



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
INSTITUTO DE INVESTIGACION TECNOLÓGICA



CONTROL DE ACCIONAMIENTOS ELÉCTRICOS.

García Cerrada, Aurelio

IIT-94-010A



CONTROL DE ACCIONAMIENTOS ELECTRICOS

Aurelio García Cerrada

Artículo IIT-94-010

Septiembre 1994

CONTROL DE ACCIONAMIENTOS ELECTRICOS

Aurelio García Cerrada

E.T.S.I.I. (I.C.A.I.) e Instituto de Investigación Tecnológica
Universidad Pontificia Comillas. c/ Alberto Aguilera 23, 28015 Madrid

RESUMEN

Se estima que, aproximadamente, el 60 % de la energía eléctrica generada en un país industrializado se convierte en energía mecánica a través de accionamientos eléctricos, es decir, motores eléctricos controlados o sin controlar que mueven cargas. Actualmente, los accionamientos eléctricos se emplean en un variado espectro de condiciones: las aplicaciones van desde aquellas en las que se requiere un control rudimentario del movimiento de la carga (puertas de garaje, bombas de riego, etc.) hasta aquellas en las que se requieren altas prestaciones, tanto en régimen estático como dinámico (máquinas herramientas, trenes eléctricos de alta velocidad, robots, rodillos para papeleras, etc.).

1. TOPOLOGIA DE UN ACCIONAMIENTO ELECTRICO

El esquema general de un accionamiento eléctrico se ha dibujado en la Fig. 1. Generalmente, no es suficiente conectar la máquina eléctrica a la red para que realice su trabajo de forma adecuada y es necesario un convertidor intermedio de energía. En la actualidad, ese convertidor es, casi siempre, un dispositivo de estado sólido. A pesar de que las máquinas eléctricas constituyen una tecnología bien establecida ya a mediados de siglo, la proliferación de los accionamientos eléctricos de velocidad variable solamente ha sido posible recientemente, gracias a los avances de la electrónica de potencia (componentes y topologías) y de la microelectrónica, que han permitido desarrollar los convertidores de energía incluso para las aplicaciones más exigentes.

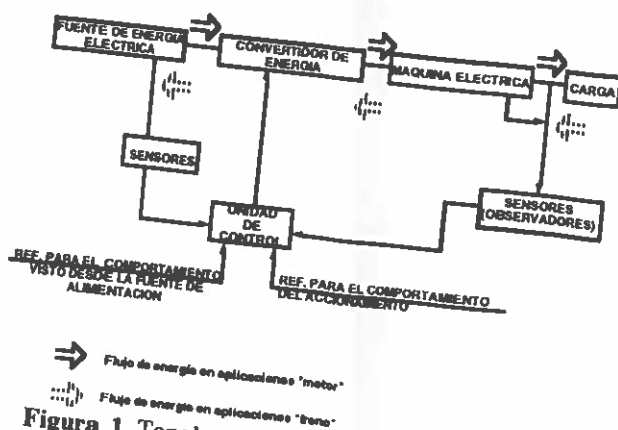


Figura 1. Topología de un accionamiento eléctrico

El control del accionamiento debe conseguir la forma de operación especificada para la carga, proteger todo el equipo, garantizar la compatibilidad electromagnética, cuidar el factor de potencia del convertidor estático, etc.

El número de variables que hay que realimentar para el control en bucle cerrado de un accionamiento eléctrico no es excesivamente grande. En el caso más exigente habrá que realimentar la velocidad y/o la posición del rotor, corrientes y tensiones de alimentación del motor, corrientes y tensiones del circuito intermedio en el convertidor y corriente de red. Esta realimentación puede hacerse por medida directa y/o usando estimadores en algunos casos. La estimación de ciertas magnitudes puede eliminar los sensores más problemáticos o, en combinación con ellos, puede servir para el diagnóstico del conjunto.

