

RESUMEN AMPLIADO: ARRANQUE A TENSIÓN PLENA Y REDUCIDA DE MOTORES DE INDUCCIÓN

1. Introducción general a los motores de inducción y al problema del arranque

Los motores de inducción trifásicos son las máquinas eléctricas más utilizadas en la industria debido a su robustez, sencillez constructiva, bajo costo de mantenimiento y buena eficiencia. Se emplean en sistemas de bombeo, ventilación, transporte de materiales, compresores, máquinas herramienta y un sinfín de aplicaciones más. Sin embargo, a pesar de su aparente simplicidad, la etapa de arranque de estos motores requiere un análisis cuidadoso debido a los altos valores de corriente que se presentan y al par que es necesario desarrollar para poner en movimiento la carga.

Durante el arranque, el rotor está inicialmente detenido, por lo que el deslizamiento es prácticamente del 100 %. En este estado, el motor se comporta de manera semejante a un transformador con el secundario en cortocircuito, lo que provoca que la corriente absorbida por el estator sea muy elevada. Esta corriente de arranque, también llamada corriente de rotor bloqueado, puede alcanzar valores que van de 5 a 8 veces la corriente nominal, e incluso más en algunos diseños especiales de alto par.

Aunque el motor está diseñado para soportar estas corrientes durante intervalos cortos de tiempo, la instalación eléctrica en su conjunto podría verse afectada. Si la red no tiene suficiente capacidad, aparecerán caídas de tensión considerables en los conductores, afectando a otros receptores conectados. Por ejemplo, las lámparas pueden parpadear o disminuir su brillo, y otros motores pueden experimentar un par insuficiente y perder velocidad. Es por ello que, en muchos casos, las compañías suministradoras e incluso los reglamentos de instalaciones eléctricas imponen límites a la magnitud de la corriente de arranque o exigen el uso de métodos de arranque a tensión reducida para motores por encima de cierta potencia.

Además de la corriente, el par de arranque es otro factor importante. Para que el motor logre acelerar hasta su velocidad nominal, el par electromagnético desarrollado debe ser superior al par resistente de la carga y a las pérdidas mecánicas. Si el método de arranque reduce demasiado el par, la velocidad puede estabilizarse en un punto inferior al nominal o incluso el motor puede quedar “trabado” sin lograr un arranque satisfactorio, con el riesgo de sobrecalentamiento.

Por todo lo anterior, el estudio de los distintos métodos de arranque es fundamental en el diseño y operación de sistemas de accionamiento eléctrico. Cada método presenta ventajas y desventajas en términos de complejidad, costo, reducción de corriente y par disponible, por lo que la selección adecuada depende de las características de la instalación y de la carga.

2. Arranque a tensión plena (arranque directo en línea)

El arranque a tensión plena, también conocido como arranque directo en línea, es el procedimiento más sencillo que puede emplearse en un motor de inducción trifásico. Consiste simplemente en conectar el estator directamente a la red de alimentación con su tensión nominal, mediante un interruptor, contactor o arrancador magnético.

En este método, la corriente de arranque solo está limitada por la impedancia propia del motor. En motores de jaula de ardilla, la resistencia del rotor es baja y la reactancia de dispersión es relativamente pequeña cuando el rotor está detenido, por lo que la corriente resultante es bastante grande. Esta corriente elevada suele ser admisible durante un tiempo corto, siempre que el número de arranques por hora sea limitado y que el motor disponga de la ventilación adecuada.

Una de las principales ventajas del arranque a tensión plena es que proporciona un par de arranque relativamente alto. Al aplicar la tensión nominal, el flujo magnético es el adecuado y el par desarrollado en los primeros instantes puede ser suficiente para arrancar cargas de par elevado, como compresores de pistón, trituradoras o algunas máquinas de proceso. Además, el equipo de control requerido es sencillo y económico, lo que hace que este método sea atractivo en instalaciones donde la red es robusta y las restricciones sobre la corriente de arranque no son estrictas.

