

MODELIZADO Y SIMULACIÓN DEL CONTROL ELECTRÓNICO DE MOTORES CON PSPICE

J. de Marcos , A. Fernández , C. Alonso

Dpto Electrónica y Telecomunicaciones UPV. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial Eibar . Avda Otaola 29 20600 EIBAR
Tfno 943-108444 Fax 943-103196 E-mail jtpmaplj@sb.ehu.es

RESUMEN.- Para facilitar el análisis de los controles electrónicos de motores, se ha creado una librería para PSPICE incluyendo subcircuitos que nos modelizan los diferentes tipos de motores, los convertidores de potencia y los elementos de regulación y control más habitualmente empleados. Esta estructura modular permite estudiar un tipo de control determinado mediante la interconexión de muy pocos bloques, lo cual da gran flexibilidad y comodidad.

1.- INTRODUCCIÓN

Una de las aplicaciones típicas de la electrónica de potencia es la del control de los diferentes tipos de motores eléctricos : continua, de inducción, síncronos, brushless DC, paso a paso, de reluctancia variable, etc... En cuanto a estos controles hay que tener en cuenta:

- Son bastantes complejos y es necesario tener amplios conocimientos sobre temas bastantes diferentes, tales como : máquinas eléctricas, convertidores de potencia, regulación, sensores y transductores, protecciones, etc....
- Los equipos comerciales son caros y no están enfocados al aspecto docente, viéndose el conjunto como una especie de caja negra en donde sólo se puede analizar la entrada y la salida, y en donde las variables internas son inaccesibles.
- El comportamiento del sistema no es lineal.

De todo lo anterior se deduce que para poder comprender y analizar el comportamiento de estos sistemas de control es necesario poder simularlos. A la hora de escoger el software que nos permita modelizar y simular su comportamiento, nos encontramos con que hay gran cantidad de programas comerciales como MATLAB-SIMULINK, ACSL, SIMNON, etc.. que nos permitirían hacerlo, pero tienen el problema de que no son muy conocidos por las personas que trabajan normalmente en el control de motores, es decir por los electrónicos. Estos normalmente conocen el programa de simulación de circuitos eléctricos y electrónicos SPICE en sus versiones comerciales PSPICE de MicroSim y ISPICE de Intusoft. Con este programa cualquier circuito eléctrico se puede simular, pero nos encontramos que un motor es un sistema electromecánico en donde hay variables no eléctricas y además el modelo matemático es complejo (ecuaciones diferenciales no lineales) y completamente desconocido para la mayoría, siendo esto un factor negativo adicional que ha contribuido a la poca expansión de este área de conocimiento dentro de los técnicos electrónicos.

Para facilitar esta expansión es necesario:

- Utilización de un programa de simulación ampliamente conocido como PSPICE.
- Creación de macromodelos o subcircuitos con parámetros genéricos que nos modelicen a los motores eléctricos.
- Creación de macromodelos o subcircuitos con parámetros genéricos que nos modelicen los circuitos normalmente utilizados: Rectificadores, Choppers, Inversores, Reguladores PID, Comparadores con histéresis, Saturaciones, Filtros, Integradores, Transformación de coordenadas (control vectorial), etc...

Una vez creada una biblioteca con los subcircuitos normalmente utilizados, la simulación de un control determinado consistirá en la interconexión de unos pocos bloques o subcircuitos junto con la especificación de los parámetros correspondientes.

Para crear los macromodelos que nos modelicen los motores eléctricos o cualquier otro sistema físico con PSPICE es conveniente:

- Asociar a todas las variables físicas una tensión equivalente.
- Definir unos bloques o subcircuitos elementales que posteriormente se utilizarán en la resolución de las ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento del sistema, tales como: integradores, sumadores, multiplicadores, amplificadores, limitadores, etc..
- Utilizando los bloques elementales previamente definidos se implementan las ecuaciones diferenciales, de forma similar a como se harían en un simulador o calculador analógico.

2.- BLOQUES ELEMENTALES

Para la creación de estos bloques o subcircuitos elementales nos vamos a ayudar de la opción Analog Behavioral Modeling que ofrece PSPICE de MicroSim, la cual permite modelizar el comportamiento analógico de ciertos componentes a través de la relación de transferencia entre la entrada y la salida. Con la opción Analog Behavioral Modeling se amplía las posibilidades de las fuentes de tensión y corriente controlables E y G, limitadas en un principio a fuentes polinomiales, y nos permitirá generar fuentes controlables cuya relación entre entrada y salida venga determinada por cualquier expresión matemática, función de transferencia con la variable s de Laplace, o una tabla de valores.

