

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

Los motores de corriente continua (CC) han sido tradicionalmente usados en los accionamientos eléctricos. Las ventajas del motor de CC son: la capacidad de desarrollar elevadas cuplas sobre un amplio rango de velocidades, y su simple control. En cambio el motor de corriente alterna (CA) no ha sido tan empleado en aplicaciones de velocidad variable debido a la complejidad de la electrónica de potencia requerida así como de las estrategias de control necesarias para obtener prestaciones comparables con el equivalente de CC.

Los avances recientes en los dispositivos de conmutación de potencia cada vez más rápidos, así como en los dispositivos de microcómputo que permiten implementar complicados algoritmos de control en tiempo real; han determinado el desarrollo de los accionamientos electrónicos de velocidad variable para motores de alterna [1][2][3][4] [5]. En el último cuarto de siglo el motor de inducción se constituyó en el principal protagonista de las aplicaciones con accionamientos de corriente alterna, pero este panorama tiende a cambiar en la medida que se están desarrollando motores más compatibles con la naturaleza discontinua de los convertidores de potencia. Desde este punto de vista hoy se está centrando la atención en el desarrollo integrado del motor y su controlador electrónico. Dos ejemplos notables de esta tendencia son el motor CC sin escobillas ("brushless DC motor") [1][6][7] y el motor de reluctancia conmutada (switched-reluctance motor (SRM)) [6][7][8][9].

En los últimos años el SRM se ha presentado como una interesante alternativa en aplicaciones de velocidad variable, frente a los motores de inducción o sincrónicos con imán permanente, y está recibiendo una atención creciente. Su principal atractivo radica en su bajo costo y su estructura simple y robusta, con bobinados concentrados en el estator y sin ningún conductor en el rotor. Además, este motor requiere una alimentación con corriente unipolar que permite el uso de convertidores de potencia más simples y confiables que los inversores habituales en otros accionamientos de CA. Como contrapartida de sus ventajas, su análisis es bastante complicado debido a que constituye

un sistema muy alineal. Por lo tanto, resulta de gran interés determinar las características de control del SRM que permitan optimizar el desarrollo de sus accionamientos.

El objetivo de esta Tesis es analizar las características de control del SRM, y desarrollar un sistema de control para el mismo. Para cumplir con el objetivo, en primer término se desarrolla un modelo del comportamiento electromagnético del SRM que facilita un análisis matemático relativamente simple, y al mismo tiempo permite predecir con buena aproximación la prestación del motor[65]. El modelo propuesto es empleado en la determinación de las características de control del SRM. En este análisis se pone especial atención a la influencia de la saturación del circuito magnético sobre la controlabilidad del motor. Se analizan las diferencias de comportamiento cuando el motor es alimentado con una fuente de corriente o de tensión, y se proponen distintos esquemas para el control de velocidad de un SRM [83][86]. Finalmente, con la experiencia adquirida en el análisis, se proponen dos sistemas de control de velocidad para el SRM: uno basado en técnicas de control de sistemas lineales [124], y otro que emplea estrategias de control por modos deslizantes [125][126].

1.2 RESEÑA HISTÓRICA

El motor de reluctancia variable, en el cual la capacidad de producción de cupla y potencia dependen exclusivamente de la fuerza de atracción magnética del hierro, es el motor eléctrico más simple que se haya construido, y también el más antiguo [10] [11]. Si bien su invención se atribuye a Davidson en 1837, sus orígenes se remontan al inicio de la década de 1820 cuando Ampere demostró que un solenoide es un imán controlado eléctricamente. Un solenoide alimentado produce fuerzas sobre elementos de hierro cercanos, proporcionales a la corriente de excitación. En estos sistemas electromecánicos, las fuerzas se establecen de modo tal que los elementos del mismo se reorganizan hasta minimizar la energía almacenada en el campo magnético. Es decir, hasta lograr que el flujo magnético encuentre la trayectoria de mínima reluctancia.

El motor construido por Davidson se movía por la acción de electroimanes distribuidos a lo largo de una circunferencia, los cuales eran excitados en forma secuencial para obtener una cupla relativamente uniforme. Este motor constituyó el primer intento para reemplazar la máquina de vapor, pero presentaba problemas estructurales originados en las elevadas fuerzas pulsantes que lo movían. El invento del motor de CC, en 1860, desplazó al motor de reluctancia como fuente de potencia mecánica, y mucho tiempo debió transcurrir antes de que fuera redescubierto como un eficiente convertidor

electromecánico de energía.