2. MAQUINAS ELECTRICAS PARA ACCIONAMIENTOS

Sin lugar a dudas, el motor eléctrico más empleado en la industria es el motor asíncrono de jaula de ardilla debido, principalmente, a su robustez y sus buenas características par-velocidad. El motor asíncrono de jaula de ardilla es compacto, de construcción sencilla, carece de colector o anillos rozantes y permite grandes variaciones de par de carga con pequeñas variaciones de velocidad. Sin embargo, el motor asíncrono ha estado, tradicionalmente, relegado a aquellas aplicaciones que requerían un control rudimentario o no requerían ningún control. Los accionamientos eléctricos regulados han estado dominados por los motores de corriente continua (c.c.) que eran de diseño más complejo que los motores asíncronos, eran menos robustos pero se podían controlar más fácilmente.

El par motor en un motor de c.c. depende de dos variables: el flujo (Ψ) y la corriente de inducido (I), que pueden controlarse de forma independiente (si se desprecia la llamada "reacción de inducido"). El flujo puede controlarse con la corriente de excitación mientras que la corriente de inducido puede controlarse con la tensión de inducido. Para optimizar el funcionamiento del motor, es conveniente trabajar a flujo constante e

igual al asignado. De esta forma se dispone de la máxima capacidad de par sin exceder las limitaciones de tensión y corriente de inducido. Además, las inductancias del circuito equivalente son también constantes y el par motor puede controlarse rápidamente con la corriente de inducido. La constante de tiempo del inducido es mucho menor que la constante de tiempo de la excitación (la décima parte es un valor típico). Sin embargo, solo es posible mantener el flujo constante hasta la velocidad asignada. A partir de ese momento es necesario debilitar el flujo para poder seguir incrementando la velocidad.

En el motor asíncrono de jaula de ardilla, no existe excitación independiente y no es evidente cómo la única variable de entrada disponible (tensión o corriente del estator) afecta al par motor y al flujo. En sus primeros tiempos, el control de los motores asíncronos solo se basaba en el circuito equivalente en régimen permanente con alimentación senoidal y por tanto, la respuesta dinámica del accionamiento estaba muy limitada. Formas más avanzadas de modelado eran conocidas pero su aplicación fue imposible hasta la aparición y desarrollo de los modernos microprocesadores.

Los motores de c.c. ya podían controlarse de forma aceptable con los antiguos rectificadores de mercurio. La aparición de los tiristores hizo posible el diseño de los primeros inversores para motores asíncronos, pero influyó más decisivamente en el control de motores de c.c. La aparición de los transistores de potencia y, mucho más tarde de los GTO's, permitió el desarrollo de inversores con PWM que eran suficientemente flexibles para el control de motores asíncronos. Recientemente la aparición y comercialización de IGBT's está abriendo nuevas posibilidades en el control de motores asíncronos de media y alta potencia.

Durante algún tiempo, los motores síncronos aparecieron en los accionamientos eléctricos regulados de altas potencias (por ejemplo el tren de alta velocidad TGV desarrollado por ALSTHOM en Francia). Aunque la electrónica de potencia era mucho más complicada que en el caso de un motor de c.c., no tenían colector (aunque sí anillos rozantes) y permitían control independiente de la excitación (flujo) y el par. El desarrollo de la microelectrónica y los inversores PWM fuente de tensión ha consolidado el uso de motores asíncronos en todo el margen de potencia (por ejemplo el tren de alta velocidad TMST que circulará por el túnel del Canal de la Mancha desarrollado por GEC-ALSTHOM).

Para aplicaciones de baja-media potencia, también se emplean con éxito motores síncronos de imanes permanentes (PMSM)¹ o motores de corriente continua sin escobillas (dc-brushless), que derivan de los motores síncronos sustituyendo la excitación por un rotor de imanes permanentes. Estos eliminan gran parte de las pérdidas en el rotor, eliminan definitivamente las escobillas, los colectores y los anillos rozantes y tienen una excelente relación potencia-peso.

También hay que mencionar brevemente, los motores de reluctancia variable y los motores paso a paso que, controlados electrónicamente, se están

aplicando satisfactoriamente en accionamientos, sobre todo de baja potencia. Estos motores tienen excelentes relaciones par-peso y par-inercia y aunque tienen un par pulsante, convertidores electrónicos de alta frecuencia de conmutación hacen que sus efectos sobre la carga sean mínimos.