Recordando las posibles sintáxis de las fuentes de tensión controlables:

$E<name> < (+) \text{ nodo } > < (-) \text{ nodo } > \text{ VALUE } = \{ < \text{expresión} > \}$

$E<name> < (+) \text{ nodo } > < (-) \text{ nodo } > \text{ LAPLACE } \{ < \text{expresión} > \} = \{ < \text{expresión en la variable "s"} > \}$

$E<name> < (+) \text{ nodo } > < (-) \text{ nodo } > \text{ TABLE } \{ < \text{expresión} > \} = (\text{input1}, \text{output1}) (\text{input2}, \text{output2}) \dots$

Como sencillos ejemplos de aplicación se ofrecen los siguientes:

$Eout \ 6 \ 0 \ \text{VALUE} = \{ K1 * V(1) + K2 * V(2) + K3 * V(3) + K4 * V(4) + K5 * V(5) \}$; Sumador de 5 entradas

$Eout \ 2 \ 0 \ \text{LAPLACE } \{ V(1) \} = \{ K/S \}$; Integrador

$Eout \ 3 \ 0 \ \text{VALUE} = \{ K * V(1) * V(2) \}$; Multiplicador de 2 entradas

$Eout \ 2 \ 0 \ \text{VALUE} = \{ K * V(1) \}$; Amplificador

Eout 3 0 TABLE {V(1)-V(2)} = (1E-5,-1) (1E5,1) ; Comparador

3.- MODELIZADO DE COMPONENTES

3.1.- Motores

Para el modelizado de los motores se ha supuesto que no hay saturación ni pérdidas en el hierro. En el caso de los motores de inducción y síncronos se ha partido de las ecuaciones en un sistema de referencia de dos ejes d-q en cuadratura, siendo esta la representación más ampliamente utilizada en la literatura técnica. Debido a esto es necesario realizar transformaciones entre las variables trifásicas reales y las bifásicas d-q.

Como ejemplo, en el caso del motor de inducción se parte de las siguientes ecuaciones (válidas incluso en el régimen transitorio)

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{R_r(1-\sigma)}{\sigma L_r} & 0 & \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r^2} & \frac{\omega_r L_m}{\sigma L_s L_r} \\ 0 & -\frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{R_r(1-\sigma)}{\sigma L_r} & -\frac{\omega_r L_m}{\sigma L_s L_r} & \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r^2} \\ \frac{L_m R_r}{L_r} & 0 & -\frac{R_r}{L_r} & -\omega_r \\ 0 & \frac{L_m R_r}{L_r} & \omega_r & -\frac{R_r}{L_r} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{pmatrix} + \frac{1}{\sigma L_s} \begin{pmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{2}{P} J \frac{d\omega_r}{dt}$$

$$T_L = B \left(\frac{2}{P} \right) \omega_r + T_u$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} (\Psi_{dr} I_{qs} - \Psi_{qr} I_{ds})$$

En la Figura 1 se ve la implementación de las ecuaciones anteriores utilizando los bloques elementales anteriormente comentados junto a unos bloques que realizan las transformaciones entre las variables trifásicas y las bifásicas. En la Figura 2 se puede ver la velocidad de giro y la corriente por una fase obtenidas mediante simulación del arranque directo a la red, utilizando el macromodelo que representa al motor de inducción.

Aplicando esta misma filosofía y conociendo las ecuaciones que modelizan a los diferentes tipos de motores, la realización de otros macromodelos se realiza de forma similar. Como características principales tenemos que:

- Se han creado modelos para los motores: continua, inducción, síncronos, brushless DC trapezoidales y paso a paso.
- Los subcircuitos o macromodelos actúan como cajas negras con unas entradas y salidas. Las entradas son las tensiones aplicadas al inducido y el par útil, siendo las salidas las corrientes absorbidas y la velocidad de giro.

