

C17

## CONSTRUCCIÓN DE UNA LIBRERÍA DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS USANDO ECOSIMPRO

Juan Carlos Correa, Instituto de Automática, Universidad Nacional de San Juan  
Av. Libertador (Oeste) 1109, 5400 San Juan - Argentina  
jcorrea@inaut.unsj.edu.ar

César de Prada Moraga, Departamento de Ingeniería y Automática, Universidad de Valladolid  
Paseo del Prado de la Magdalena S/N, 47005 Valladolid - España  
prada@autom.uva.es

### Resumen

*Con el objetivo de estudiar, analizar y diseñar sistemas de control para máquinas eléctricas, se desarrolló una librería de modelos para la simulación dinámica de estos sistemas. Esta librería no solo incluye modelos de máquinas eléctricas, sino también de un conjunto de elementos eléctricos, electrónicos, mecánicos y de cálculo que intervienen en sistemas de control de este tipo. En el presente trabajo se describen brevemente algunos de los modelos desarrollados y se mencionan algunas características de la herramienta de simulación utilizada, ECOSIM. Esta herramienta es un lenguaje de simulación orientado a objeto que posee características que la hacen adecuada para el modelado de sistemas físicos complejos. Este software genera código fuente de visual C++ que una vez compilado produce un archivo que se puede ejecutar en forma independiente. A modo de ejemplo se presenta el modelado y simulación de un motor de inducción controlado en coordenadas de campo y se muestran algunos resultados obtenidos.*

**Palabras Clave:** Simulación, EcosimPro, modelado de sistemas físicos orientado a objetos, máquinas eléctricas, control en coordenadas de campo, componentes electrónicos.

### 1. INTRODUCCIÓN

La simulación dinámica es una herramienta de mucha utilidad para el estudio, análisis y diseño de sistemas de control de plantas complejas. En el caso particular de las máquinas eléctricas, el sistema de control incluye circuitos de electrónica de potencia y veloces dispositivos de cálculo y control. La herramienta de simulación que se adopte debe ser capaz de modelar y simular con fidelidad sistemas muy diversos como lo son los continuos y los de eventos discretos. Los

modelos de las máquinas eléctricas son continuos, con dinámicas rápidas y generalmente no lineales. Los modelos de electrónica de potencia, en cambio, son de eventos discretos y no lineales. Existen herramientas para modelado de sistemas continuos y otras específicas para el modelado de circuitos electrónicos. Entre las primeras se encuentra Matlab con su toolbox Simulink, con el que algunos autores han desarrollado modelos de máquinas eléctricas y están documentados en la literatura sobre el tema, como es el caso del autor Chee-Mun Ong en el libro "Dynamic Simulation of Electrical Machinery Using Matlab/Simulink" [1]. Por otro lado las empresas canadienses "Hydro-Quebec and Teqsim International Inc." han desarrollado para Matlab en el año 1998, un toolbox específico sobre el tema llamado "Powersys". En este toolbox se ofrece una librería de modelos de máquinas eléctricas y de algunos componentes electrónicos para simular en el entorno Matlab [4]. Para el modelado y simulación de circuitos electrónicos se dispone desde hace años de programas específicos como el PSPICE de la empresa Microsim Corporation y el EWB (Electronic Workbench), que por ser muy difundidos y utilizados, muchos fabricantes de componentes electrónicos ofrecen los modelos de sus productos para ser simulados.

Se buscó una herramienta que modele y simule en forma conjunta circuitos electrónicos y plantas continuas complejas, combinando las facilidades que brindan los softwares específicos sobre cada tema y se encontró en ECOSIM una buena solución para modelar los sistemas propuestos. El inconveniente que se encontró, por ser una herramienta relativamente nueva, es que no estaban desarrolladas librerías de componentes electrónicos y de máquinas eléctricas. Es por este motivo que se encaró este desarrollo a fin de disponer de una herramienta para el estudio, análisis y diseño de sistemas de control de máquinas eléctricas.