3. CONTROL DE ACCIONAMIENTOS ELECTRICOS^{1,2,3}

Idealmente, el control de un accionamiento eléctrico puede representarse esquemáticamente como en la Fig. 2. Desde el punto de vista de la carga, las variables a controlar son la velocidad y/o la posición. Para conseguir el comportamiento deseado, el motor eléctrico debe proporcionar el par adecuado, y para ello ha de controlarse sus corrientes y tensiones accesibles y, a través de ellas, sus variables internas (flujo, por ejemplo).

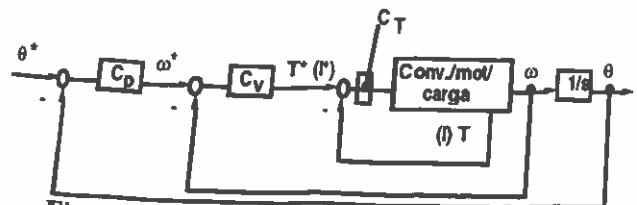


Figura 3 Control de un accionamiento eléctrico.

El problema de control planteado en la Figura 2 tiene muchos elementos no-lineales, por ejemplo, el par es generalmente producto de dos variables de estado (flujo y corriente). Afortunadamente, la dinámica de las variables electromagnéticas del motor (flujos, corrientes y tensiones) es mucho más rápida que la dinámica de las variables mecánicas (posición y velocidad) y puede aprovecharse la estructura jerárquica que aparece en la Fig. 2. Cuando se resuelve el problema del control de posición y velocidad (C_p y C_v , en la Fig. 2) se acepta que el par motor puede conseguirse instantáneamente o con un retraso pequeño que puede modelarse con una sola constante de tiempo. Por otro lado cuando se diseña el control de par (C_T), suele aceptarse que la velocidad del rotor es prácticamente constante y aparece en las ecuaciones diferenciales como un parámetro que puede medirse. Además, como se comentó en el caso de las máquinas de c.c. en la Sección 2, el flujo suele mantenerse constante y el par es función de una sola variable aunque el bucle de control de par puede necesitar ganancia variable si se cambia el flujo por encima de la velocidad asignada. Si la relación entre constantes de tiempo no es ideal como se ha mencionado, el problema de control planteado en la Figura 2, no puede resolverse de forma simplificada y es todavía objeto de muchos trabajos de investigación. Finalmente, cabe mencionar que los convertidores estáticos usados pueden idealizarse cuando se diseña el control del accionamiento. Sustituirlos por un sistema lineal de primer orden en la etapa de diseño, suele ser suficiente.

4. CONTROL ESCALAR DE MOTORES ASINCRONOS. RELACION V/f

El circuito equivalente en régimen permanente de un motor asíncrono, con alimentación senoidal se ha representado en la Fig. 3.

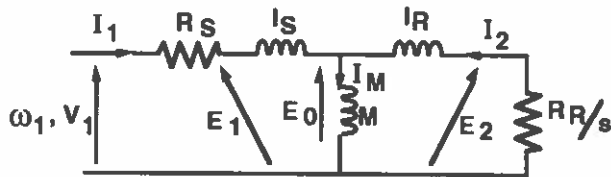


Figura 3. Circuito equivalente en régimen permanente de un motor asíncrono con alimentación senoidal

Puede demostrarse que en el circuito de la Fig. 3 se cumplen las siguientes relaciones:

$$(1) \frac{E_0}{\omega_1} = \text{constante} \Rightarrow \text{Flujo en el entre-hierro constante}$$

$Te \approx k \omega_{slip}$ (Par aprox. proporcional a la frecuencia de deslizamiento)
(ω_{slip} = frecuencia de alimentación - velocidad del rotor)

$$(2) \frac{E_1}{\omega_1} = \text{constante} \Rightarrow \text{Flujo del estator constante y}$$

$$Te \approx k \omega_{slip}$$

$$(3) \frac{E_2}{\omega_1} = \text{constante} \Rightarrow \text{Flujo del estator constante y}$$

