérdidas joule en el rotor dependen también de la corriente y resistencia del circuito. En el caso de los motores de inducción jaula de ardilla, la resistencia rotórica es fuertemente dependiente de la frecuencia rotórica y típicamente puede aumentar de tres a cuatro veces en condición de rotor bloqueado. En los motores sincrónicos valen las mismas consideraciones ya hechas en lo que respecta a la jaula de partida; en cambio el enrollado de campo debe considerarse con resistencia constante. En los motores de inducción rotor bobinado, las resistencias del rotor son asimismo constantes. En relación a las pérdidas en el hierro éstas dependen del voltaje y de la frecuencia y cuando los motores se encuentran en operación normal son constantes; durante el arranque aparecen pérdidas en el hierro del rotor que en marcha son despreciables;

si existen corrientes de secuencia negativa, éstas pueden provocar pérdidas significativas por la alta frecuencia del campo magnético asociado con respecto al rotor. Las pérdidas mecánicas dependen de la velocidad y del estado de la lubricación; como estos motores operan a velocidad prácticamente constante, las pérdidas mecánicas se consideran constantes.

Las partes más sensibles a sobrecalentamiento de los motores eléctricos son los bobinados aislados y las jaulas de ardilla. En los primeros, las temperaturas máximas están determinadas por la Clase de Aislación del aislante utilizado y un sobrecalentamiento provoca un envejecimiento acelerado de éste con la consiguiente pérdida de vida útil. En las jaulas las temperaturas máximas están limitadas por las dilataciones que provocan en los anillos y las consiguientes tensiones mecánicas sobre las barras de la jaula; dependen de la forma constructiva y de unión entre ellas. En las referencias (1) y (2) se tabulan valores característicos.

Por lo tanto, un modelo térmico adecuado para la protección de los motores debe ser capaz de predecir el calentamiento en los puntos sensibles tanto en condiciones normales y anormales. Entre las condiciones de particular interés están los calentamientos durante el arranque del motor, en condiciones de sobrecargas en el eje del motor, y al operar con alimentación desequilibrada. Para ello, en primer término debe determinarse correctamente las pérdidas en cada una de estas condiciones de operación.

En el caso de motores de inducción jaula de ardilla y sincrónicas, en partidas a voltaje nominal, la corriente puede alcanzar valores de 6 veces la corriente nominal. Si se supone la resistencia constante, las pérdidas serían 36 veces las nominales. En la jaula las corrientes son asimismo 6 veces las nominales, pero además la resistencia puede ser 3 a 4 veces la de operación normal con lo cual las pérdidas joule en el rotor alcanzan valores de 108 a 144 veces las nominales (::). En los motores rotor bobinado la partida se hace con resistencia agregada al circuito de rotor y las corrientes pueden ser de 1 a 1.5 veces la corriente nominal.

La operación de un motor operando con tensiones desequilibradas se analiza en términos de componentes de secuencia. Los voltajes desequilibrados se descomponen en juegos de voltajes de secuencia positiva y de secuencia negativa que se aplican a los circuitos equivalentes respectivos mostrados en la Fig. 1. Se obtienen las corrientes de secuencia positiva I_1 y negativa I_2 y con ellas se calculan las pérdidas rotóricas y los torques de secuencia positiva y negativa. El calentamiento de los motores de inducción operando con voltajes desequilibrados fue estudiado en (3). Como se muestra en este trabajo, el sobrecalentamiento en estas condiciones se debe, en parte, al alto valor que toma la resistencia rotórica de secuencia negativa que, si se supone linealidad con la frecuencia puede alcanzar de 6 a 8 veces la resistencia de operación normal y, en parte, al torque de secuencia negativa que provoca un aumento de la corriente de secuencia positiva para contrarrestar su efecto y mantener la carga girando. En el sistema de protección microcomputarizado las corrientes I_1 e I_2 se calculan de las lecturas en línea de las corrientes de fase y solo se requiere considerar su efecto térmico asumiendo los correspondientes valores de resistencia rotórica.

