

Protección de Motores Eléctricos



ZIV Forum



Nota Técnica

Autor:
Fernando Cobelo





Introducción

Protecciones comunes para motores asíncronos y síncronos

- Fallo en los cojinetes
- Faltas eléctricas en los devanados del estator
- Arranque y bloqueo de rotor
- Alimentación con fases desequilibradas
- Funcionamiento en vacío
- Sobretensiones y subtensiones

Protecciones adicionales para motores síncronos

- Pérdida de excitación
- Sobrecargas en el rotor
- Mínima frecuencia

Protección integral de motores

- Sobrecarga térmica
- Sobreintensidad de componente directa
- Sobreintensidad de componente homopolar
- Sobreintensidad de componente inversa
- Bloqueo de rotor y arranques sucesivos
- Mínima intensidad

Opciones

- Diferencial de intensidades
- Máxima tensión temporizada
- Mínima tensión temporizada
- Orden de sucesión de fases

Introducción

Pretendemos hacer una exposición sobre las prácticas de aplicación en las protecciones de los motores eléctricos, actualizando las recomendaciones que existen para este tipo de máquinas.

El motor eléctrico, pieza fundamental en el desarrollo de la moderna era industrial, ha hecho posible la transformación de la energía eléctrica en energía mecánica, siendo hoy en día el receptor de mayor utilización dentro del campo de los usos industriales.

Estas prácticas de aplicación las vamos a circunscribir a motores conectados en sistemas trifásicos, enlazados a la red a través de interruptores automáticos de la capacidad de ruptura adecuada.

Atendiendo a sus principios de funcionamiento, los motores de corriente alterna (C.A.) pueden clasificarse dentro de dos grandes grupos: motores síncronos y motores asíncronos.

De una forma muy general, los motores asíncronos podemos clasificarlos:

Por su tensión de alimentación

- Baja tensión < 500 V
- Media tensión < 10 kV (3, 5, 6 kV)

Por su potencia nominal

- Fraccionales < 1 HP
- Industriales > 1 HP
- Grandes motores > 150 HP

La mayoría son de rotor en jaula o doble jaula de ardilla y, en algunas aplicaciones, son de rotor devanado.

Las prácticas de aplicación abarcarán primero las protecciones comunes a los asíncronos y síncronos, señalando si existe alguna

peculiaridad que pueda diferenciar unos de otros; y, posteriormente, se expondrán las protecciones adicionales a aplicar a los motores síncronos.

Debemos señalar que, en la actualidad, los motores síncronos prácticamente no se utilizan en la industria.

Trataremos de justificar las funciones de protección más adecuadas que garanticen un funcionamiento continuado de los motores y, en caso de que se produzcan faltas o anomalías en el funcionamiento, sean rápidamente identificadas por las protecciones, desconectándose los motores de sus fuentes de alimentación antes de que se produzcan daños con los correspondientes elevados costes.

Protecciones comunes para motores asíncronos y síncronos

Los problemas fundamentales que afectan a la elección de las protecciones de los motores son independientes del tipo de motor y del tipo de carga a la que va conectada.

Para aplicar debidamente las protecciones a un motor será preciso considerar detalladamente sus características, haciendo énfasis en datos tales como las corrientes de arranque y de bloqueo (asociadas a los tiempos que se deben de ajustar las funciones de sobrecarga), la capacidad térmica de la máquina ante condiciones de cargas equilibradas y desequilibradas y el sistema de aislamiento utilizado en su fabricación.

Las condiciones por las que se debe producir la actuación de las protecciones de los motores, podemos agruparlas en dos grandes categorías: por un lado, las debidas a faltas internas y, por otro lado, las impuestas por condiciones externas.

Dentro de la primera categoría incluiremos el fallo de cojinetes, faltas entre fases y de fases a tierra en el estator, contorneos en bornas y sobrecargas.

En la segunda categoría se incluyen la alimentación del motor con tensiones desequilibradas, arranque y marcha en monofásico, bloqueo de rotor, arranques excesivamente largos, subtensiones e inversión del orden de sucesión de fases en el arranque y en los síncronos, además, la pérdida de sincronismo.

Las protecciones aplicadas a una máquina en particular dependen de su tamaño y de la carga conectada. Sin embargo, todos los motores deben de incorporar las protecciones de sobrecarga y de alimentación con tensiones desequilibradas. A menudo, ambas suelen ir integradas dentro de un mismo equipo.