$$Te = k \omega_{slip}$$

Estas expresiones explican como puede desacoplarse el control de flujo y de par en régimen permanente: E_1/ω_1 controla el nivel de flujo y ω_{slip} controla el par. Dado que las inductancias de dispersión del rotor y del estator (l_R y l_S respectivamente) son, generalmente, muy pequeñas comparadas con la inductancia magnetizante M , los flujos de entre-hierro, rotor y estator son muy parecidos en régimen permanente. Así las estrategias anteriores (1)-(3) producen resultados similares. Además, la resistencia del estator R_S puede despreciarse frente a las inductancias del motor cuando la frecuencia de alimentación no es muy baja (suele ser suficiente con que sea superior a 5 Hz), y por tanto la estrategia V_1/ω_1 es, aproximadamente, equivalente a (1)-(3). Esta es la estrategia más común en los accionamientos eléctricos comercializados actualmente. La relación V_1/ω_1 se compensa a frecuencias muy bajas para tener en cuenta la caída de tensión en la resistencia del estator.

5. CONTROL VECTORIAL DE MOTORES ASINCRONOS

El modelo de un motor asíncrono válido para el régimen permanente y el régimen transitorio y usando

las variables naturales del motor (tensiones, corrientes o enlaces de flujo en las fases del estator y del rotor) es demasiado complicado. Puede hacerse un cambio de variable a través de una matriz no singular, que en general es variable con el tiempo y es distinta en cada instante, de forma que el motor asíncrono trifásico queda reducido a un motor equivalente con dos fases en el estator, y dos fases en el rotor (d y q de rotor y de estator*). Esos devanados ficticios son perpendiculares entre sí y se mueven con velocidad arbitraria. El comportamiento del motor puede describirse usando las corrientes, tensiones y enlaces de flujo de los devanados d y q y se dice entonces que se usa un sistema de referencia (d-q). Todas las variables eléctricas del motor pueden representarse por un vector de dos componentes.

Elijiendo un sistema de referencia (d-q) que gira solidario con el vector flujo del rotor y haciendo que el eje d coincida con ese vector, se tiene que†:

$$Te = k \Psi_{Rd} i_{Sq} \quad (\text{Ecuación del par motor})$$

$$\frac{d\Psi_{Rd}}{dt} = \frac{M R_R}{L_R} i_{Sd} - \frac{R_R}{L_R} \Psi_{Rd} \quad \text{con } L_R = l_R + M$$

Este sistema de referencia se conoce como "coordenadas de campo (del rotor)". Exactamente igual que en una máquina de corriente continua, el par y el flujo pueden controlarse independientemente. El flujo se controla con la corriente de estator de eje d (corriente de excitación) y el par motor se controla de forma instantánea con la corriente de estator de eje q (corriente de par). Además, en este sistema de referencia las variables electromagnéticas del motor son magnitudes continuas. Por tanto, el control en coordenadas de campo, de un motor asíncrono es similar al control de un motor de c.c. y permitiría buenas prestaciones en régimen dinámico. La idea del control en coordenadas de campo fue propuesta inicialmente por Blaschke (1972)⁴, y fue desarrollada y aplicada sistemáticamente por Leonhard (1985, 1990)².

Para realizar control en bucle cerrado en coordenadas de campo es necesario conocer la posición del vector flujo del rotor. La medida de esta magnitud está prácticamente descartada en la literatura, y se han propuesto varias soluciones para su estimación. Son muchas las referencias que abordan este tema y cabe destacar Verghese y Sanders (1985)⁵, donde se propone el uso de observadores por primera vez. García-Cerrada et

* Aparecen devanados adicionales (un total de "n" igual al número de fases) desacoplados de los ejes d y q y cuyas variables no intervienen en el par motor. Por eso la matriz de paso puede ser no-singular.

† Los subíndices R y S se refieren a rotor y a estator, respectivamente. Los subíndices d y q marcan las variables correspondientes a los devanados equivalentes d y q, respectivamente.

al (1994)⁶ analizan la robustez de un observador frente a variaciones de los parámetros del motor y presentan algunas soluciones para identificar estas variaciones y corregirlas. La estimación del flujo del rotor puede evitarse en el llamado "control indirecto en coordenadas de campo". En él se calcula la posición del vector flujo del rotor, a partir de los valores de referencia para la componente d del flujo (magnitud) y la corriente de par, la posición del rotor (medida con precisión) y los parámetros del motor. Como el control de flujo y par se realiza en bucle abierto, es muy sensible a variaciones en los parámetros del motor y es necesario prever la estimación recursiva de los parámetros más significativos.