Se pueden distinguir dos tipos de motor de reluctancia variable:

- 1) Sincrónico o de simple reluctancia [12][13]: que presenta un estator cilíndrico con bobinados distribuidos alimentados con generadores sinusoidales, y tiene polos salientes en el rotor. En este motor el rotor se mueve en sincronismo con el campo rotante generado por los bobinados estáticos, buscando la posición de mínima reluctancia.
- 2) De doble reluctancia [8]: que presenta polos salientes tanto en el rotor como en el estator, con bobinados concentrados sobre los polos estáticos. La cupla producida por este tipo de motor es esencialmente discontinua y una alimentación secuencial de las fases del estator da lugar a un movimiento por pasos entre posiciones adyacentes de mínima reluctancia.

Ambos tipos de motor siguieron caminos independientes en su evolución. Mientras el desarrollo del motor de simple reluctancia estuvo ligado a los motores sincrónicos trifásicos, el de doble reluctancia adquirió notoriedad a través de los motores "paso a paso".

En los años sesenta el motor paso a paso fue descubierto como un servoactuador capaz de funcionar a lazo abierto, y adquirió gran popularidad como posicionador entre los periféricos de las computadoras. Su simplicidad constructiva y su creciente popularidad dieron lugar a una amplia investigación que se desarrolló en torno a ellos buscando mejorar su prestación [14][15][16]. Como consecuencia de esta investigación, se determinó que se podían obtener grandes mejoras en la eficiencia de estos motores explotando la saturación magnética [17][18][19][20].

Dos hechos fundamentales:

- 1) la disponibilidad de llaves semiconductores de potencia, y
- 2) la comprensión de la mejora en la eficiencia de conversión de energía que podía obtenerse explotando la saturación magnética

han permitido pensar en el motor de doble reluctancia como un transductor electromecánico eficiente. En la segunda mitad de los setenta, un programa de investigación, desarrollado en las Universidades de Leeds y Nottingham en Inglaterra, marcó el comienzo del desarrollo de los accionamientos de motores de reluctancia

conmutada (SRM) [21][22][23].

A partir de 1980 se han multiplicado las investigaciones alrededor del SRM y su aplicación en diferentes campos como ser: tracción de vehículos [24][25][26][27], accionamientos industriales en general [28][30][31][32][33], aplicaciones aeroespaciales [34] o en ambientes peligrosos [29][35], electrodomésticos [36][37][38], servoaccionamientos [39][40][41] y en robótica [42][43].

1.3 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

La tesis está organizada de la siguiente manera. En el Capítulo 2 se reben las características fundamentales del SRM como ser: la variación de la reluctancia, el mecanismo de producción de cupla, la alimentación del motor, las características de cupla en función de la velocidad, y los principales detalles de la geometría del motor.

En el Capítulo 3 se describen diferentes alternativas empleadas en la modelización de la operación electromagnética del motor. La primera contribución original de esta Tesis es el desarrollo de un modelo lineal por tramos que describe con buena aproximación las características magnéticas del motor tanto en la zona lineal como en aquella con saturación magnética [65]. El modelo desarrollado es empleado en el análisis de la prestación del motor y su variación con el grado de saturación.

En el Capítulo 4 se introduce otra contribución original que constituye un análisis exhaustivo de las características de control, que clarifica los criterios de diseño del control de accionamientos con SRM. Para obtener una mayor claridad primero se analiza el comportamiento del motor limitando su funcionamiento a la zona lineal del circuito magnético [83] y luego se analiza la operación del motor trabajando con saturación magnética [86]. En ambos casos se identifican las variables de control y su rango de variación; se calcula la relación entre el par medio desarrollado y las variables de control, y se determina la máxima cupla obtenible. Finalmente se presentan algunos esquemas básicos para el control de velocidad.

En el Capítulo 5 se describen las distintas topologías de convertidores de potencia empleados en la alimentación del SRM, y se realiza un análisis comparativo de los mismos [93].

En el Capítulo 6 se sintetizan los aportes originales de la Tesis, en el desarrollo de sistemas de control para el SRM. Con este objetivo se aplican las características determinadas en el Capítulo 4, y se emplean dos de los circuitos descritos en el Capítulo 5. Se realizan dos propuestas. En la primera se implementa un regulador de velocidad,

típico de otros accionamientos, empleando técnicas de control de sistemas lineales [124]. En la segunda se propone el empleo de técnicas de control por modos deslizantes para disminuir la pulsación de cupla característica de los SRMs [125][126]. Ambos sistemas propuestos son evaluados por simulación.

Finalmente en el Capítulo 7 se presentan las conclusiones de la Tesis y se realizan algunas sugerencias para futuros trabajos de investigación en el tema.