La detección de temperaturas elevadas es la más difícil de conseguir

• Fallo en los cojinetes

Dos son los tipos de cojinetes de los motores:

- antifricción (a bolas o a rodillos)
- película de aceite (de manguitos)

Los fallos en los cojinetes son debidos generalmente a problemas en el circuito del lubricante o por problemas mecánicos.

No es objeto de esta exposición enumerar exhaustivamente las causas de los fallos, sino señalar que los dispositivos de detección de los fallos deben hacer sonar una alarma e incluso, en algún caso, desconectar el motor.

Los dispositivos de protección deben dar respuesta a una o más condiciones de las que indicamos a continuación:

- Bajo nivel en el depósito (por detección del nivel de líquido).
- Baja presión de aceite (por detección de presión).
- Reducido caudal de aceite (mediante detector de caudal).
- Elevada temperatura (por termopar detector de temperatura).

La detección de temperaturas elevadas es la más difícil de conseguir y, generalmente, se realiza detectando la temperatura del líquido lubricante de los cojinetes.

Estos dispositivos de detección son convertidores de medidas físicas y externos a los equipos eléctricos de protección, aunque los terminales digitales de protecciones eléctricas pueden admitir entradas de contactos de estos dispositivos para ser tratados dentro de la lógica de alarmas y de disparos del interruptor automático asociado al motor.



• Faltas eléctricas en los devanados del estator

Dentro de este apartado vamos a analizar las faltas a tierra en los devanados, faltas entre fases y cortocircuitos entre espiras de una misma fase, así como las faltas en bornas del propio motor y las sobrecargas prolongadas.

Faltas a tierra

Son las más frecuentes en los devanados del estator de los motores, provocadas por el deterioro del aislamiento, debido generalmente a su envejecimiento por fatiga térmica. Estas faltas se detectan con bastante facilidad a través de una función de sobreintensidad instantánea ajustada a un valor del orden del 20% de la intensidad de plena carga del motor y conectada en el secundario de un transformador toroidal o en el circuito residual de tres transformadores de intensidad. En este último caso, para evitar que opere por la corriente residual que pueda existir, debido a los picos de intensidad en los primeros instantes del arranque, por las diferencias en las curvas de saturación de los transformadores de intensidad, es una práctica muy utilizada incrementar el valor de la tensión mínima de operación del relé insertando una resistencia de estabilización en serie con la bobina de operación.

Faltas entre fases

Las faltas entre fases no son muy frecuentes por ser grande el aislamiento entre ellas. Además, como los bobinados van encajados en las ranuras de las chapas magnéticas que van conectadas a tierra, las faltas entre fases se convierten rápidamente en faltas a tierra, siendo detectadas por la función de protección anteriormente descrita.

Se deben, por tanto, incorporar tres funciones instantáneas de sobreintensidad, que además de las faltas entre fases cubren las faltas que se puedan producir por contorneos en las bornas del motor y en la línea de alimentación.

Ahora bien, en motores grandes y cuando por exigencia expresa del usuario el principio y fin de los devanados del estator sean accesibles en una caja de bornas, es muy usual instalar una función de protección diferencial contra las faltas entre fases, sirviendo las mencionadas de sobreintensidad como apoyo de la diferencial.

Cortos entre espiras de una misma fase

Siempre y cuando los devanados de cada fase del estator no estén divididos en dos o más circuitos, la detección de cortos entre espiras de una misma fase es bastante compleja, por lo que no se aplican estos detectores. Y además, estas faltas degeneran rápidamente en faltas de fase a tierra, actuando la función de protección anteriormente mencionada.

Faltas en bornas del motor

Para la protección contra los arcos que se puedan producir en las bornas del motor, y como hemos indicado anteriormente para las faltas entre fases, es práctica normal utilizar tres funciones instantáneas de sobreintensidad. Al establecer los ajustes de estas unidades se debe de tomar la precaución de demorar 40-50 ms. su actuación, para evitar que operen debido a los picos de intensidad que se producen en los periodos iniciales del arranque.

Sobrecargas en el motor

Esta protección debe de ser estudiada e implantada con el mayor cuidado, ya que de ella depende principalmente la duración o vida del motor. Es sabido que los motores no pueden soportar en permanencia más que una pequeña sobrecarga, del orden del 5 al 7% de la potencia nominal, y frecuentemente en explotación es preciso tolerar puntas, pero durante tiempos cortos. La protección que mejor se adapta es aquella que tiene en cuenta el calentamiento correspondiente a las sobrecargas en función de la integración de regímenes de marcha precedentes. De esta forma se pretende obtener una protección que sea una auténtica imagen térmica que se calienta y se enfría al mismo tiempo que el motor.