Boldea y Nasar (1992)¹ demuestran que el control desacoplado de par y de flujo también puede realizarse si se usa un sistema de referencia solidario al flujo del estator o al flujo del entre-hierro.

Yamamura (1986)⁷ propone el uso de un circuito equivalente válido también en régimen transitorio para el control desacoplado de par y flujo. El término "control vectorial", sin embargo, se aplica solamente a aquellas formas de control que se basen en un cambio de sistema de referencia que además es la forma de control desacoplado (par y flujo) más popular en la literatura y en las aplicaciones conocidas.

6. CONCLUSIONES

No cabe duda de la importancia y la expansión de los accionamientos eléctricos en un país industrializado. Esa gran expansión se basa fundamentalmente en las buenas características de las máquinas eléctricas rotativas como motores y el gran desarrollo que han tenido la electrónica de potencia y la microelectrónica en las últimas dos décadas.

Los dispositivos de electrónica de potencia y la microelectrónica que se usan para controlar a los motores eléctricos forman parte integral del accionamiento eléctrico. Todavía existen muchas preguntas que responder en la interacción electrónica de potencia-máquina y puede que sea necesario introducir algunas modificaciones en la forma tradicional de diseñar las máquinas eléctricas para facilitar su integración con la electrónica de potencia.

Aunque los más modernos microprocesadores actuales son suficientemente potentes como para aplicar las formas más complicadas de control vectorial, es necesario proponer soluciones más sencillas y baratas, conociendo perfectamente sus limitaciones. En la carrera hacia sistemas más baratos, jugarán un papel importante la "programación" en hardware de las funciones y cálculos repetitivos más complicados, por ejemplo la modulación de ancho de pulso (PWM), o las transformaciones de sistema de referencia.

Como el control de accionamientos eléctricos es un área altamente interdisciplinaria hay que cultivar la relación entre especialistas en las distintas disciplinas

participantes. La ingeniería de control moderna, la identificación de sistemas y la ingeniería del conocimiento manejan habitualmente desarrollos y algoritmos que serían de aplicación y que son desconocidos por los expertos en máquinas eléctricas o electrónica de potencia.

El control de accionamientos eléctricos es demostrable en el laboratorio. Esta demostración no es trivial por mucho que se empeñen algunos investigadores presentando experimentos muy poco contrastados, poco significativos e insuficientemente monitorizados. El dispositivo experimental debe cuidarse de forma exquisita y debe reconocerse el enorme trabajo técnico y científico que eso representa.

Parece que a nivel de investigación la disputa entre máquinas de c.c. y las máquinas asíncronas está resuelta a favor de éstas últimas. Sin embargo, en muchos sectores industriales, los accionamientos eléctricos regulados con máquinas de c.c. todavía predominan, bien sea por el carácter conservador de esos sectores o porque todavía no ha llegado el momento de la sustitución de sus equipos. El desarrollo de los imanes permanentes y de la electrónica de potencia, han permitido que los motores síncronos de imanes permanentes y los motores paso a paso compitan con algunas ventajas con el motor asíncrono de jaula de ardilla en algunas aplicaciones.

REFERENCIAS

- [1] I. Boldea y S.A. Nasar (1992). Vector Control of AC Drives. CRC Press
- [2] W. Leonhard (1990). Control of Electrical Drives. Springer-Verlag 2nd Edition. 1st Edition (in English) 1985. 1st Edition (in German) 1974.
- [3] J.M.D. Murphy y F.C. Turnbull (1988). Power Electronics Control of AC Motors. Pergamon Press.
- [4] F. Blaschke (1972). "The principle of field orientation as applied to the new transvector closed-loop control system for rotating machines". Siemens Rev. vol. 39, no. 4 pp 217-20
- [5] G. Verghese y S. Sanders (1985). "Observers for fast flux estimation in induction machines". IEEE PESC, Toulouse, pp 571-60.
- [6] A. García-Cerrada, J.L. Zamora, A. Zazo, M. Suárez y T. Suárez (1994). "Recursive estimation of model parameters and state variables for induction motors". International Conference on Electrical Machines, ICEM '94. París 5-8 Sep.
- [7] S. Yamamura (1986). A.C. Motors for High-Performance Applications. Marcel-Dekker.