Sin embargo, la corriente de arranque puede producir caídas de tensión inaceptables en redes con impedancia interna elevada o cuando se utilizan transformadores de distribución de potencia limitada. Estas caídas de tensión no solo afectan al propio motor, que puede ver reducida su capacidad de arrancar, sino también a otros equipos sensibles conectados a la misma red. Por este motivo, en muchas plantas industriales o zonas rurales, el arranque directo de motores de gran potencia no está permitido o solo se admite bajo condiciones especiales.

En las placas de datos de los motores se suele incluir una letra de código que indica la corriente de rotor bloqueado. Esta letra se relaciona con los kVA por caballo de fuerza que el motor demanda en esa condición. Con esta información es posible estimar la corriente de arranque y seleccionar los dispositivos de protección, tales como fusibles, interruptores automáticos y arrancadores, además de verificar el impacto sobre la red.

3. Concepto general de arranque a tensión reducida

Ante las limitaciones del arranque directo, se han desarrollado diversos métodos de arranque a tensión reducida cuyo objetivo principal es limitar la corriente de arranque a un valor aceptable para la instalación. El principio básico consiste en disminuir la tensión aplicada a las terminales del motor durante los primeros instantes de la puesta en marcha, para luego restablecerla a su valor nominal una vez que el motor ha alcanzado una velocidad cercana a la de régimen.

Cuando se reduce la tensión aplicada, la corriente de arranque disminuye aproximadamente en forma proporcional a dicha tensión. Por ejemplo, si se aplica el 80 % del voltaje nominal, la corriente de arranque también se reduce aproximadamente al 80 % de la que se tendría en arranque directo. Sin embargo, el par electromagnético es proporcional al cuadrado de la tensión; así, con el 80 % de tensión se obtiene solo un 64 % del par que habría con tensión nominal. Esta relación implica un compromiso importante: cuanto más se reduce la corriente, más se sacrifica el par de arranque.

Por tanto, el diseño y la selección de un método de arranque a tensión reducida deben considerar cuidadosamente el tipo de carga. Para cargas de par bajo o moderado, como bombas centrífugas o ventiladores, suele ser posible reducir la tensión de manera significativa sin impedir el arranque. En cambio, para cargas con par elevado desde el arranque, la reducción de tensión debe ser moderada para no comprometer el desempeño. Los métodos de arranque a tensión reducida pueden agruparse en dos grandes categorías:

a) Métodos en los cuales la tensión de línea es nominal, pero la forma de conexión de los devanados del motor hace que la tensión efectiva por fase sea menor. En esta categoría se encuentran el arranque estrella-triángulo y el arranque con arrollamiento dividido.

b) Métodos en los que se reduce realmente la tensión de línea aplicada al motor mediante dispositivos externos, como autotransformadores, resistencias primarias o reactancias primarias.

Cada uno de estos métodos ofrece una combinación distinta de reducción de corriente, par de arranque, complejidad de control y costo económico.

4. Método de arranque estrella-triángulo

El método estrella-triángulo se utiliza en motores preparados para funcionar normalmente en conexión triángulo a tensión nominal y que disponen de seis terminales accesibles en la caja de conexiones. Durante el arranque, los devanados se conectan en estrella, mientras que en régimen normal se reconectan en triángulo.

Cuando el motor está conectado en estrella, la tensión de fase es igual a la tensión de línea dividida entre la raíz de tres. Por ejemplo, si la red es de 440 V y el motor está en estrella, cada devanado recibe aproximadamente 254 V. Esto significa que la corriente por fase y el par se reducen. De manera aproximada, la corriente de línea en arranque estrella es un tercio de la corriente de línea que se tendría si el motor arrancara directamente en triángulo, y el par de arranque también se reduce cerca de un tercio.

Esta reducción de corriente es muy beneficiosa para la red, pero implica que el par disponible es menor. Por ello, el método estrella-triángulo es adecuado principalmente para cargas que no exigen un par elevado al arranque, como bombas centrífugas sin carga estática importante, ventiladores y máquinas con inercia moderada.