Faltas a tierra, faltas entre fases, cortos entre espiras de una misma fase, faltas en bornas del motor y sobrecargas en el motor son las faltas a analizar



Se han diseñado muchos dispositivos de imagen térmica partiendo de la intensidad absorbida por el motor en cada instante, con las integraciones correspondientes, pretendiendo lograr con bastante fidelidad la imagen térmica del motor. Debemos de señalar que esa función de imagen térmica debe reflejar el calentamiento y enfriamiento del motor, mostrando en cada momento su estado térmico.

Además, deberá de tener en cuenta los calentamientos adicionales que se producen en el rotor y que son transmitidos al estator por la componente de secuencia negativa de la intensidad, debida a los desequilibrios en las tensiones de alimentación al motor y que mencionaremos más adelante.

Para cada sistema o clase de aislamiento existe una temperatura natural (155° C para la clase F, usual en motores) que, sobrepasada, reduce notablemente la vida del motor. De forma aproximada podemos señalar que por cada 10° C de incremento sobre esta temperatura natural, la vida del motor se reduce a la mitad por fatiga térmica de los aislamientos, duplicándose ésta, por cada 10° C de decremento. No es una regla muy rigurosa, pero puede servirnos para tener en cuenta la importancia que tienen las sobrecargas en la vida de los motores.

Si se estudian los fenómenos térmicos en un motor, debemos distinguir dos regímenes de calentamiento diferentes: un régimen que podemos denominar adiabático, debido a fuertes sobrecargas en tiempos cortos, tales como arranques y bloqueos de rotor; y un régimen de calentamiento lento, por el funcionamiento normal del motor.

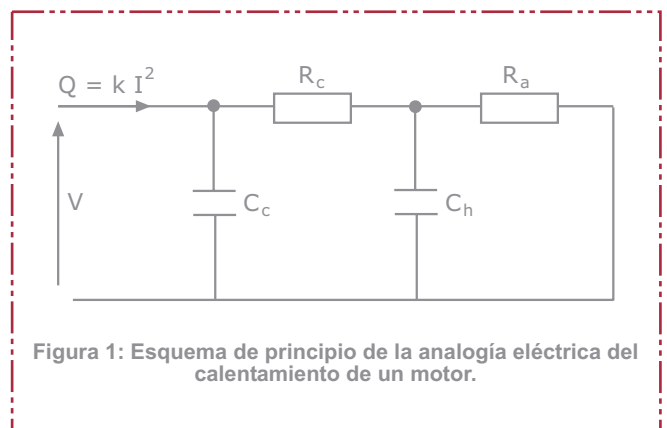
En el régimen adiabático, el calor desarrollado, en gran cantidad y en poco tiempo en el corazón mismo de los devanados, calienta esos devanados peligrosamente, incluso antes de que se realice intercambio de calor con la masa metálica que los envuelve. Sucede como si todo el calor producido permaneciera en los devanados, y en estas condiciones no pudiera aceptar más que una determinada cantidad de calorías. Esto hace que tengamos que prestar especial atención a los arranques excesivamente largos, a los bloqueos de rotor y al número de arranques sucesivos que expondremos más adelante.

El régimen más normal es el del calentamiento lento, en el que el intercambio de calor tiene lugar normalmente, entre los devanados y el hierro que los envuelve.

Para obtener imágenes térmicas que sigan fielmente las leyes de calentamiento que se producen en los devanados se han utilizado varios sistemas. En los equipos de protección estáticos (analógicos) la obtención de la imagen térmica se ha logrado por analogía eléctrica de los fenómenos térmicos y que resumidamente vamos a reseñar a continuación. Vamos a representar en la Figura 1 un esquema básico de principio tal que:

- Q** = El flujo de que es proporcional a I , siendo I la intensidad absorbida por el motor
- V** = Diferencia de potencial representando el nivel de calentamiento en cada instante.
- R_c** = Resistividad térmica del aislante entre el cobre y el hierro (resistencia eléctrica)
- C_c** = Capacidad térmica del cobre (condensador eléctrico)
- R_a** = Resistividad térmica de la carcasa con relación al ambiente (resistencia eléctrica)
- C_h** = Capacidad térmica del hierro (condensador eléctrico)

Las constantes de tiempo de calentamiento y de enfriamiento serán las que corresponden a los parámetros **R - C** de la analogía térmica.





Esto permite una adaptación bastante rigurosa de las características térmicas del motor, reflejando en cada instante los estados térmicos de la máquina.

