

Modelado y simulación de motores de inducción y su control

A. Moreno, A. Castro, F.J. García
Dpto. de Electrotecnia y Electrónica
Escuela Universitaria Politécnica
Universidad de Córdoba (España)
Tel.: 23-83-73 Fax: 23-83-16
e-mail: el1momua@uco.es

RESUMEN.- En el presente artículo se sintetizará un amplio trabajo acerca del modelado y simulación de accionamientos de C/A con motores de inducción, mediante un programa de simulación de propósito general como Simulink. El análisis de estos accionamientos es complicado debido al acoplamiento entre las magnitudes eléctricas que en él aparecen. De ahí el interés de desarrollar modelos de simulación que nos permitan el estudio tanto de las magnitudes que aparecen en el motor, como del propio motor. Así podremos ver como afectan a la respuesta del motor cambios en sus parámetros constructivos, ajustes en los lazos de control, etc. Para ello nos basaremos en el modelo de motor de eje único o complejo y aplicaremos al mismo diversas técnicas de control, tanto escalares como vectoriales.

1.- INTRODUCCIÓN

Las máquinas de corriente alterna, en especial las máquinas de inducción, son de construcción mecánica muy simple, pero a la vez ofrecen gran robustez y, al no tener escobillas ni partes en fricción, presentan un mantenimiento casi nulo. Sin embargo, en aquellos accionamientos en los que se requería controlar la velocidad, siempre se utilizaba la corriente continua, a pesar de que la construcción de motores de corriente continua era mucho más costosa y complicada, y había que cambiar frecuentemente escobillas y otros componentes. La evolución de la tecnología en el campo de los dispositivos semiconductores, ha permitido el desarrollo de la electrónica de potencia, y la disponibilidad de más y mejores módulos y componentes, no sólo en lo que se refiere a cantidad, sino también a nivel económico. En la actualidad es difícil encontrar un proceso industrial en el que no tenga aplicación un accionamiento de corriente alterna, de ahí la importancia de su estudio y desarrollo. Si quisiéramos desarrollar un modelo matemático para el estudio del motor de inducción, éste vendría dado por un conjunto de ecuaciones diferenciales con variables dependientes del tiempo. Podemos utilizar las transformaciones de ejes para eliminar los parámetros que dependan del tiempo, entre otras ventajas que se detallarán más adelante. Obtendremos de esta manera un sistema de ecuaciones, que a la hora de manejar manualmente, puede resultar tedioso y complicado. Aquí es donde cobra importancia el uso del ordenador, y de programas como Matlab y Simulink. El siguiente artículo tratará de explicar la obtención de un modelo de motor de inducción mediante dichos programas, que nos permitirá el estudio, tanto del motor, como de diversos métodos de control de la velocidad del mismo, con la ayuda de una herramienta como el ordenador personal, al alcance de prácticamente la totalidad de estudiantes hoy día.

2.- MATLAB Y SIMULINK

El término Matlab procede de los nombres "Matrix Laboratory"; inicialmente Matlab fue

creado para ofrecer un medio que permitiera un fácil acceso al software sobre matrices desarrollado hasta entonces. Al ir evolucionando, Matlab se ha convertido en un sistema interactivo, cuyo elemento de información básico lo constituye la matriz, que permite resolver complejos problemas numéricos y visualizar sus soluciones, al integrar herramientas que permiten el análisis numérico y gráfico, cálculo matricial y procesamiento de señales, en un único medio de fácil manejo donde tanto los problemas como las soluciones se pueden expresar tal y como se escriben matemáticamente sin necesidad de programar en ningún lenguaje (C, Fortran ...). Una de las principales características de Matlab es su versatilidad puesto que a partir de las funciones ya creadas en él se puede idear muchas otras aplicaciones, recogidas en ficheros con extensión "m" (ficheros .m), y que extienden aún más el ámbito de aplicación de Matlab.

Simulink es un programa extensión de Matlab cuya finalidad es simular sistemas dinámicos y que aporta una librería para el modelado de los mismos. Usando Simulink se puede modelar y simular desde la trayectoria que seguiría un proyectil hasta sistemas más complejos tales como equipos electrónicos de potencia, o accionamientos de control de velocidad de motores.

