

ARRANQUE Y CONTROL DE LA VELOCIDAD DE MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN

Resumen

Norberto A. Lemozy

1 INTRODUCCIÓN

A continuación se presenta un resumen de los distintos métodos de arranque y de control de la velocidad, empleados con los motores asincrónicos o de inducción trifásicos.

Sin duda alguna los motores asincrónicos o de inducción son los más empleados en la actualidad y los que más perspectivas tienen de mantener esa supremacía. Estos motores se construyen desde pequeñas potencias, decenas de Watts hasta decenas de Megawatts. Los más pequeños suelen ser monofásicos, hasta no más de dos kilowatts, y tienen un enorme campo de aplicación en equipos electrodomésticos. La industria emplea mayormente motores trifásicos en potencias desde uno a cincuenta kilowatts, no obstante hay aplicaciones industriales que requieren motores de grandes potencias, de media tensión.

2 PUESTA EN MARCHA

Como estos motores se construyen con dos tipos de rotor, los métodos de arranque son distintos en un caso que en el otro.

La gran mayoría de los motores de inducción poseen *rotor en cortocircuito*, también llamado rotor “jaula de ardillas” o simplemente “jaula”; pero para aplicaciones que requieren gran cupla de arranque y baja corriente, se emplean motores con *rotor bobinado*, que por su mayor complejidad son más costosos que los de rotor en cortocircuito.

Los distintos métodos de arranque se pueden clasificar de la siguiente manera, tabla I.

Tabla I. Métodos de arranque.

Rotor en cortocircuito	Arranques a tensión reducida	Arranque directo
		Estrella triángulo
		Autotransformador
		Impedancias estatóricas
Rotor bobinado	Con resistencias rotóricas	Arranadores suaves

Las principales características y aplicaciones de estos procedimientos se analizan a continuación.

2.1 Arranque directo

Es el más simple de todos los métodos de arranque, consiste en conectar directamente el motor a una red de su tensión y frecuencia nominales; no requiere más equipamiento que el de maniobra y protección, por lo tanto es el más económico.

El motor desarrolla toda su cupla, que en el momento del arranque es de 1 a 2,5 veces la nominal y absorbe una corriente de 5 a 7 veces la nominal. Debido a la gran cupla desarrollada, el

motor acelera y alcanza la velocidad de régimen rápidamente. Desde el punto de vista del motor, esto es bueno, ya que también la corriente se reducirá rápidamente y producirá poco calentamiento del mismo.

Los problemas que se pueden presentar son dos:

a) Que la carga conectada al motor no admita aceleraciones bruscas, como por ejemplo ascensores, máquinas textiles, de imprenta, para la fabricación de papel o hilos, etc.

b) Que la caída de tensión producida por la corriente de arranque supere el valor admitido por otros usuarios o equipamiento conectados a la misma red de alimentación. La reglamentación de la Asociación Electrotécnica Argentina AEA, establece que esa caída de tensión no debe superar el 15% de la tensión nominal de la red. La caída de tensión que se produce en la red depende de la capacidad de la misma, es decir de su impedancia serie o, en otras palabras, de su potencia de cortocircuito.

De no existir ninguno de estos problemas, sin duda el arranque más indicado será el directo; en caso contrario habrá que emplear algún arranque a tensión reducida.

2.2 Arranques a Tensión Reducida

A una dada velocidad, el motor de inducción se comporta como una impedancia casi lineal, es decir la corriente absorbida es proporcional a la tensión aplicada; por lo tanto si se reduce ésta última, la corriente se reducirá proporcionalmente.

Pero la cupla desarrollada por el motor depende del *cuadrado* de la tensión aplicada, entonces variarán ambas magnitudes.

2.2.1 Arranque estrella triángulo

Es el más simple de los arranques a tensión reducida, el equipamiento auxiliar necesario es mínimo. Consiste en conectar el motor a la red primero en estrella y luego cambiar las conexiones a triángulo. El cambio de conexiones del motor se puede realizar manualmente, por medio de un conmutador especial, o como es lo más común, por medio de tres *contactores* y un *temporizador* que fija el momento de la conmutación.

Como el motor queda conectado a la red en triángulo, para poder aplicar este método de arranque, se debe cumplir que *la tensión de línea nominal del motor, conectado en triángulo, debe ser igual a la tensión de línea de la red*, por ejemplo para realizar un arranque estrella triángulo en una red de 380 V de línea, las tensiones de línea nominales del motor deben ser 660 V en estrella y 380 V en triángulo.

En el ejemplo del párrafo anterior, se ve que cuando el motor está conectado en estrella, está preparado para operar con 660 V, pero en su lugar se le aplican los 380 V de la red, por ese motivo es un arranque a tensión reducida. Luego que el motor acelera, se lo conmuta a triángulo y sigue trabajando con su tensión nominal de 380 V.