La misma analogía se puede obtener mediante un algoritmo adecuado para que digitalmente pueda ser reproducida la función térmica contenida en una protección digital. Estas protecciones digitales tienen unas posibilidades de prestaciones mucho más amplias, pudiendo además adaptarse más fielmente a las curvas de calentamiento y de enfriamiento reales del motor.

• Arranque y bloqueo de rotor

Vamos a considerar brevemente las corrientes absorbidas por un motor durante un arranque normal y su duración, así como el tiempo máximo admisible de la máquina con el rotor bloqueado con el fin de poder aplicar las protecciones adecuadas y evitar cualquier deterioro que pudiera ocurrir en el motor si se produjeran arranques excesivamente largos o bloqueos de rotor. Comentaremos brevemente también el número de arranques sucesivos a que se puede someter un motor.

Arranque de motores

Suponemos que en máquinas que arrancan con plena tensión de alimentación, la intensidad absorbida disminuye linealmente con la velocidad que va adquiriendo el motor durante el arranque. Aunque no sea aplicable a todos los motores, podemos afirmar que en su mayoría la intensidad de arranque permanece prácticamente constante durante el 85% del tiempo de arranque.

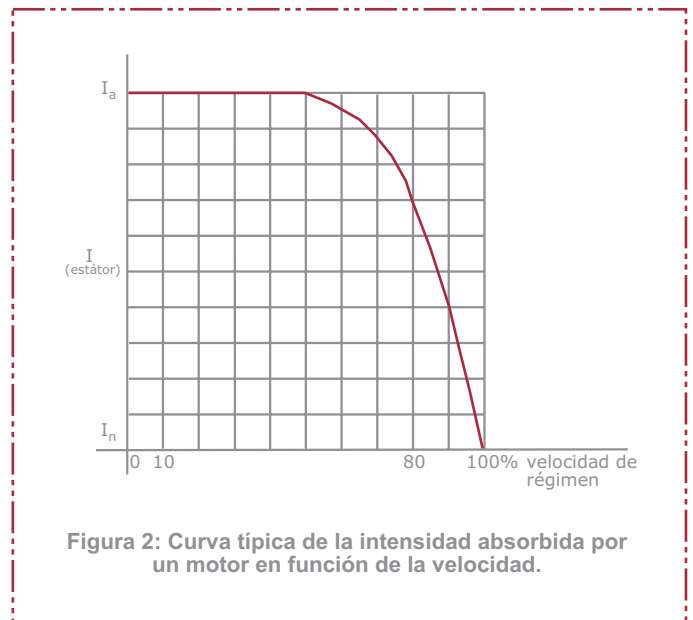
La corriente rotórica I_r de un motor de inducción para cualquier valor S del deslizamiento, podemos expresarla mediante:

$$I_r = k \cdot \frac{E}{\sqrt{\left(\frac{R^2}{S^2} + X^2\right)}}$$

donde k es una constante, R la resistencia rotórica, X la reactancia rotórica y S el deslizamiento.

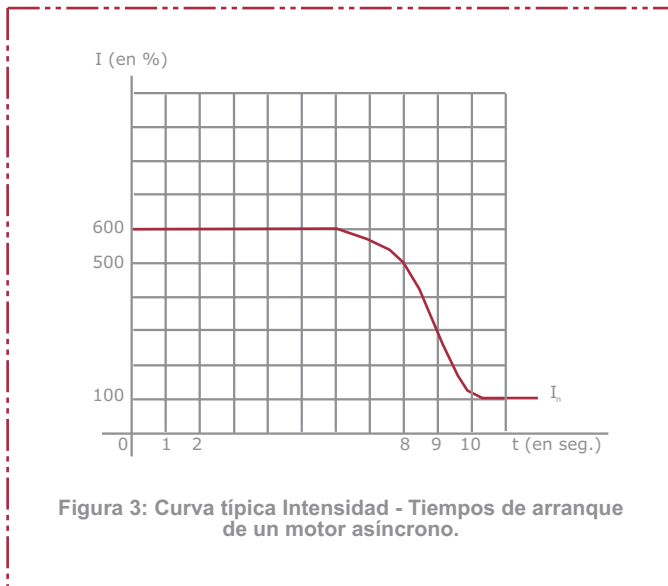
La intensidad I absorbida en cada instante por el motor será equivalente a la corriente rotórica, ya que la corriente del estator y del rotor se relacionan como las corrientes primaria y secundaria de un transformador.