La organización de este trabajo es la siguiente: en la sección 2 se presenta la herramienta de simulación utilizada, ECOSIM. En la sección 3 se desarrolla el modelo del motor de inducción en coordenadas estacionarias y se describe el modelado de la electrónica de potencia y de otros elementos. La sección 4 presenta como ejemplo el modelo de un motor de inducción con los dispositivos para el control en coordenadas de campo. En la sección 5 se muestran algunas curvas obtenidas por simulación y en la sección 6 se presentan las conclusiones del trabajo.

## 2. LA HERRAMIENTA DE SIMULACION UTILIZADA

Con la intención de brindar una visión general de ECOSIM, se describen algunas de sus características relevantes [2].

Una de las particularidades de esta herramienta de simulación es que se puede modelar cada componente físico (objeto) en forma independiente de otros y posteriormente armar un sistema a partir de la vinculación de los distintos elementos que lo componen, en forma similar a la topología del sistema real [3]. La herramienta hace un tratamiento simbólico de las ecuaciones de los modelos de acuerdo a la topología especificada y a las condiciones de contorno del sistema, generando las ecuaciones que se utilizan para la simulación con potentes algoritmos de integración. Esto permite una programación a mayor nivel, dejando al usuario la tarea de modelar los componentes y definir la topología del sistema. A modo de ejemplo, supóngase un circuito formado por dos resistencias  $R_1$  y  $R_2$  y una fuente cuya tensión y corriente son  $v(t)$  e  $i(t)$  respectivamente. De acuerdo a como se conecten las resistencias, en serie o en paralelo, la ecuación del sistema será la Ec.(1) o (2). Este procesamiento simbólico lo realiza el software en forma automática y el usuario solo debe ocuparse de modelar los componentes (resistencias y fuente) y definir la topología.

$$v(t) = i(t)(R_1 + R_2) \quad (1)$$

$$v(t) = i(t) \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \quad (2)$$

Otro ejemplo ilustrativo que destaca características de la herramienta, es el modelado de un motor eléctrico. A este modelo, si se le aplica una fuente de energía eléctrica en sus bornes, produce energía mecánica en su eje. Pero si se procede a la inversa, o sea que se hace girar la máquina aplicándole un par en su eje, el modelo funciona como generador produciendo energía eléctrica en sus bornes. El modelo es el mismo, solamente ha cambiado la dirección del flujo de energía.

La vinculación entre los distintos objetos, se hace a través de los llamados puertos, en donde están disponibles las variables definidas como accesibles. En el caso de componentes eléctricos, se ha buscado que los puertos tengan semejanza física con los nodos o puntos de conexión de dos o mas componentes. En estos puertos las variables que estarán presentes son la corriente y la tensión. El lenguaje permite definir restricciones para las variables de distintos objetos vinculados a un mismo puerto. Estas restricciones se corresponden con las leyes físicas que rigen para estas variables. En el caso de los sistemas eléctricos, la suma de las corrientes de distintos objetos conectados a través de uno de sus puertos deben ser iguales a cero, como lo expresa la Ec. (3). A su vez, las tensiones en los puertos de distintos objetos conectados deben ser las mismas, como está expresado en la Ec. (4).

$$\sum_{i=1}^n i_i(t) = 0 \quad (3)$$

$$v_1(t) = v_2(t) = v_i(t) = \dots v_n(t) \quad (4)$$

Donde:

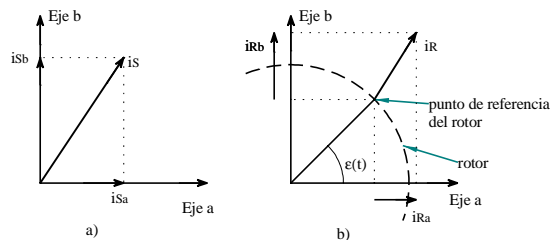
$i_i$ : corriente en el puerto del  $i$ -ésimo objeto conectado.

$v_i$ : tensión en el puerto del  $i$ -ésimo objeto conectado.

## 3. MODELOS

### 3.1 Modelo del Motor de Inducción en Coordenadas Estacionarias

En el modelo de motor de inducción, tal como es presentado en la bibliografía [5], se representan las variables eléctricas y magnéticas como vectores. Estos vectores surgen de la representación de las variables en un sistema de coordenadas ortogonales giratorio o estacionario. En el caso del análisis del control en coordenadas de campo, este sistema de coordenadas es giratorio y orientado con el campo. En el presente desarrollo interesa un modelo general, por lo tanto los vectores estarán referidos a un sistema estacionario cuyos ejes son: *eje a* y *eje b*, como se muestra en la Fig. 1.