Haciendo un análisis más detallado se puede determinar que en este método de arranque tanto la corriente en la línea como la cupla desarrollada por el motor cuando está en estrella, *se reducen a la tercera parte* del valor que tienen cuando está conectado en triángulo.

El principal inconveniente de este procedimiento es la reducida cupla de arranque que posee el motor cuando está conectado en estrella y que puede no alcanzar para acelerar la carga en un tiempo razonable. Por este motivo, el arranque estrella triángulo se emplea para cargas que

requieren muy poca cupla de arranque, como ser ventiladores, bombas centrífugas o máquinas que pueden arrancar sin carga.

2.2.2 Arranque con autotransformador

Si el método anterior no es adecuado por la escasa cupla de arranque, se puede reducir la tensión aplicada al motor por medio de un autotransformador, en este caso el factor de reducción de tensión $\alpha < 1$ se lo puede elegir con el valor más adecuado a la aplicación en particular. Por su gran versatilidad, este es uno de los métodos más empleados y en cuanto al costo es un poco más caro que el estrella triángulo ya que se le agrega el autotransformador de arranque, que por su diseño es bastante económico. Otra ventaja de este procedimiento es que no hay restricciones en cuanto a la conexión del motor, basta que su tensión nominal coincida con la de la red.

Haciendo un análisis de la corriente absorbida y de la cupla desarrollada resulta que *ambas se reducen en α^2* .

2.2.3 Arranque con impedancias estáticas

En algunas aplicaciones particulares la puesta en marcha se realiza intercalando entre el mismo y la red una impedancia, la que puede ser un reactor o una simple resistencia, que es lo más económico, que luego de un cierto tiempo se cortocircuita. En este método la reducción de la tensión se debe a la caída en la impedancia serie, la que depende de la corriente absorbida. Si se denomina α al factor de reducción de tensión, que en este caso no es constante, la corriente se reduce en α pero la cupla lo hace en α^2 , es decir *se reduce más la cupla que la corriente*.

Con esta forma de puesta en marcha se consiguen *arranques suaves*, una aplicación bastante frecuente es en ascensores.

2.2.4 Arrancadores suaves

Estos son dispositivos electrónicos que varían la tensión aplicada al motor recortando la tensión de la red, sin variar su frecuencia fundamental y, como en el caso anterior, también *reducen en mayor proporción la cupla que la corriente absorbida*.

Si bien estos aparatos son relativamente costosos, pueden ofrecer otras prestaciones que los hacen muy atractivos. Por ejemplo pueden generar rampas de crecimiento y de reducción de tensión programadas lo que permitiría acelerar y detener el motor con suavidad, pueden limitar la corriente durante el arranque a un valor preestablecido, pueden invertir el sentido de giro, frenar el motor, ser controlados a la distancia, brindar protección de sobrecarga, etcétera.

2.3 Arranque con resistencias rotóricas

Como ya se dijo, existen motores asincrónicos que poseen un rotor bobinado con un arrollamiento trifásico semejante al del estator; esta construcción más costosa se emplea porque permite intercalar en las fases rotóricas, a través de *anillos rozantes* y *escobillas*, un *reóstato de arranque*. En el momento de la puesta en marcha se intercala el máximo valor de resistencia y, a medida que el motor acelera, esa resistencia se va reduciendo, en forma manual o automática, hasta llevarla al *cortocircuito*.

Como se puede deducir a partir del circuito equivalente de la máquina, el procedimiento anterior permite obtener elevados valores de cupla durante toda la aceleración y bajos valores de corriente absorbida que de otra manera no se pueden alcanzar.

Debido a su mayor costo, este tipo de motores se emplea cuando es realmente necesario y en aplicaciones tales como grúas, guinches, cintas transportadoras, molinos y en aquellos casos que los motores deben arrancar con una carga pesada.

3 CONTROL DE LA VELOCIDAD

Si de la expresión del resbalamiento (1) se despeja la velocidad Ω resulta:

$$s = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad (1)$$

$$\Omega = \Omega_s (1 - s) = \frac{2\pi f}{p} (1 - s) \quad (2)$$

Donde:

- f : Frecuencia de la tensión aplicada [Hz].
- p : Número de pares de polos de la máquina.
- s : Resbalamiento.

La expresión (2) muestra los tres elementos que se pueden modificar para variar la velocidad de la máquina.

3.1 Variación del número de polos

La cantidad de polos que desarrolla el devanado estático de una máquina depende de su diseño y en general es una característica que no se puede variar, pero se han desarrollado arrollamientos especiales que, reconectándolos desde el tablero de bornes del motor, pueden generar distinta cantidad de polos y consecuentemente campos rotantes de distintas velocidades sincrónicas.

