

CAPÍTULO 1

MÁQUINAS ELÉCTRICAS CONVENCIONALES

Las máquinas eléctricas están a nuestro alrededor en todas partes, generadores en plantas de energía están conectados a una red eléctrica trifásica de corriente alterna (CA), el refrigerador y la aspiradora están conectados a una fase única de la red de CA y se activan o desactivan por medio de un contactor simple. En los coches, la corriente continua (CC) de la batería se utiliza para proporcionar energía al motor de arranque, motores de limpiaparabrisas, entre otras cosas. Estos motores funcionan con corriente continua y en la mayoría de los casos son activados por un interruptor (generalmente relé) sin ningún tipo de técnica de control. Sin embargo, muchas aplicaciones accionadas por máquinas eléctricas requieren un control más avanzado, dependiendo el caso [15].

Entre los distintos tipos de motores existentes, es el de inducción el más utilizado en diversas aplicaciones, principalmente por el bajo costo de mantenimiento y las ventajas en sus prestaciones. El alto grado de aplicación de estos accionamientos (principalmente a nivel industrial), ha motivado el desarrollo de los mismos así como de los métodos de control asociados, evolucionando desde el control escalar como el control de voltaje-frecuencia (V/F) o el control de deslizamiento, llegando hoy

en día a técnicas de control del tipo vectorial como el control de campo orientado directo e indirecto o el control directo de par, así como el control sin sensores¹ [16]-[17].

En este capítulo se presenta una reseña histórica de las máquinas eléctricas, realizando una clasificación de ellas, para luego explicar con más detalle la máquina de inducción. El capítulo concluye con la presentación de los distintos tipos de convertidores de frecuencia.

1.1. Clasificación de las máquinas eléctricas

Se podría tomar distintas clasificaciones de las máquinas eléctricas, la primera podría ser de acuerdo a un punto de vista estrictamente energético, teniendo tres tipos fundamentales; el primero, el generador, que transforma la energía mecánica en eléctrica, mientras que en el caso inverso, si transforma la energía eléctrica en mecánica, decimos que es un motor. Por otro lado, llamamos transformador, a quien transforma una energía eléctrica de entrada con determinadas magnitudes de tensión y corriente en otra energía eléctrica de salida con magnitudes diferentes. Una segunda clasificación se podría hacer tomando en cuenta sus constructivas e intrínsecas con respecto a la velocidad; máquinas síncronas o asíncronas. Por último, y considerada como la clasificación más habitual (por muchos autores), es de acuerdo con la fuente de energía que utilizan; máquinas de corriente continua y máquinas de corriente alterna.

Diferentes reportes demuestran que la máquina de CC (ver Figura 1.1) fue el primer dispositivo práctico para convertir la energía eléctrica en energía mecánica (y viceversa, en su forma de generador). Su aplicación en accionamientos industriales fue debido a características de su funcionamiento sencillo y rendimiento flexible, así como su alta eficiencia. También fueron utilizados en aplicaciones donde se necesitaba un funcionamiento a velocidad variable, ya que el flujo y el par podrían ser controlados fácilmente por el campo y la corriente del inducido. En particular, la excitación independiente del motor de CC se ha

¹“*Sensorless control*”, su equivalente en la nomenclatura anglosajona.

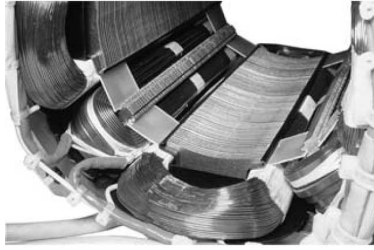


Figura 1.1: Motor de corriente continua.

utilizado principalmente para aplicaciones en las que existe el requisito de rápida respuesta. Sin embargo, los motores de CC tienen ciertas desventajas, que son asociadas a la existencia del conmutador y las escobillas. Es decir, que requieren un mantenimiento periódico, ya que no se puede utilizar en entornos explosivos o corrosivos y tienen limitada capacidad de conmutación bajo condiciones de operación a alta velocidad y voltaje. Estos problemas se pueden superar mediante la utilización de motores de CA (Figura 1.2), que tienen una estructura simple y robusta, facilidad en su mantenimiento y muy económicos. En general poseen dimensiones más pequeñas en comparación a los motores de CC, lo que hace que los motores de CA puedan ser diseñados con potencia de salidas substancialmente más elevadas para un menor peso y masa giratoria [16]-[17].