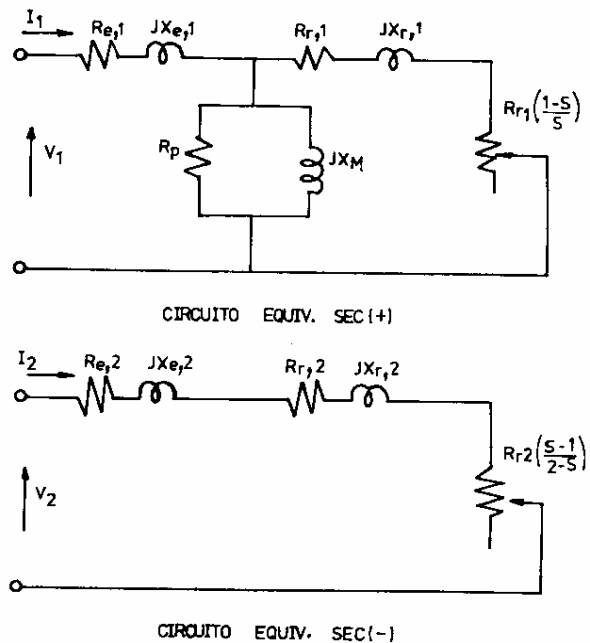


Fig.1.- Circuitos Equivalentes de Secuencia Positiva y Negativa.

MODELOS TÉRMICOS

La obtención de modelos térmicos de los motores que permitan calcular el calentamiento en los puntos de interés ha estado en el centro de la atención de fabricantes y especialistas en selección de motores.

Para los primeros, las notables mejoras de los diseños electromagnéticos y mecánicos de los motores les permiten ajustados diseños que requieren ser verificados térmicamente. Por ello la necesidad de poner en un plano de igualdad al diseño térmico que descansa esencialmente sobre bases empíricas. Un ejemplo de modelación térmica de este tipo es la desarrollada por Rossberry (4) para evaluar el calentamiento del rotor de un motor de inducción en condiciones de rotor bloqueado. El circuito equivalente térmico correspondiente se muestra en la Fig.2 y se ob-

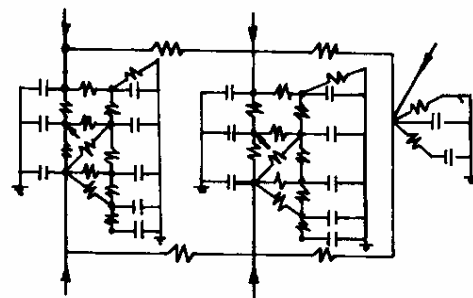


Fig.2.- Circuito Equivalente Térmico del Rotor.

tiene de subdividir un sector del motor en ocho partes. Contiene 29 resistencias térmicas, 17 capacidades térmicas y 7 fuentes de pérdidas. Para su utilización se requiere obviamente una gran capacidad de cálculo y como contrapartida se obtiene un perfil in-

terno de las temperaturas del motor bastante completo. Por la gran capacidad de cálculo que requiere, es difícil obtener un procesamiento en línea. Asimismo la gran cantidad de parámetros del modelo no pueden obtenerse de ensayos simples sino más bien de datos de diseño. Por todo esto, un modelo de estas características no es aplicable para protección térmica de un motor.

El ingeniero de Proyectos encargado de seleccionar el motor adecuado para una carga requiere también de un modelo térmico del motor con el cual calcular el calentamiento asociado a los ciclos de trabajo más severos a que éste pueda ser sometido. En este caso, el modelo térmico que se utiliza es bastante simple y consiste en asumir al motor como un cuerpo térmicamente homogéneo. La ecuación correspondiente es :

$$Q dt = A \cdot \tau \cdot dt + C dt \quad (1)$$

donde :

- Q : pérdidas totales (cantidad de calor producido por unidad de tiempo).
- A : emisión calórica del motor (calor disipado por unidad de tiempo por grado de temperatura).
- C : capacidad calórica del motor (calor absorbido para aumentar la temperatura en un grado)
- τ : gradiente de temperatura sobre el ambiente.

Como el calentamiento en cada punto del motor es diferente, para la adecuada utilización de este modelo los parámetros A y C se ajustan al punto de interés. Para su utilización en la protección del motor se podría ajustar el modelo a la temperatura del estator o a las barras del rotor o manejar en forma paralela un modelo ajustado al bobinado del estator y otro al rotor. Cualquiera sea la alternativa que se escoja, ninguna de estas modelaciones entrega predicciones suficientemente exactas para su uso en un esquema de protecciones. La razón de ello es que la distribución de pérdidas en condiciones de marcha normal o con sobrecarga, en condiciones de arranque o en condiciones de alimentación desequilibrada son marcadamente diferentes y estos modelos las globalizan en una sola fuente de calor. No obstante estos modelos, dada su gran simplicidad son fácilmente evaluables en línea y requieren poca capacidad de cálculo.