Ya que el número de pares de polos tiene una variación discreta, estrictamente hablando estos son motores de dos, tres o hasta cuatro velocidades, sin una variación continua entre las mismas; sin embargo pueden resolver una gran cantidad de situaciones prácticas. Dentro de esta categoría de motores se encuentran los que tienen arrollamientos estáticos independientes, los Dahlander y los que hacen “modulación de polos” (motores PAM).

Como para que haya conversión de energía el rotor debe tener la misma cantidad de polos que el estator, en estos motores solamente se emplean *rotors en cortocircuito* que, *automáticamente generan la misma cantidad de polos que el estator*.

3.2 Variación del resbalamiento

Dentro de ciertos límites es posible variar el resbalamiento de los motores de inducción, en particular los de rotor bobinado, por ejemplo intercalando resistencias en serie en las fases del rotor, lo que aumenta el resbalamiento y baja la velocidad. Pero este procedimiento requiere de un motor con rotor bobinado (más costoso) y de un reóstato que disipa potencia activa y baja el rendimiento del conjunto. Si bien se ha diseñado dispositivos electrónicos que permiten recuperar esa potencia, este procedimiento es muy limitado.

También se puede variar el resbalamiento inyectando una tensión adecuada en el rotor de un motor con rotor bobinado, no obstante lo complejo del método se ha desarrollado un motor de velocidad variable basado en este principio: el motor Schrage, que si bien fue muy empleado

hace algunas décadas, ya ha quedado en desuso debido a su gran complejidad, costo y mantenimiento.

Una forma limitada, pero sencilla, de aumentar el resbalamiento en un motor con rotor en cortocircuito es reduciéndole la tensión aplicada. Si bien la disminución de la velocidad no es muy grande, este procedimiento es muy empleado en ventiladores domésticos, ya que el caudal de aire depende en gran medida de la velocidad. La tensión suele reducirse intercalando un reactor en serie con la red.

3.3 Variación de la frecuencia

Desde la aparición en el mercado de los motores de inducción se trató de controlar su velocidad variando la frecuencia de la alimentación, pero esto no nada fácil ya que las redes de corriente alterna son de frecuencia constante. No obstante se inventaron grupos de máquinas que lo permitían, pero no prosperaron y durante mucho tiempo resultó más económico utilizar motores de corriente continua que son muy fáciles de controlar.

Con el advenimiento de la electrónica de potencia cambió la situación, pero aún los primeros equipos resultaban costosos y se hacían a pedido, solamente con la aparición de dispositivos de potencia de estado sólido, de relativamente bajo precio y características destacadas, cambió radicalmente la situación. Los dispositivos más usados son los denominados IGBT del inglés Isolated Gate Bipolar Transistor que comenzaron a comercializarse alrededor del año 1990. Actualmente se fabrican variadores de velocidad con IGBT, de excelentes prestaciones, que permiten cubrir todas las necesidades del mercado y a un costo razonable. Tanto es así que en las instalaciones nuevas, han desplazado a los motores de corriente continua, los que han quedado relegados para aplicaciones especiales.

A fin de no modificar el flujo en el motor, si se varía la frecuencia también se debe variar la tensión aplicada; si esto no se hace el motor puede perder cupla o saturarse y aumentar su calentamiento. Esto complica el control y se cumple dentro de ciertos límites.

Hay dos tipos de convertidores de frecuencia: los que pasan directamente de corriente alterna de una frecuencia a corriente alterna de otra frecuencia, denominados “cicloconvertidores” y los que primero transforman la corriente alterna en corriente continua y luego ésta a corriente alterna de otra tensión y frecuencia, genéricamente se los denomina “convertidores de enlace”.

En los cicloconvertidores es complicado variar la tensión de salida y requieren una gran cantidad de semiconductores de potencia; por esos motivos se los emplea en casos especiales, de potencias muy elevadas y con rangos de variación de la velocidad reducidos.

Los convertidores de enlace que convierten la CC en CA utilizando IGBT son los más empleados, por su costo y prestaciones y utilizan la denominada modulación de ancho de pulso PWM (Pulse Wide Modulation) la que permite ajustar la frecuencia y la tensión de salida dentro de límites muy amplios. Estos variadores ofrecen una gran variedad de prestaciones tales como mantener la velocidad constante en el valor de consigna con tolerancias muy estrechas, rampas de aceleración y frenado, limitación de corriente, protección contra sobrecarga del motor, frenado disipativo y con recuperación de energía, comando a distancia, inversión de marcha, etcétera.

El empleo de un variador de velocidad elimina la necesidad de utilizar algún otro método de arranque.

4 BIBLIOGRAFÍA

Chapman, Stephen J.: “*Máquinas Eléctricas*”, Mc. Graw Hill, 4ª edición, 2005.

Gray C. B.: “*Máquinas Eléctricas y Sistemas Accionados*”, Alfaomega, 1993.

Ing. Norberto A. Lemozy
2008