En la Figura 2 se ha representado la curva que se deduce de la expresión anterior de las corrientes rotóricas; en las ordenadas figuran las intensidades estáticas absorbidas por el motor, siendo la intensidad de arranque estable (una vez transcurrido el período transitorio) y en las abscisas, la velocidad en tanto por ciento de la velocidad de régimen.



En un motor de inducción, la reactancia de la máquina es unas 10 veces su resistencia óhmica, por lo que la curva de arranque del motor la podemos obtener a partir de la Figura 2 anterior.

Esta curva de arranque es mostrada en la Figura 3, figurando en las abscisas los tiempos y en las ordenadas las intensidades absorbidas por el motor en función del tanto por ciento de su intensidad I_n de plena carga.



Se ha representado la curva con un tiempo de arranque de 10 s., aunque normalmente este tiempo se sitúa entre 5 y 12 s., dependiendo del tipo de motor. En motores que arrastran cargas de gran inercia, los tiempos de arranque pueden alcanzar valores de hasta 20 s.

Bloqueo de rotor

Cuando un motor, bien sea en marcha o parado, es incapaz de vencer el par resistente por tener que arrastrar una carga excesiva, se produce un bloqueo de rotor. En ambos casos, el motor absorberá de la red la intensidad equivalente a la de motor parado. De producirse esta situación, es preciso desconectar la máquina lo antes posible.

Para la mayoría de las cargas arrastradas por los motores de inducción, el tiempo de arranque no supera los 10 s. y, en cambio, el motor admite con el rotor bloqueado y sin que se produzca un deterioro sensible de sus aislamientos, del orden de 20 s. En estas condiciones es fácil discriminar entre las condiciones de un arranque normal, de uno excesivamente largo o de un rotor bloqueado, en base a tiempos de permanencia de la intensidad absorbida por el motor en posición de rotor parado.

Hemos indicado anteriormente que en los motores que arrastran cargas de gran inercia los tiempos de arranque son del orden de los 20 s. y se pueden aproximar a los tiempos máximos admisibles para rotor bloqueado y hacer la discriminación por tiempos más difícil. En alguno de estos casos se ha utilizado una función de mínima intensidad, generalmente ajustada al valor de $3 I_n$, bloqueando el circuito de disparo del motor para valores inferiores a este ajuste. También se ha utilizado la práctica de hacer el mismo tipo de bloqueo del interruptor, a partir de la información recibida de un tacómetro, fijando un número mínimo de revoluciones de giro del eje del motor. Estas prácticas se han utilizado porque los dispositivos de imagen térmica disponibles entonces (espiral bimetálica próxima a la fuente de calor), tenían una sobremarcha de hasta el 45% y esto hacía prácticamente imposible la discriminación por tiempos, cumpliendo a la vez con el tiempo de duración de los arranques normales.

Actualmente, en las imágenes térmicas de las protecciones en electrónica convencional y sobre todo en los equipos digitales de protección de motores, las sobremarchas por inercia térmica no son superiores al 2%, permitiendo que la identificación del bloqueo de rotor, incluso en los tipos de motores que arrastran cargas de gran inercia, se realice con éxito por discriminación por tiempos.

Arranques sucesivos

Los arranques sucesivos realizados en número excesivo sobre un motor de inducción pueden ser causa de grandes calentamientos que den lugar a un deterioro de su sistema de aislamientos. El fabricante debe de facilitar el dato del número de arranques sucesivos permitidos sobre el motor dentro de un espacio de tiempo definido.

Los equipos digitales de protección de motores resuelven perfectamente el problema del número excesivo de arranques sucesivos a realizar sobre un motor a través de un algoritmo que consiste fundamentalmente en abrir una ventana de tiempos de un valor seleccionable cada vez que se produce un arranque del motor, para ir computando los arranques que se produzcan dentro de ese espacio de tiempo, y bloquearlo siempre que éstos sobrepasen una cantidad prefijada.



• Alimentación con fases desequilibradas

Las anomalías en el sistema eléctrico de potencia que alimenta a un motor se traducen en un cierto grado de desequilibrio en las tensiones. Esto hace que en los devanados de la máquina aparezca una componente inversa del sistema de corrientes absorbidas por el motor. Entre las razones de estas anomalías se encuentran: una distribución desequilibrada de las cargas monofásicas en la red, una transposición incorrecta de las fases y, en algún caso, la fusión de un fusible con la consiguiente pérdida de una fase, lo que supone el límite máximo del desequilibrio del sistema de tensiones de alimentación. Puede suceder también que después de someter a un motor a rebobinados por reparaciones, se produzcan desequilibrios en las impedancias de las fases, siendo también causa de la existencia de corrientes de componente inversa, aún con tensiones de alimentación equilibradas.