MODELO PROPUESTO

El modelo térmico propuesto se muestra en la Fig.3. Considera el motor como formado por dos cuerpos homogéneos: rotor y estator. En el rotor se ubica una fuente de calor asociada a las corrientes que circulan por la jaula y/o enrollados de rotor y una capacidad calórica asociada a la capacidad de acumulación de calor del rotor. En el estator existen dos fuentes de calor: una normalmente constante asociada a las pérdidas en el fierro y la otra variable asociada a las pérdidas joule en las bobinas de armadura. No se consideran las pérdidas mecánicas ya que por su localización prácticamente no contribuyen al calentamiento en los puntos de interés. De las pérdidas rotóricas parte se acumulan en el rotor y el resto, en la medida que exista un gradiente de temperatura con respecto al estator, se transferirá a él. En el estator, el calor proveniente de sus propias pérdidas, así como el transferido desde el rotor, en parte se acumulará y en parte se disipará al flujo refrigerante. Al alcanzarse el equilibrio térmico, cesa el proceso de acumulación de calor en ro-

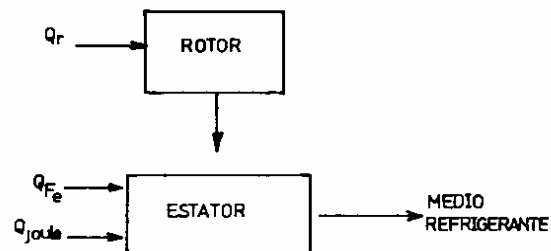


Fig.3.- Modelo Térmico Propuesto.

tor y estator y todo el calor producido es transferido al flujo refrigerante. El circuito equivalente térmico asociado a este modelo se muestra en la Fig.4.

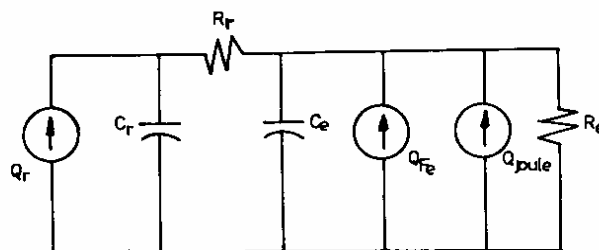


Fig.4.- Circuito Equivalente Térmico.

La evaluación del calentamiento se obtiene haciendo el equilibrio térmico en cada cuerpo entre calor producido, disipado y almacenado. Para el rotor se tendrá:

$$Q_r dt = A_r (\tau_r - \tau_e) dt + C_r d\tau_r \quad (2)$$

donde:

- Q_r : calor producido en el rotor
- A_r : emisión calórica del rotor al estator
- C_r : capacidad calórica del rotor
- τ_r : gradiente de temperatura del rotor sobre el ambiente.
- τ_e : gradiente de temperatura del estator sobre el ambiente.

y para el estator :

$$(Q_{joule} + Q_{Fe}) dt + A_r (\tau_r - \tau_e) dt = A_e \tau_e dt + C_e d\tau_e \quad (3)$$

donde :

- Q_{joule} : calor generado por pérdidas joule en bobinado estator.

- Q_{Fe} : calor generado por pérdidas en el Fierro.
- A_e : emisión calórica del estator al medio refrigerante.
- C_e : capacidad calórica del estator.

A partir de las ecuaciones (2) y (3) se obtienen las siguientes ecuaciones diferenciales para el calentamiento del rotor y estator:

$$T_e T_r p^2 \tau_r + (T_e + T_r + (A_r/A_e) T_r) p \tau_r + \tau_r = Q_r/A_r + Q_{total}/A_e + T_e p(Q_r/A_r) \quad (4)$$

y :

$$T_e T_r p^2 \tau_e + (T_e + T_r + (A_r/A_e) T_r) p \tau_e + \tau_e = Q_{total}/A_e + T_r p(Q_e/A_e) \quad (5)$$

con :

$$T_e \triangleq \frac{C_e}{A_e} \quad (6)$$

T_e : constante de tiempo térmica del estator

$$T_r \triangleq \frac{C_r}{A_r} \quad (7)$$

T_r : constante de tiempo térmica del rotor.

Al imponer condiciones de equilibrio térmico en las expresiones (4) y (5) se obtiene :

$$\tau_{r,est} = \frac{Q_r}{A_r} + \frac{Q_{total}}{A_e} \quad (8)$$

y :

$$\tau_{e,est} = \frac{Q_{total}}{A_e} \quad (9)$$

El modelo recién presentado tiene la gran ventaja que, manteniendo la simplicidad, reconoce la existencia por separado de las principales fuentes de calor del motor lo que le permite una adecuada predicción en las distintas situaciones de interés. Contiene solamente cuatro parámetros y tres fuentes calóricas con las que se fija la condición térmica del sistema.

DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DEL MODELO

La determinación de los cuatro parámetros del modelo puede hacerse en forma experimental, obtenerse a partir de datos suministrados por el fabricante y/o usando valores característicos.

La determinación experimental requiere hacer un ensayo de calentamiento en carga y otro a rotor bloqueado. En el primero de ellos se carga el motor hasta un grado de carga conocido, nominal o menor, se determinan las pérdidas en esa condición y se mantiene esta condición hasta que se alcance régimen térmico estable. Se miden $\tau_{e,est}$ y $\tau_{r,est}$.

En estas condiciones se tendrá :

$$A_e = \frac{Q_{total,ensayo}}{\tau_{e,est}} \quad (10)$$

y :

$$A_r = \frac{Q_{r,ensayo}}{\tau_{r,est} - \tau_{e,est}} \quad (11)$$

El ensayo de calentamiento a rotor bloqueado permite obtener las capacidades térmicas del modelo. El supuesto básico es que en este caso todo el calor producido se almacena en los cuerpos. Con esto, las ecuaciones del modelo se reducen a :

$$Q_r dt = C_r d\tau_r \quad (12)$$

y :

$$Q_e dt = C_e d\tau_e \quad (13)$$

El ensayo se efectúa con el motor inicialmente a temperatura ambiente y se detiene al alcanzar la temperatura crítica. Las capacidades se determinan con las siguientes expresiones:

$$C_e = \frac{Q_{e,rb} \cdot t}{\tau_{e,rb}} \quad (14)$$

y :

$$C_r = \frac{Q_{r,rb} \cdot t}{\tau_{r,rb}} \quad (15)$$

También es posible la obtención de estos parámetros a partir de los valores entregados por el fabricante tales como corriente nominal máxima, corriente de rotor bloqueado, tiempo máximo de rotor bloqueado con motor frío y con motor caliente, clase de aislamiento de los bobinados, y reportes de los ensayos de rutina del motor.

IMPLEMENTACION DEL MODELO

La obtención del algoritmo del cálculo térmico se obtiene a partir de las ecuaciones de diferencias finitas asociadas a las ecuaciones (2) y (3). Los incrementos de los gradientes de temperaturas del rotor y del estator producidos en un intervalo Δt serán :

$$\Delta \tau_r = \frac{1}{C_r} \left\{ Q_r \Delta t - A_r (\tau_r - \tau_e) \Delta t \right\} \quad (16)$$

y :

$$\Delta \tau_e = \frac{1}{C_e} \left\{ Q_e \Delta t + A_r (\tau_r - \tau_e) \Delta t - A_e \tau_e \Delta t \right\} \quad (17)$$

y para los gradientes $\tau_{r,n+1}$ y $\tau_{e,n+1}$ en el intervalo de tiempo $(n+1)\Delta t$ se tendrán las siguientes fórmulas recursivas :

$$\tau_{r,n+1} = \tau_{r,n} + \frac{1}{C_r} \left\{ Q_{r,n} \cdot \Delta t - A_r (\tau_{r,n} - \tau_{e,n}) \Delta t \right\} \quad (18)$$

$$\tau_{e,n+1} = \tau_{e,n} + \frac{1}{C_e} \left\{ Q_{e,n} \cdot \Delta t - A_e (\tau_{r,n} - \tau_{e,n}) \Delta t - A_e \cdot \tau_{e,n} \Delta t \right\} \quad (19)$$

Las pérdidas en cada intervalo se obtienen como :

$$Q_{r,n} = 3R_{r,1} \cdot I_{1,n}^2 + 3R_{r,2} \cdot I_{2,n}^2 \quad (20)$$

$$Q_{e,n} = Q_{Fe} + 3R_e (I_{1,n}^2 + I_{2,n}^2) \quad (21)$$

donde :

- $R_{r,1}$: resistencia rotórica de secuencia positiva.
- $R_{r,2}$: resistencia rotórica de secuencia negativa.
- R_e : resistencia de estator.
- $I_{1,n}$: corriente efectiva de secuencia positiva en el intervalo.
- $I_{2,n}$: corriente efectiva de secuencia negativa en el intervalo.

Los valores de $I_{1,n}$ e $I_{2,n}$ se calculan a partir de los valores leídos por el sistema. Para la resistencia rotórica de secuencia positiva se debe además distinguir entre la resistencia de partida y la de operación normal. La discriminación entre una situación y otra se establece en función del nivel de las corrientes de línea.