Simulink tiene dos fases en su uso: definición del modelo y análisis del modelo. Una sesión comienza bien por definir un modelo o por redefinir otro existente, para seguir con el análisis de este modelo. En la práctica estos dos pasos son a menudo realizados reiterativamente mientras el diseñador crea o modifica un modelo para obtener el comportamiento deseado. Una vez definido el modelo, se analizará bien con las opciones del menú de Simulink o mediante la escritura de instrucciones en la ventana de Matlab. Las herramientas de análisis incluyen varios algoritmos de simulación, herramientas para extraer modelos lineales de los sistemas o para encontrar su posición de equilibrio. Podemos observar una simulación en tiempo real mientras se está ejecutando y al final podremos tener disponibles los resultados en el área de trabajo de Matlab, cuando la simulación esté completa.

La relación entre Matlab y Simulink es muy estrecha. Una vez definido y corregido un modelo realizado en Simulink, se llevarán a Matlab todos los datos necesarios para estudiar la respuesta del citado modelo. Es decir, imagine que quiere comprobar el funcionamiento de un circuito RL; el primer paso sería verificar en Simulink que las señales del modelo se corresponden con el funcionamiento real del circuito, esto se puede hacer estudiando las señales utilizando el bloque "scope". Una vez comprobado el funcionamiento del modelo, se pasaría a un segundo paso en el cual el diseñador llevaría todas las señales de Simulink hacia Matlab, donde aparecerían las señales con el nombre impuesto por el diseñador, siendo además matrices de datos con un rango máximo elementos, impuestos por el diseñador. El tercer paso sería utilizar estas variables para adaptarlas a las necesidades del diseñador y, utilizando las amplias posibilidades gráficas de Matlab, representarlas y aplicar éstos resultados al estudio que el diseñador esté realizando.

En cuanto a los algoritmos de simulación que Simulink emplea para la resolución de ecuaciones, encontramos los siguientes métodos:

linsim: Utilizado para modelos lineales. Estos se componen de funciones de transferencia, funciones de estado, ceros, polos y bloque ganancia. Para sistemas lineales con algunas no linealidades también trabaja bien. Particularmente bueno cuando los bloques lineales tienen dinámicas rápidas y lentas a la vez.

rk45, rk23: El método Runge-Kutta usualmente supera a los otros métodos cuando el sistema es ligeramente no lineal y/o discontinuo. Este método es idóneo para sistemas continuos y discretos mezclados.

gear: Usaremos este método cuando el sistema es uniforme y no lineal. Está diseñado para sistemas rígidos y en otro caso es menos eficiente. No trabajará bien cuando el sistema está

siendo perturbado por cambios rápidos en la entrada.

adams: Lo utilizaremos cuando el sistema es uniforme y no lineal pero no tiene generalmente variaciones en el tiempo de las constantes.

euler: Se usará solamente para verificar resultados.

3.- DEFINICIÓN DEL MODELO PARA EL MOTOR DE INDUCCIÓN.

El primer paso si queremos desarrollar un modelo del motor de inducción es obtener unas ecuaciones que describan lo más exactamente posible el comportamiento del mismo.

El comportamiento dinámico de una máquina de inducción, como se adelantó en la introducción, es algo complejo, debido a que los coeficientes de acoplamiento entre las fases del estátor y del rotor varían según sea la posición relativa del segundo respecto al primero. Ahora bien, si alimentamos la máquina con un sistema trifásico equilibrado, como es habitual, se puede utilizar la teoría de transformaciones de ejes, con lo que se eliminan los parámetros que dependen del tiempo. Entre los distintos tipos de transformaciones de ejes nosotros hemos escogido el sistema de eje único, en el que las magnitudes referidas a un sistema de coordenadas trifásico quedan referidas a un sistema de representación en el plano complejo. A su vez este sistema de representación se supone que gira a la velocidad síncrona del campo giratorio. Así, en régimen permanente aparecen magnitudes constantes en los devanados equivalentes.