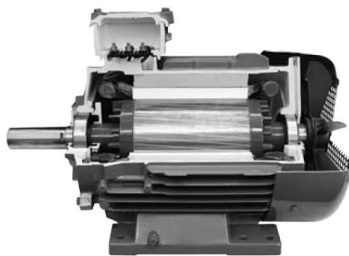


Figura 1.2: Motor de corriente alterna.

1.2. Máquinas asíncronas o de inducción

Su principio de funcionamiento está basado en el concepto de campo magnético giratorio. La principal diferencia con los demás tipos de máquinas se debe a que no existe corriente conducida a uno de los arrollamientos. La corriente que circula por uno de los devanados (generalmente el situado en el rotor) se debe a la f.e.m.² inducida por la acción del flujo del otro devanado, y por esta razón se denominan máquinas de inducción. También reciben el nombre de máquinas asíncronas debido a que la velocidad de giro del rotor no es la de sincronismo impuesta por la frecuencia del voltaje aplicado a los bornes del motor. La importancia de los motores asíncronos se debe a su construcción simple y robusta, sobre todo en el caso del rotor de forma de jaula de ardilla (Figura 1.3) proporcionando buenas prestaciones dinámicas con un reducido costo de mantenimiento y alta fiabilidad [18].



Figura 1.3: Rotor en jaula de ardilla.

1.2.1. Evolución de las máquinas de inducción

Ya en el año 1888 fue publicado el descubrimiento por Galileo Ferraris en Italia y por Nikola Tesla en los Estados Unidos. Ambos diseños de motores asíncronos se basaban en la producción de campos magnéticos giratorios con sistemas bifásicos. Las patentes de Tesla fueron adquiridas por George Westinghouse, quien construyó en sus

²f.e.m. fuerza electromotriz.

fabricas motores bifásicos alrededor de los años 1890. En este mismo año Dolivo Dobrovolsky inventó el motor asíncrono trifásico, empleando un rotor en forma de jaula de ardilla y utilizando un devanado distribuido en el estátor.

Desde finales del siglo XX y con el desarrollo tan vertiginoso de la electrónica industrial, con accionamientos electrónicos como el inversor u onduladores y cicloconvertidores, que permiten obtener una frecuencia variable a partir de la frecuencia constante de la red, y con la introducción de el microprocesador combinado con la electrónica de potencia, se han realizado grandes cambios, y los motores asíncronos se están imponiendo poco a poco en los accionamientos eléctricos con velocidad variable [18].

1.2.2. Funcionamiento de las máquinas de inducción

La máquina de inducción (MI) está formada por un estátor y un rotor. En el primero se coloca habitualmente el inductor, alimentado por una red que puede ser monofásica o trifásica. El rotor es inducido, y las corrientes que circulan por él aparecen como consecuencia de la interacción con el flujo del estátor. Dependiendo del tipo de rotor, estas máquinas se clasifican en; rotor en jaula de ardilla o en cortocircuito, y rotor davanado o con anillos. Por otro lado, para el caso particular del motor trifásico, el devanado del estátor está constituido por tres arrollamientos desfasados 120° en el espacio y de P polos, al introducir por ellos corrientes de una red trifásicas de frecuencia f_1 , se produce una onda rotativa de f.m.m.³ distribuida sinusoidalmente por la periferia del entrehierro, que produce un campo magnético giratorio cuya velocidad mecánica en r.p.m.⁴ (ω_1) viene expresada, según:

$$\omega_1 = \frac{120f_1}{P}, \quad (1.1)$$

esta velocidad recibe el nombre de velocidad de sincronismo. Para un caso general, la velocidad del campo magnético giratorio (ω), varía

³f.m.m. fuerza margnetomotriz (ley de Ampère).