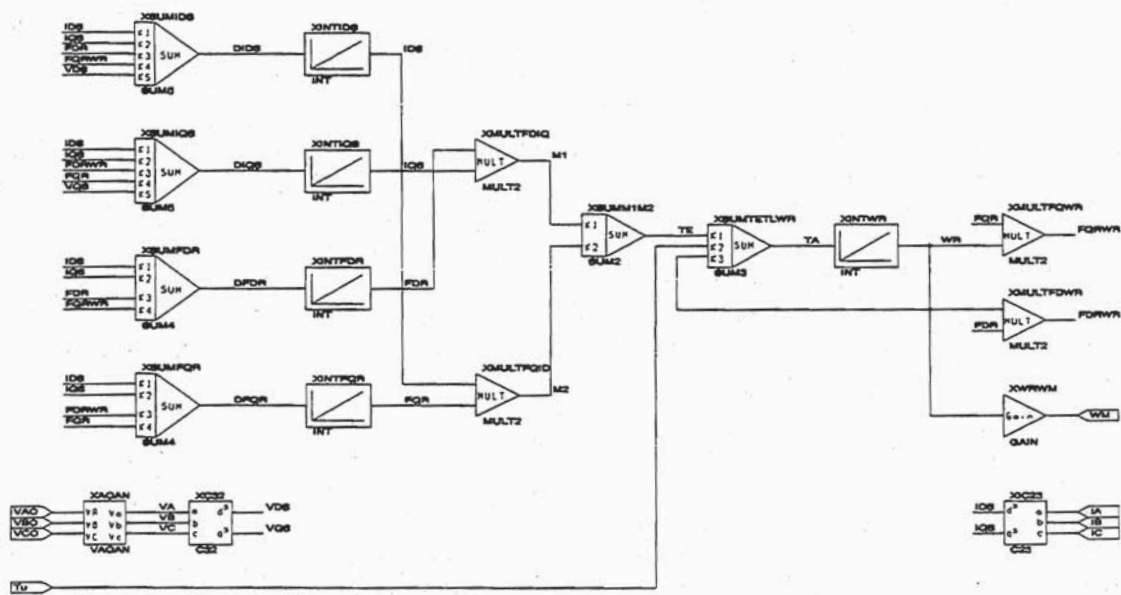


Figura 1 Modelo del motor de inducción

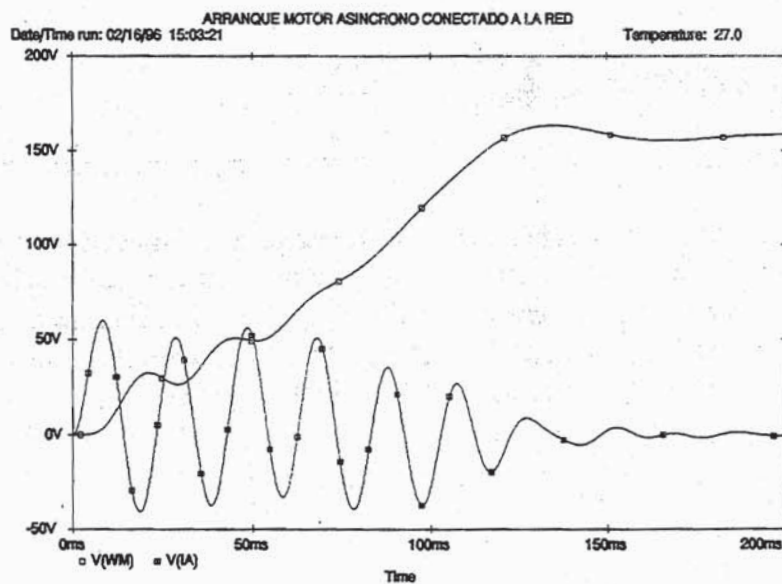


Figura 2 Simulación del arranque directo a la red de un motor de inducción

- Posibilidad de analizar en el caso que interese de variables internas como: flujos, pares electromagnéticos, etc..
- Debido a que se ha utilizado la opción PARAMS para la definición de las constantes y coeficientes en los subcircuitos, la particularización a un motor en concreto se realiza fácilmente llamando al subcircuito con los parámetros deseados.
- Se facilita el análisis del control de motores, ya que la parte más difícil de simular que es la de los propios motores, ya está realizada, pudiéndose dedicar todo el esfuerzo a los convertidores de potencia y a la regulación.

3.2.- Convertidores , Regulación y control

Por otra parte se está trabajando en la creación de subcircuitos que nos representen a los convertidores de potencia y los elementos de regulación y control:

- Rectificadores
- Choppers
- Inversores VSI y CSI
- Modulación PWM sinusoidal
- Inversores PWM controlados en corriente
- Reguladores PID
- Comparadores de histéresis de 2 y 3 niveles
- Filtros
- Limitadores
- Transformación de coordenadas (control vectorial)
- etc..

Para reducir el tiempo de simulación los convertidores se han simulado con generadores de tensión (E) o de corriente (G) los cuales dependen de ciertas señales de control. De esta forma se eliminan los semiconductores de potencia los cuales ralentizan mucho la simulación, obteniéndose formas de onda ideales. Debido a que los convertidores generan señales con cambios muy bruscos, a veces aparecen problemas de convergencia que se evitan cambiando los parámetros que utiliza el PSPICE por defecto utilizando el comando OPTIONS.

Se han simulado controles por Orientación de Campo (Control Vectorial) y DTC (Direct Torque Control) en motores de inducción obteniéndose resultados conformes a los previstos, lo cual confirma la validez de los subcircuitos utilizados. En contrapartida hay que destacar ciertos problemas de convergencia y la lentitud de la simulación con respecto a programas específicos para esos tipos de controles realizados en Turbo C. Como ventaja se tiene la modularidad y la facilidad de modificación de los subcircuitos, ya que no es necesario conocer ningún lenguaje de programación y basta con los conocimientos básicos de PSPICE para poder realizar la simulación.

4.- CONCLUSIONES

- Se ha creado una librería para PSPICE con macromodelos o subcircuitos que modelizan los diferentes bloques de que suele constar un control electrónico de motores eléctricos: los propios motores, convertidores (chopper, inversores, rectificadores, etc..), reguladores, filtros, comparadores, histéresis, integradores, etc..
- Esta librería facilita el análisis del control de motores, ya que está basada en un programa muy conocido como es el PSPICE y permite la simulación de un control determinado mediante la interconexión de muy pocos bloques (modularidad).

5.- REFERENCIAS

- [1] Manual PSPICE de MicroSim Corporation
- [2] Peter Vas "Vector Control of AC Machines" Oxford Science Publications 1990
- [3] Bimal K. Bose "Power Electronics and AC Drives" Prentice-Hall 1986
- [4] Werner Leonhard "Control of Electrical Drives" Springer-Verlag Berlin 1985