Componentes simétricas de intensidades

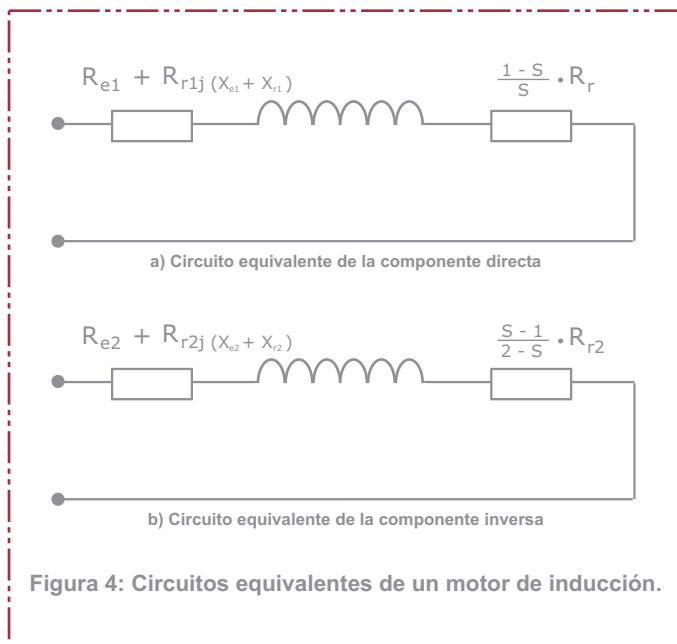


Figura 4: Circuitos equivalentes de un motor de inducción.

Vamos a partir de los circuitos equivalentes de las componentes directa e inversa de un motor de inducción que se muestra en Figura 4 para calcular las impedancias de estas dos componentes.

La impedancia de componente directa vendrá dada por la expresión:

$$Z_1 = \left[\left(R_{e1} + \frac{R_{r1}}{S} \right)^2 + (X_{e1} + X_{r1})^2 \right]^{1/2}$$

donde,

X y R = valores de la resistencia óhmica y reactancia del rotor referidas al estator

X y R = valores del estator

S = valores del deslizamiento

A motor parado (es decir **S = 1**), la impedancia toma el valor:

$$Z_1 = \left[(R_{e1} + R_{r1})^2 + (X_{e1} + X_{r1})^2 \right]^{1/2}$$

La impedancia de componente inversa vendrá dada por:

$$Z = \left[\left(R_{e2} + \frac{R_{r2}}{2} \right)^2 + (X_{e2} + X_{r2})^2 \right]^{1/2}$$

que a la velocidad de régimen, se transformará en

$$Z_2 = \left[\left(R_{e2} + \frac{R_{r2}}{2} \right)^2 + (X_{e2} + X_{r2})^2 \right]^{1/2}$$

Dado que en un motor de inducción, la resistencia óhmica es muy pequeña comparada con su reactancia, podemos asumir sin gran error que la impedancia de componente inversa a la velocidad de régimen, es prácticamente igual a la impedancia de componente directa a rotor parado. Por lo tanto, la relación entre las impedancias de componente directa e inversa a la velocidad de régimen en un motor de inducción, se aproxima a la relación entre su intensidad de arranque y la de plena carga. Así, para un motor en el que la intensidad de arranque es 6 veces la nominal, Z_1/Z_2 sería igual a 6.

Lo que antecede nos conduce a afirmar que en un motor de inducción cuya intensidad de arranque es 6 veces la de su plena carga, para un 5% de componente inversa

en las tensiones de alimentación la componente inversa de las intensidades será de 6 veces ese 5%, es decir, el 30%. Por lo tanto, si la componente inversa del sistema de las tensiones de alimentación sobrepasara el 17%, la componente inversa de las intensidades absorbidas por el motor sería superior a la componente directa. ($6 \times 17=104\%$)

La componente inversa de las intensidades no afecta de manera sensible al par motor, ya que para un desequilibrio del orden del 10% en tensiones, el par negativo producido por la componente inversa de intensidad, no supera el 0,5% del par de plena carga. El efecto principal de la componente inversa de intensidad es el notable incremento de las pérdidas en el motor (especialmente en el cobre) reduciendo para el mismo calentamiento de los devanados, la disponibilidad de par motor que se tiene con tensiones equilibradas. Como cuantificación, y a título de ejemplo, señalamos que en un motor de inducción normal de intensidad de arranque igual a $6 I_n$ y para un desequilibrio del 10% en las tensiones de alimentación, la disponibilidad de par para el mismo calentamiento que tendríamos sin las tensiones desequilibradas sería del 80% del de plena carga.