**Fig. 1:** Descomposición de las variables eléctricas según un sistema de ejes estacionario:

- a) descomposición de la corriente del estator,
- b) descomposición de la corriente del rotor.

Analizando el circuito de estator mostrado en la Fig. 2 y considerando los efectos que tiene la corriente que circula por un conductor del rotor situado en la posición angular  $\theta$ , se obtiene la Ec.(5).

$$u_S = R_S i_S + L_S \frac{di_S}{dt} + L_0 \frac{d(i_R e^{j\theta})}{dt} \quad (5)$$

Donde:

$u_S$  : vector que representa la tensión en el estator.

$i_S$  : vector que representa la corriente en el estator.

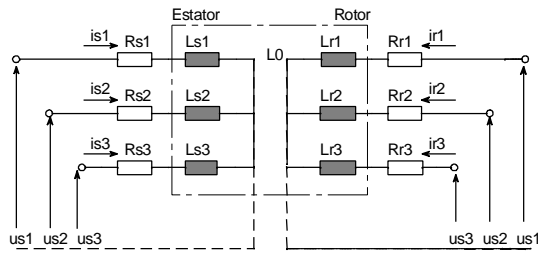
$i_R$  : vector que representa la corriente en el rotor.

$R_S$  : resistencia total del circuito de estator.

$L_S$  : inductancia total del circuito de estator.

$L_0$  : inductancia mutua.

$\theta$  : posición angular de un punto del rotor considerado.



**Fig. 2:** Esquema eléctrico de un motor de inducción.

Haciendo un análisis similar al anterior, pero ahora para el circuito de rotor del tipo jaula de ardilla simple, se obtiene la Ec.(6).

$$0 = R_R i_R + L_R \frac{di_R}{dt} + L_0 \frac{d(i_S e^{-j\theta})}{dt} \quad (6)$$

La expresión del par motor  $T_m$ , está desarrollada en la bibliografía ya citada y está expresada en la Ec. (7).

$$T_m = \frac{2}{3} L_0 z_p \Im \left[ i_S (i_R e^{j\theta})^* \right] \quad (7)$$

Donde:

$z_p$  : número de pares de polos.

$T_m$  : par motor generado.

$\Im$  : parte imaginaria del argumento entre corchetes.

$(i_R e^{j\theta})^*$  : complejo conjugado de  $(i_R e^{j\theta})$

La cinemática del modelo está expresada en la Ec. (8).

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (8)$$

Donde:

$\omega$  : velocidad angular eléctrica.

La velocidad mecánica en el eje del motor,  $\omega_m$ , será como lo expresa la Ec. (9).

$$\omega_m = \frac{\omega}{z_p} \quad (9)$$

La ley de Newton para los movimientos rotacionales está expresada en la Ec. (10).

$$T_m = J \frac{d\omega_m}{dt} + T_L \quad (10)$$

$$T_L = T_L(t, \theta, \omega_m, \dot{\omega}_m) \quad (11)$$

Donde:

$T_L$  : par de carga.

$J$  : momento de inercia de la masa rotante.

La Ec. (11) expresa que el par de carga puede ser una función no lineal del tiempo, posición, velocidad y aceleración del eje del rotor.

Es conveniente expresar los vectores que representan las variables según un sistema de coordenadas estacionario cuyos ejes son eje a y eje b como lo muestra la Fig. 1. La descomposición de las variables eléctricas en este sistema de coordenadas está expresada en las Ecs. (12), (13) y (14).

$$u_S = u_{Sa} + j u_{Sb} \quad (12)$$

$$i_S = i_{Sa} + j i_{Sb} \quad (13)$$

$$i_R e^{j\theta} = i_{Ra} + j i_{Rb} \quad (14)$$

Reemplazando las Ecs. (9), (12), (13) y (14) en las Ecs. (5), (6), (7), (8) y (10), desarrollando derivadas, operando y separando parte real e imaginaria se obtiene el sistema de ecuaciones expresado en (15) que son las ecuaciones que definen el modelo del motor de inducción en coordenadas estacionarias.