De este modo se obtiene para el motor de inducción el siguiente conjunto de ecuaciones diferenciales que definen su comportamiento eléctrico así como la velocidad angular y el par desarrollado por el mismo :

$$T_s \frac{dx_s}{dt} = -x_s + \frac{1}{S_{pS}} \frac{\omega_s}{\omega_0} y_s + \frac{1}{1+\sigma_R} x_R + \frac{1}{S_{pS}} \frac{U_s(t)}{U_{s0}} \quad (\text{ec.1})$$

$$T_s \frac{dy_s}{dt} = -\frac{1}{S_{pS}} \frac{\omega_s}{\omega_0} x_s - y_s + \frac{1}{1+\sigma_R} y_R \quad (\text{ec.2})$$

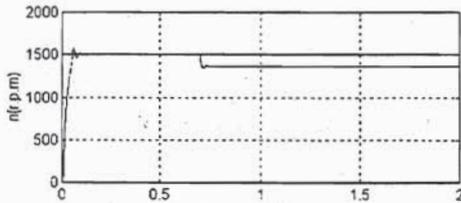
$$T_R \frac{dx_R}{dt} = \frac{1}{1+\sigma_S} x_s - x_R + \frac{1}{S_{pR}} \frac{\omega_R}{\omega_0} y_R \quad (\text{ec.3})$$

$$T_R \frac{dy_R}{dt} = \frac{1}{1+\sigma_S} y_s - \frac{1}{S_{pR}} \frac{\omega_R}{\omega_0} x_R - y_R \quad (\text{ec.4})$$

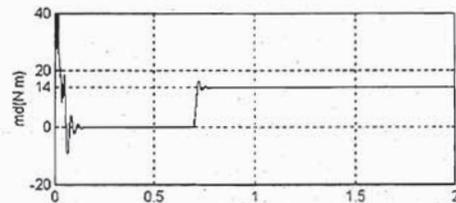
$$T_m \frac{d\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)}{dt} = 2(1+\sigma_S)(y_s x_R - x_s y_R) - \frac{m_L}{m_{p0}} \quad (\text{ec.5})$$

Estas ecuaciones se implementan en la forma de transformada de Laplace mediante los distintos bloques de Simulink. Los parámetros característicos del motor que vamos a simular, tales como la resistencia e inductancia de los devanados del motor, las constantes de tiempo, la alimentación o el par de carga que vamos a aplicar pueden fijarse al implementar las ecuaciones que definen el modelo del motor o bien pueden introducirse desde el exterior, como variables en el espacio de trabajo de Matlab. Una vez fijados estos valores característicos, se puede pasar a la simulación del modelo de motor. Como resultado de esta simulación podemos ver la tensión de entrada, la corriente absorbida, el par desarrollado por

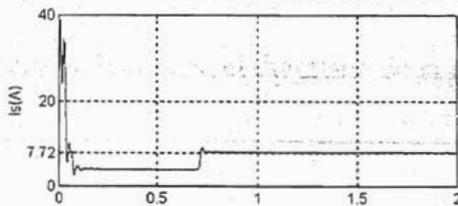
el motor, la velocidad a la que funciona el mismo, y lo que es fundamental, los transitorios que se producen en el arranque o al variar las condiciones de funcionamiento del accionamiento. El modelo trabaja en todo momento con valores normalizados de las magnitudes, es decir, referidos a sus valores nominales. Sin embargo, a la hora de mostrar las gráficas, hemos vuelto a transformar las magnitudes a sus valores reales, apareciendo, por ejemplo, los valores eficaces de la tensión, corriente, o el valor de la velocidad en r.p.m. A continuación se muestran los resultados obtenidos para algunas de las magnitudes más características del motor de inducción. El ensayo se ha realizado con un motor de jaula de ardilla de 220 V, 2.2 kw y 1500 r.p.m.



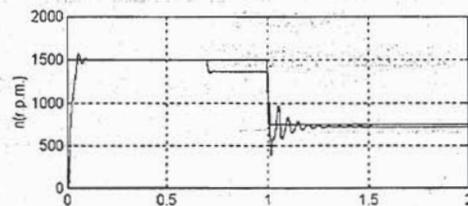
Velocidad desarrollada por el motor.



Par motor.



Corriente absorbida.



Respuesta ante una variación en la frecuencia de sincronismo.

Figura 1. Resultados para el motor de inducción.