La transición de estrella a triángulo puede realizarse con transición abierta o cerrada. En la transición abierta, el motor se desconecta momentáneamente de la línea antes de reconectarse en triángulo. Esto puede generar transitorios de corriente y par algo bruscos, especialmente si la commutación no se realiza en el instante adecuado. La transición cerrada incluye resistencias o contactos adicionales que reducen los efectos transitorios. En cualquier caso, el diseño correcto del circuito de control y el ajuste del tiempo de commutación son cruciales para evitar esfuerzos mecánicos y eléctricos excesivos.

5. Arranque con arrollamiento dividido

En el arranque con arrollamiento dividido, cada fase del estator está formada por dos circuitos en paralelo. Durante el arranque solo se conecta uno de estos circuitos, lo que produce una reducción en la sección efectiva del conductor y, en consecuencia, en la corriente y el par desarrollados. Una vez que el motor ha acelerado, se conecta el segundo circuito en paralelo, permitiendo que el motor opere con toda su capacidad. Este método tiene la ventaja de que la transición entre la condición de arranque y la de régimen puede hacerse en forma cerrada, ya que no es necesario desconectar completamente el motor de la línea. Esto permite una aceleración más suave y con menos transitorios. Sin embargo, exige un diseño especial del motor; no es recomendable modificar motores estándar para adaptarlos a este tipo de arranque, ya que podrían presentarse problemas de calentamiento y desequilibrios en los devanados.

El arranque con arrollamiento dividido proporciona una reducción moderada de la corriente de arranque y del par, por lo que es útil cuando se requiere un compromiso entre simplicidad y desempeño, y cuando la carga no demanda un par extremadamente elevado en los primeros instantes.

6. Arranque con autotransformador

El arranque con autotransformador es uno de los métodos más utilizados para motores de mayor potencia, debido a que ofrece una buena relación entre la reducción de la corriente de línea y el mantenimiento de un par de arranque aceptable. En este esquema, el motor se alimenta inicialmente a través de un autotransformador con derivaciones que suministran una fracción de la tensión nominal, por ejemplo, 80 %, 65 % o 50 %.

Cuando se emplea un autotransformador con toma al 80 %, la tensión aplicada al motor es el 80 % de la nominal. La corriente de arranque en el motor se reduce aproximadamente a ese mismo porcentaje, pero la corriente en la línea se reduce aún más, ya que el autotransformador transforma tanto tensión como corriente. De hecho, la corriente en la línea puede ser del orden del 64 % de la corriente que se tendría en un arranque directo, dependiendo de la relación de transformación.

Este método puede implementarse con transición abierta o cerrada. La transición cerrada es preferible porque mantiene al motor conectado durante el cambio de tensión, evitando interrupciones bruscas y reduciendo los transitorios de par. El costo inicial de un autotransformador de arranque es superior al de un simple arrancador directo o un esquema estrella-triángulo, pero resulta justificado en aplicaciones donde se requiere limitar estrictamente la corriente de arranque sin sacrificar demasiado el par disponible.

7. Arranque con resistencias primarias

El arranque con resistencias primarias consiste en insertar resistencias en serie con cada fase de alimentación del motor. Estas resistencias provocan una caída de tensión considerable cuando circula la corriente de arranque. De esta forma, la tensión efectiva en las terminales del motor se reduce y, en consecuencia, se disminuyen tanto la corriente como el par de arranque.

A medida que el motor acelera, la corriente decrece y la caída de tensión en las resistencias se reduce, por lo que la tensión aplicada al motor aumenta gradualmente. En algunos sistemas, las resistencias se eliminan por etapas mediante contactores, hasta que el motor queda conectado directamente a la red. Esto permite una aceleración relativamente suave.