$$\begin{aligned} u_{Sa} &= R_S i_{Sa} + L_S \frac{di_{Sa}}{dt} + L_0 \frac{di_{Ra}}{dt} \\ u_{Sb} &= R_S i_{Sb} + L_S \frac{di_{Sb}}{dt} + L_0 \frac{di_{Rb}}{dt} \\ 0 &= R_R i_{Ra} + L_R \frac{di_{Ra}}{dt} + L_R i_{Rb} \omega \\ &\quad + L_0 \frac{di_{Sa}}{dt} + L_0 i_{Sb} \omega \\ 0 &= R_R i_{Rb} - L_R i_{Ra} \omega + L_R \frac{di_{Rb}}{dt} \\ &\quad + L_0 \frac{di_{Sb}}{dt} - L_0 i_{Sa} \omega \\ j \frac{d\omega}{dt} + T_L &= \frac{2}{3} L_0 z_p (i_{Sa} i_{Rb} - i_{Sb} i_{Ra}) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\omega_m = \frac{\omega}{z_p}$$

La transformada de Clarke para las tensiones y corrientes está definida en las Ecs. (16) y (17) respectivamente. La transformada inversa para las mismas variables no hace falta definirla ya que la herramienta de simulación lo hace en base a las transformadas directas definidas en las Ecs. (16) y (17).

$$\begin{bmatrix} u_{Sa} \\ u_{Sb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} i_{Sa} \\ i_{Sb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Donde:

$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}$  : vector de tensiones del motor trifásico.

$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix}$  : vector de corrientes del motor trifásico.

Las Ecs. (15), (16) y (17) representan el comportamiento eléctrico, dinámico y cinemático del motor de inducción en coordenadas estacionarias. Estas ecuaciones son aptas para introducirlas en el modelo ya que no requieren otro tratamiento algebraico adicional para ordenarlas y encontrar una solución para la simulación. Esta tarea la realiza la herramienta simplificando la tarea del usuario. Tampoco es necesario definir variables de entrada y de salida, porque esta función la realiza la herramienta de acuerdo con las condiciones de contorno.

### 3.2 Modelado de la Electrónica de Potencia

La electrónica de potencia se modela a partir de modelos de los elementos sencillos tales como diodos, llaves, resistencias, condensadores, etc. y posteriormente se arman circuitos de acuerdo con la topología del sistema físico a modelar. Se han desarrollado modelos sencillos de los componentes electrónicos, porque no era objetivo de este trabajo obtener modelos de componentes con gran exactitud, en particular de los semiconductores, pero la herramienta de simulación permite realizar modelos con la precisión y justeza que requiera el usuario. La complejidad de cada modelo (objeto) queda encapsulada en el mismo y es transparente al usuario,

solo se puede acceder a los parámetros que se definan como accesibles.

El lenguaje de simulación permite definir una clase base y a partir de esta obtienen otros modelos por herencia de esta clase. La clase base más sencilla que se define es un elemento eléctrico que tiene dos terminales para la cual se fijan las propiedades básicas para este elemento. Una de las propiedades que debe cumplir es, por ejemplo, que la corriente que entra por un puerto o terminal es la misma que sale del otro. A partir de esta clase base se pueden definir elementos como resistencias, condensadores, diodos, inductancias, etc..

### 3.3 Modelado de otros Elementos

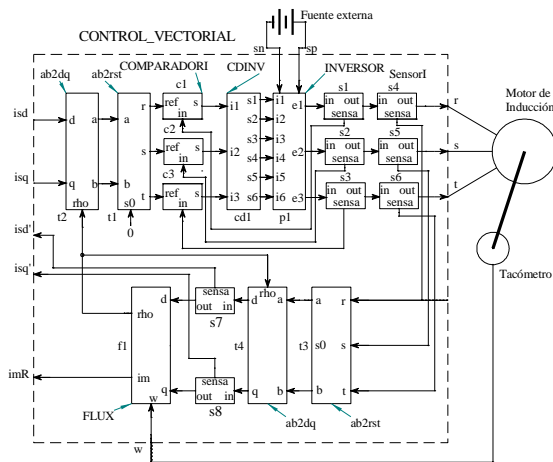
Elementos tales como: elementos mecánicos, sensores, controladores., etc. se modelan de forma similar a lo realizado para los elementos de electrónica de potencia. Para el caso de elementos mecánicos se deben definir puertos mecánicos para vincular elementos de este tipo en las que están accesibles variables mecánicas tales como velocidad, par y posición.