⁴r.p.m. revoluciones por minuto.

directamente con la frecuencia (f), pero inversamente con el número de pares de polos (P),

$$\omega = \frac{120f}{P}. \quad (1.2)$$

Debe tenerse en cuenta que cuanto más se aproxime la velocidad del rotor a la velocidad ω_1 del campo magnético giratorio, tanto menor resultarán las f.e.m. inducidas en los conductores del rotor (disminuye la velocidad relativa entre el campo magnético giratorio y el rotor) y en consecuencia, también se reducen las corrientes en el mismo, lo que causa una disminución del par interno o par electromagnético del motor. Si como caso límite, el rotor girase a la velocidad de sincronismo ω_1 , no habría entonces movimiento relativo del campo giratorio respecto del rotor, desapareciendo con él la f.e.m. inducida⁵ y como consecuencia de ello se anularían tanto la corriente como el par correspondiente. De este modo la velocidad de sincronismo ω_1 constituye el límite teórico al que se puede girar el rotor. El motor debe girar por consiguiente a una velocidad inferior a la de sincronismo ($\omega \leq \omega_1$), es decir su velocidad de régimen es asíncrona y esta velocidad será tanto menor cuanto mayor sea el par resistente de la carga que mueve el motor. De esta manera puede definirse el deslizamiento como el cociente:

$$s = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} = 1 - \frac{\omega}{\omega_1}. \quad (1.3)$$

Si la máquina se encuentra detenida, la velocidad de giro del rotor es cero, por lo tanto el deslizamiento es uno ($s = 1$). Cuando el rotor de la máquina gira a la velocidad del campo, el deslizamiento es cero ($s = 0$). En general, a la velocidad del campo se le denomina velocidad síncrona de la máquina y el deslizamiento mide cuan cerca se encuentra la máquina de esta velocidad. La máquina funcionaría como generador, si el rotor de la máquina gira a una velocidad mayor que la sincrónica, por lo que el deslizamiento se hace negativo [18].

⁵De acuerdo a la ley de Faraday, la f.e.m. inducida en un conductor de longitud L que se mueve a la velocidad v dentro de un campo B , tiene el valor: $e = \int (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \, d\mathbf{l}$.

1.2.3. Curvas par-velocidad de las máquinas de inducción

En la Figura 1.4 se muestra la curva par-velocidad equivalente a régimen de trabajo motor correspondiente a la zona de deslizamientos comprendida entre 0 y 1. Obsérvese la doble escala utilizada en el eje de abscisas calibrada en deslizamientos (s) o en velocidades del rotor (ω). Los puntos más característicos son [18]:

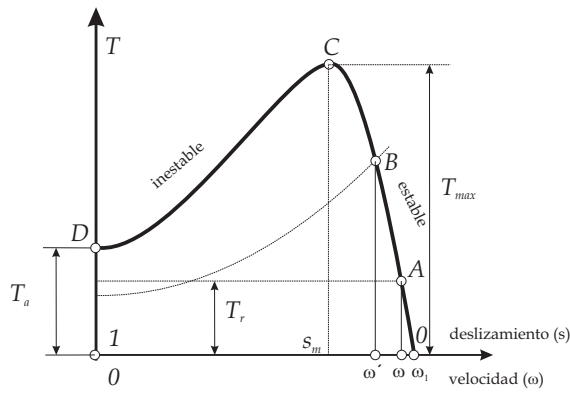


Figura 1.4: Curvas par-velocidad de las máquinas de inducción.