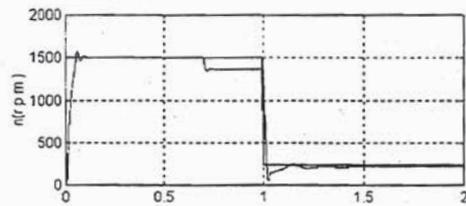
4.- CONTROL DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.

Una vez definido el modelo del motor es necesario comprobar las características principales que debe cumplir un accionamiento de velocidad variable, tales como estabilidad, precisión, velocidad de respuesta y sensibilidad de las salidas del sistema ante variaciones en sus parámetros.

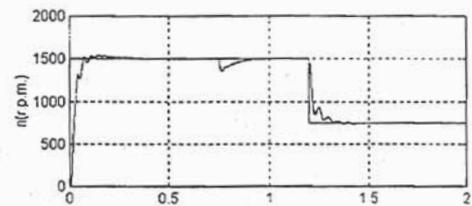
Para ello se han implementado los métodos de control más habituales en la industria, como son los métodos de control escalar y vectorial. Se ha distinguido entre control del accionamiento en lazo abierto y en lazo cerrado. En los modelos en lazo cerrado se han introducido reguladores PI, por ser estos los que se ajustan mejor al funcionamiento del motor de inducción. Así se consigue una buena estabilidad del sistema y ausencia de error en régimen permanente. Los modelos permiten la variación de las constantes de tiempo de estos reguladores, con lo que podemos ver cómo evolucionan características de la respuesta del accionamiento, tales como el sobrepaso, el tiempo de elevación o el tiempo de estabilización.

El ajuste de los reguladores se realiza a través de la función de transferencia del sistema. Una vez conocida la función de transferencia podemos representarla, mediante Matlab, en la forma de diagrama de Bode y llevar a cabo la optimización de la respuesta del sistema

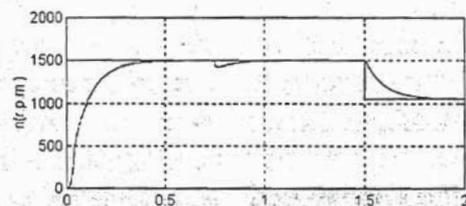
mediante compensación por retraso, por adelanto, por retraso-adelanto o por cancelación de polos indeseables y ver las ventajas de una y otra. A continuación se muestran los resultados obtenidos para algunos de los métodos de control implementados. El motor utilizado es el mismo que en el apartado anterior.



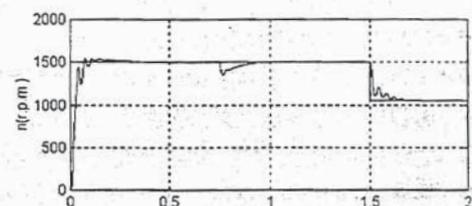
Control de velocidad en lazo abierto con ley V/f fija.



Control de velocidad en lazo cerrado.



Control de velocidad en lazo cerrado con lazo interno de control de par.



Control Vectorial indirecto.

Figura 2. Simulación de algunos los métodos de control.

5.- CONCLUSIONES

El material para prácticas acerca de accionamientos de C/A sigue siendo escaso en las escuelas técnicas, tanto por su complejidad, como por su coste. La existencia de programas matemáticos y de simulación como Matlab y Simulink, nos ha permitido desarrollar una serie de modelos mediante los cuales se puede estudiar el comportamiento de los mencionados accionamientos, proporcionando así un método sencillo de acercar a los alumnos una parte muy importante de la electrónica de potencia, mediante una herramienta tan común hoy día como el ordenador personal.

6.- BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bose, B.K. "Power Electronics and AC Drives". Ed. Prentice-Hall, 1986.
- [2] Leonhard, W. "Control of Electrical Drives". Ed. Springer-Verlag, 1984.
- [3] Wildi, T. "Teoría de los Sistemas Eléctricos de Potencia". De. Hispano Europea, 1983.
- [4] Ruíz, J.M., Lorenzo, S. y Perán, J.R. "Sistemas Electrónicos de Control". Secretariado de publicaciones. Universidad de Valladolid, 1986.
- [5] Franklin, G.F., Powell, J.D. y Emami-Naeini, A. "Control de Sistemas Dinámicos con 5retroalimentación". De. Addison-Wesley Iberoamericana, 1991.