La desventaja principal de este método es la disipación de energía en forma de calor en las resistencias, lo que implica pérdidas adicionales y, en algunos casos, la necesidad de dispositivos de ventilación o disipación

térmica. Debido a esta ineficiencia, el arranque con resistencias primarias ha sido desplazado en muchas aplicaciones por el arranque con autotransformador, más eficiente desde el punto de vista energético.

8. Arranque con reactancia primaria

En el arranque con reactancia primaria se utilizan reactancias inductivas conectadas en serie con cada fase del motor. El principio es similar al de las resistencias primarias, pero en este caso la caída de tensión es mayormente reactiva, por lo que las pérdidas de potencia activa son menores. Este método se aplica principalmente en motores de mediana y gran potencia, especialmente en sistemas de media tensión, donde la instalación de resistencias de gran potencia sería poco práctica.

La presencia de reactancias limita la corriente de arranque, pero también empeora el factor de potencia durante la etapa de arranque, ya que la corriente es predominantemente inductiva. Conforme el motor acelera y la corriente disminuye, el factor de potencia mejora y la tensión en las terminales del motor se incrementa.

En general, para obtener una aceleración más uniforme se requieren varias reactancias que se desconectan en etapas, ya que no es posible variar el valor de la reactancia de manera continua como sí podría hacerse con una resistencia de tipo ajustable.

9. Arranque de motores de inducción de rotor devanado

Los motores de inducción de rotor devanado permiten un control más flexible del par y la corriente de arranque, gracias a la posibilidad de insertar resistencias externas en el circuito del rotor. Durante el arranque, se conectan resistencias de valor adecuado a través de anillos rozantes. Al aumentar la resistencia total del rotor, se modifica la característica par–velocidad del motor, de modo que el par máximo puede alcanzarse a un deslizamiento mayor y puede obtenerse un par de arranque muy elevado.

La inserción de resistencias externas también tiene el efecto de limitar la corriente de rotor y, en consecuencia, la corriente de línea en el estator. Adicionalmente, el factor de potencia mejora durante el arranque, ya que el circuito del rotor presenta una componente resistiva más importante. Conforme el motor acelera, las resistencias pueden disminuirse progresivamente, hasta cortocircuitar completamente el rotor para operar en régimen normal.

Si las resistencias externas poseen capacidad de dissipación suficiente, es posible utilizarlas no solo durante el arranque sino también para el control de velocidad. Al incrementar la resistencia, la velocidad de régimen disminuye, lo que permite ajustar la velocidad del motor a los requerimientos del proceso, aunque con pérdidas adicionales en las resistencias y un rendimiento global menor.

Este tipo de motor es especialmente útil en aplicaciones donde se requiere un par de arranque muy elevado, arranques frecuentes bajo carga pesada o regulación de velocidad en un rango limitado, como en grúas, elevadores industriales y algunos sistemas de transporte continuo.

Conclusión general

En conclusión, los métodos de arranque de motores de inducción, tanto a tensión plena como reducida, constituyen una herramienta fundamental para garantizar una operación segura, eficiente y confiable en sistemas de accionamiento eléctrico. El arranque directo en línea se caracteriza por su sencillez y bajo costo, ofreciendo un par elevado pero una corriente de arranque que puede resultar problemática en redes débiles o cuando la potencia del motor es grande.

Los métodos de arranque a tensión reducida —estrella-tríangulo, arrollamiento dividido, autotransformador, resistencias primarias, reactancias primarias y el uso de resistencias en el rotor devanado— proporcionan diferentes combinaciones de reducción de corriente y par disponible. La elección del método adecuado depende de factores como la potencia del motor, la capacidad de la red, la naturaleza de la carga, la frecuencia de arranques y las restricciones normativas.

Un análisis cuidadoso de estos aspectos permite seleccionar el esquema de arranque más apropiado, logrando así que el motor de inducción, componente clave en innumerables procesos industriales, cumpla su función con el

menor impacto posible sobre la instalación eléctrica y con la máxima confiabilidad a lo largo de su vida útil.