Esta peculiaridad de la componente inversa de intensidad se debe tener en cuenta al diseñar la función térmica de protección de los motores y, generalmente, su influencia se suele reflejar haciendo que al flujo de carga I^2 que se hace circular en la analogía de la imagen térmica, se le introduzca un efecto multiplicador de la componente inversa de intensidad I_2 , de forma que, $I^2 = I_1^2 + KI_2^2$ siendo I_1 e I_2 , respectivamente, las componentes directa e inversa de las intensidades. La constante $K > 1$, varía entre 3 y 10 dependiendo del tipo de motor.

• Funcionamiento en vacío

Existen motores que arrastran cargas, como bombas de agua o de otra clase de fluidos, que no deben de funcionar en vacío, debiendo desconectarse rápidamente el motor para evitar que se produzcan deterioros graves en las bombas, por su funcionamiento en estas condiciones.

Por ello, en las protecciones de estos motores, se debe de incluir una función de mínima intensidad temporizada que permita ser ajustada a niveles cercanos a la intensidad de vacío del motor, que viene a ser del orden del 30% de la intensidad de plena carga. Por debajo de este nivel, se deberá desconectar el motor.

• Sobretensiones y subtensiones

Sobretensiones

En equipos eléctricos tales como generadores, transformadores y motores, que están constituidos en gran parte por bobinados, es práctica recomendada que sean protegidos contra las sobretensiones prolongadas que procedan de su sistema eléctrico de alimentación. La protección se realiza a través de una función temporizada de máxima tensión regulable entre 0 y 30 s. actuando sobre el circuito de desconexión del motor. La función de máxima tensión mide, generalmente, la tensión entre fases de la red.

A veces se omite esta protección por existir otra situada en otro punto distinto de la red, evitando que las sobretensiones afecten al motor por haber sido desconectados otros interruptores más generales que el del propio motor.

Subtensiones

Si se produce un descenso en la tensión que alimenta al motor se reduce notablemente el par, originando dificultades para arrastrar la carga y pudiendo esto ser incluso origen de un bloqueo de rotor. La bajada de tensión produce un aumento del deslizamiento y una reducción de la velocidad en los motores asíncronos, lo que, en caso de retorno de la tensión nominal, puede acarrear esfuerzos mecánicos y corrientes importantes. Además, el restablecimiento automático de la tensión de alimentación después de una pérdida de la misma, puede acarrear serios problemas en el motor síncrono.

Estos descensos se pueden producir por insuficiencia de potencia en la red o por faltas que se produzcan en la misma con tiempos excesivos en despeje, comprometiendo seriamente el motor en caso de continuar conectado.

La protección se realiza a través de una función temporizada de mínima tensión, con temporizaciones ajustadas a los valores adecuados para evitar desconexiones por bajadas transitorias de tensión.



Protecciones adicionales para motores síncronos

Aparte de las protecciones que hemos descrito como comunes para todos los motores, vamos a señalar las que consideramos que se deben de añadir en el caso de motores síncronos.

• Pérdida de excitación

La pérdida de excitación se produce por un cortocircuito franco o por la apertura del devanado de campo. Se debe de evitar que por esta causa el motor pierda su velocidad de sincronismo, funcionando entonces como asíncrono y produciéndose en los devanados grandes calentamientos.

La protección recomendada es la misma que para los generadores, aunque en motores de tamaños no excesivamente grandes la práctica habitual es la vigilancia de la intensidad del rotor a través de una función de mínima intensidad.

En grandes motores síncronos puede hacerse mediante una función de impedancia (Mho invertida) que mida la variación de la misma al producirse una pérdida de excitación. Si el motor síncrono dispone de protección contra el sobrecalentamiento del amortiguador y contra el del estator, de forma indirecta se estará proporcionando una protección contra la pérdida de excitación.

• Sobrecargas en el rotor

Una función de máxima intensidad temporizada más una instantánea de sobreintensidad protegerán el rotor contra las sobrecargas que se puedan producir en el circuito de excitación y, al mismo tiempo, pueden servir como protección del transformador que alimenta el circuito de rectificadores de la excitación.

• Mínima frecuencia

El descenso de la frecuencia, al igual que la tensión, supone una disminución del par motor, haciendo que éste frene, con el consiguiente calentamiento de los devanados.