- **Punto 0. Funcionamiento en sincronismo:** $s = 0$; $T = 0$, en este caso la velocidad de rotación del motor es la de sincronismo
- **Punto A. Régimen asignado o nominal:** $s = s_n$; $T = T_n$, que corresponde a la velocidad asignada y al par nominal o asignado o de plena carga, se produce generalmente para deslizamientos comprendidos entre el 3 % y el 8 %, que representan velocidades cercanas a la de sincronismo que se sitúan en la parte derecha de la curva 1.4
- **Punto C. Funcionamiento con par máximo:** $s = s_m$; $T = T_m$, representa el par máximo o crítico del motor y se produce para deslizamientos comprendidos entre 15 % y el 30 %

- **Punto D. Régimen de arranque:** $s = 1$; $T = T_a$, en este caso la velocidad es cero y corresponde al par de arranque

Se observa en la Figura 1.4 que el par máximo divide a la curva en dos partes, una estable ($0 < s < s_m$) y la otra inestable ($s_m < s < 1$).

1.3. Tipos de convertidores de frecuencia

Los convertidores de frecuencia son dispositivos que se alimentan de la red de suministro eléctrico y generan corriente alterna de cualquier frecuencia, generalmente utilizado para accionar motores de inducción a velocidad variable. Hoy en día la mayoría son electrónicos, aunque también se encuentran convertidores electromecánicos. Estos últimos tienen un costo más elevado, son más grandes y requieren mayor cuidado, pero a cambio de un suministro de CA con menor distorsión armónica. Suelen utilizarse para alimentar motores especiales.

A los convertidores electrónicos los podemos clasificar en directos e indirectos. En el primer caso producen una tensión alterna uniendo fragmentos de sinusoides procedentes de las distintas fases del suministro. Tienen la ventaja de que pueden utilizar los tiristores de mayor potencia, relativamente lentos trabajando en conmutación natural. Pero solo consiguen frecuencias muy inferiores a la de la red, además, se trata de dispositivos bastante complejos. Por lo tanto, sólo se utilizan con potencias muy elevadas y motores lentos. Los convertidores habituales son los indirectos.

Los convertidores indirectos se dividen en:

- Convertidores de fuente de voltaje⁶ (VSI)
- Convertidores de fuente de corriente⁷ (CSI)

Se ha demostrado que el diseño VSI es más eficiente, tienen mayor fiabilidad y respuesta dinámica.

⁶“VSI”, en referencia a la nomenclatura anglosajona, “*Voltage Source Inverter*”.

⁷“CSI”, en referencia a la nomenclatura anglosajona, “*Current Source Inverter*”.

A su vez, los convertidores de voltaje se dividen según la modulación utilizada en el inversor:

- Modulación por ancho de pulso⁸ (PWM)
- Modulación por amplitud de pulso⁹ (PAM)

La energía eléctrica procedente de la red en forma de corriente alterna monofásica o trifásica, normalmente de 50 o 60 Hz, llega a un rectificador que suministra corriente continua a una etapa intermedia, posteriormente va a un inversor que genera corriente alterna trifásica de salida que sirve para alimentar el motor. Las características de salida del inversor pueden ser controladas de manera a que parezcan una fuente de corriente o voltaje ajustable en magnitud y frecuencia para el motor. Para controlar todos estos elementos se necesitan de circuitos electrónicos, además de la programación de algoritmos de control que permitan introducir los parámetros de funcionamiento así como los deseados, por ejemplo velocidad, corriente o par mecánico.

1.4. Conclusiones de capítulo

En este capítulo se ha abordado la historia de las máquinas eléctricas, realizando luego a una clasificación de la misma. Se ha realizado especial énfasis sobre la máquina de inducción por constituir esta un punto principal en el desarrollo de este trabajo, justificado principalmente en las ventajas relativas al menor costo de fabricación y mantenimiento, lo que constituye una de las opciones más interesantes principalmente en aplicaciones industriales de elevada potencia. Se ha presentado la definición de sincronismo, que sirvió como referencia para explicar distintos puntos de funcionamiento de la máquina de inducción teniendo en cuenta la curva de par-velocidad. Por último se realizó una clasificación de los tipos de convertidores de frecuencia.

⁸“PWM”, en referencia a la nomenclatura anglosajona, “*Pulse Width Modulation*”.

⁹“PAM”, en referencia a la nomenclatura anglosajona, “*Pulse Amplitude Modulation*.”