En el caso de motores con RTD en el estator, el modelo térmico se reduce a la evaluación de las ecuaciones (18) y (20) para el calentamiento del rotor.

Aún cuando las ecuaciones que se requiere resolver en el modelo térmico son simples, su evaluación puede representar un grado de carga importante para el microprocesador. Para limitar al máximo el tiempo de procesador dedicado al cálculo térmico de ben fijarse en forma óptima el intervalo de tiempo que se dejará entre una evaluación y otra, y el sistema de adquisición y cálculo de las corrientes de secuencia positiva y negativa.

Para definir el intervalo de tiempo debe tenerse en cuenta que las constantes de tiempo térmicas de los grandes motores están normalmente sobre 30 - 45 minutos por lo que no tendría sentido una alta frecuencia del cálculo. Otro aspecto a considerar es el tiempo máximo a rotor bloqueado de los motores que alcanza típicamente 20 - 40 segundos por lo que en estas condiciones es necesaria una mayor velocidad. Intervalos razonables son de 1 (min) en condiciones de marcha y de 1 (seg) durante el arranque. También puede optarse por dar un intervalo menor cuando el modelo esté prediciendo valores cercanos a los máximos permitidos o en condiciones de un porcentaje importante de corrientes de secuencia negativa.

El otro aspecto trascendente para la carga del sistema es la adquisición y cálculo de las corrientes de secuencia positiva y negativa. Como las corrientes de línea son señales de 50 c/s para tener

una precisión aceptable en el cálculo se debieran tomar del orden de 10 valores en cada semiciclo. Esto hace que el sistema deba leer y convertir un valor cada 1 (mseg) por cada fase, y procesarlos para obtener los valores efectivos de I_1 e I_2 .

Lo anterior representa un alto gasto de tiempo del procesador que compromete sus restantes funciones. Por otro lado, estos valores se usan en el modelo térmico y, eventualmente, en reportes del sistema al operador por lo que es excesivo su cálculo ciclo a ciclo. Se propone un método de adquisición más lento, pero que permite un cálculo seguro de las corrientes. Para ello se aprovecha que salvo en el transiente eléctrico de una falla, las formas de onda de las corrientes se mantienen idénticas por varios ciclos. El método consiste en tomar una lectura por cada ciclo la que se va desplazando sucesivamente en 10° . Así si se inicializa una serie de lecturas junto con el paso por cero de la señal, en el siguiente ciclo se medirá a los 10° , en el siguiente a los 20° y así sucesivamente. Al cabo de 20 ciclos se habrá recorrido la onda completa y se vuelve a sincronizar para el siguiente recorrido.

COMENTARIOS

El modelo presentado es bastante adecuado para sistemas de monitoreo y relés de protección térmica digitales. Combina una adecuada predicción en las distintas situaciones de interés y una simplicidad algorítmica para un cálculo en línea.

Es posible desarrollar un modelo que incorpore en mejor forma el efecto de las pérdidas en el hierro. En tal caso se consideran tres cuerpos: rotor, bobinas de estator y el núcleo/carcasa del estator. En el último de ellos se consideran las pérdidas en el hierro. Si se monitorea las señales de voltaje se puede incluir su efecto sobre las pérdidas en el hierro. En la práctica como las zonas en que se ubican la mayor parte de las pérdidas en el hierro es en los dientes del estator, muy próximas a las pérdidas joule en el bobinado de estator los valores que predice un modelo de este tipo no difieren mayormente de los que entrega el modelo propuesto y no se justifica la complicación adicional.

REFERENCIAS

- [1] Heidbreder, J.F.: "Induction Motor Temperature Characteristics". AIEE Trans. (Power App. Syst.), Vol. 77, Oct. 1958, pp. 801-804.
- [2] Nailen, Richard : "Safe Locked Rotor Time: How Safe is It?". IEEE Trans., Vol. IGA-7, N°6, Nov/Dec. 1971. pp. 708-712.
- [3] Gafford, B.N.-Duester Hoeft, W.C.-Mosher III, C.C. : "Heating of Induction Motors on Unbalanced Voltages"; AIEE Trans. (Power App. Syst.), Jun 1959, pp. 282-288.
- [4] Rosenberry Jr. G.M. : "The Transient Stalled Temperature Rise of Cast-Aluminum Squirrel-Cage Rotors for Induction Motors"; AIEE Trans, Vol. 74, pt. III, Oct. 1955. pp. 819-824.