En grandes motores síncronos es habitual una protección de mínima frecuencia que opere con frecuencias por debajo de los 48 Hz. en redes de 50 Hz de frecuencia nominal.

En los casos que exista un programa de deslastre de cargas para las bajadas de frecuencia que se puedan producir en la red, al motor se le considera como carga no preferente y desconectable para tratar de recuperar la frecuencia. En estas situaciones las desconexiones se realizan para frecuencias que desciendan por debajo de los 49,8 Hz.



En motores síncronos se deben tener en cuenta la pérdida de excitación, las sobrecargas en el rotor y la mínima frecuencia

Protección integral de motores

Se ha tratado de razonar con la mayor fidelidad posible los diferentes aspectos que se deben tener en cuenta en la protección de motores; a continuación, vamos a definir las diferentes funciones que, a nuestro juicio, deben formar un terminal de protección integral de motores de inducción.

- **Sobrecarga térmica**

Esta función (49) debe de incluir varias curvas de Intensidad - Tiempo, para seleccionar la más adecuada para proteger un motor concreto. Tendrá igualmente la posibilidad de seleccionar la constante **K** del efecto multiplicador de la componente I_2 de secuencia negativa. El valor de la sobremarcha o inercia térmica no debe ser superior al 2 %.

- **Sobreintensidad de componente directa**

Esta función de sobreintensidad instantánea (50) de la componente directa I_1 tendrá una demora del orden de 50 ms. con el fin de evitar actuaciones intempestivas ante los picos que se producen en los arranques del motor, y servirá como protección contra las faltas entre fases del estator, contorneos en bornas y faltas en la línea de alimentación desde el motor hasta su interruptor.

- **Sobreintensidad de componente homopolar**

Será una función de sobreintensidad instantánea (50N) de la componente homopolar I_0 con una demora del orden de 50 ms. que servirá como protección de las faltas a tierra de los devanados.

- **Sobreintensidad de componente inversa**

Será una función temporizada de sobreintensidad (51) de la componente inversa I_2 que servirá, principalmente, para la protección contra los arranques en monofásico.

- **Bloqueo de rotor y Arranques sucesivos**

Será una función temporizada de sobreintensidad (51) con tiempos ajustables entre 0-30 s. que servirá como protección de bloqueo de rotor. Al mismo tiempo servirá para abrir un ventana de tiempos cada vez que se produce un arranque del motor, con el fin de controlar el número de arranques sucesivos que se realizan sobre él.

- **Mínima intensidad**

Será una función temporizada de mínima intensidad (37) ajustable en las cercanías de la intensidad de vacío del motor (del orden del 30% de la intensidad de plena carga), para evitar, en el caso de arrastrar bombas de fluidos, la marcha de éstas en vacío.



Opciones

Aparte del equipo básico de protección integral que hemos descrito, pueden requerirse, opcionalmente, las siguientes funciones de protección:

- **Diferencial de intensidades**

Función diferencial (87) para proteger las faltas entre fases de los devanados del estator, dependiendo del tamaño del motor.

- **Máxima tensión temporizada**

Función (59) contra las sobretensiones prolongadas que se produzcan en la línea de alimentación del sistema eléctrico.

- **Mínima tensión temporizada**

Función (27) contra las bajadas de tensión en la alimentación al motor, con la demora adecuada para evitar las desconexiones por transitorios de tensión que puedan producirse en la red.

- **Orden de sucesión de fases**

Esta función indicará en todo momento que el orden de sucesión de las fases es el preestablecido y servirá para evitar el arranque y funcionamiento del motor en el sentido contrario de giro.

Bibliografía



I. Lazar *Protective relaying for motors* Power Engineering Vol. 82 Sept. 1978 pp 66-69

J.E. Williams *Operation of 3-phase induction motors on unbalanced voltage* AIEE Transactions on Power Apparatus & Systems Vol. 73 April 1954, pp 125-133

P.G Cummings, J.r. Dunkin-Jacobs, R.H. Kerr *Protection of inductions motors against unbalanced voltage operation* IEEE Paper nº PCI - 83-3

A.N. Eliassen *The protection of high inertia drive motors during abnormal starting conditions* IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems Jul/Aug 1980 pp 1483-1492

W.A. Elmore, C.A. Kramer *Complete motor protection by microprocessor Relay* Western Protective Relay Conference Oct 21-23, 1986 Spokane WA

S.M. Meissel, J. Bandolino *Design and application of a microprocessor based motor protection relay with historical analysis for large motors* Protective Relaying Conference April 29-May 1987, Georgia Institute of Technology, Atlanta GA