## 4. MODELO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA UNA MÁQUINA ELÉCTRICA.

Con el fin de mostrar un ejemplo que incluya una cierta variedad de modelos desarrollados, se presenta un sistema como el mostrado en la Fig. 3. Este sistema contiene los bloques necesarios para realizar un control en coordenadas de campo de un motor de inducción. Este es el bloque indicado en la figura con línea de trazos e incluye toda la electrónica, sensores de corriente y bloques de cálculo. Las entradas a este bloque son las corrientes de estator, en coordenadas de campo, que se desean imponer en el motor,  $i_{Sq}$  e  $i_{Sd}$  (corriente en cuadratura y según eje directo) y las salidas del bloque, que se utilizan para realimentar el sistema de control, son las corrientes que circulan por el estator en coordenadas de campo  $i_{Sq}$  e  $i_{Sd}$  y la corriente magnetizante  $i_{mR}$ . Para armar un sistema de control de velocidad, por ejemplo, solo habría que agregarle el controlador de velocidad que actúe sobre las entradas  $i_{Sq}$  e  $i_{Sd}$  y se realimente con las salidas del bloque  $i_{Sq}$  e  $i_{Sd}$ . El sistema presentado consta además con un modelo de motor de inducción y de tacómetro. Se puede apreciar en la Fig. 3 que se han modelado bloques que funcionan en forma reversible; esto se debe a características del lenguaje.

La función de cada uno de los bloques de la Fig. 3 es la siguiente:

**ab2dq:** Bloque que transforma un sistema ortogonal de coordenadas estacionario en otro similar pero en coordenadas de campo o viceversa (transformadas de Park directa e inversa).



**Fig. 3:** Bloques de control en coordenadas de campo

**ab2rst:** Bloque que realiza la transformación de un sistema de dos fases a tres fases y viceversa (transformadas de Clarke directa e inversa).

**FLUX:** Bloque estimador de flujo.

**COMPARADORI:** Modelo de comparador de corriente con histéresis. Este bloque tiene como parámetros los umbrales de histéresis, como entradas las señales de los sensores de corriente y como salidas, tres líneas para el control de las ramas del inversor.

**CDINV:** Modelo de circuito de disparo de las llaves del inversor. Este bloque tiene como parámetro el tiempo muerto requerido por las llaves del inversor, como entradas las tres salidas del comparador de corriente (COMPARADORI) y como salida las seis líneas para accionar las llaves del inversor.

**INVERSOR:** Modelo de Inversor trifásico. Este bloque está compuesto por siete llaves: seis del inversor y una de frenado.

**SensorI:** Sensor de corriente.

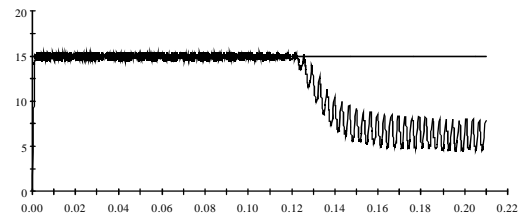
**Tacómetro:** Tacómetro analógico.

**Fuente externa:** Modelo de fuente aplicada en la barra de continua.

## 5. RESULTADOS DE SIMULACION

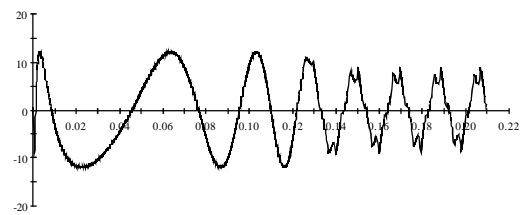
Se realizó la simulación para un sistema que se corresponde con lo presentado en la Fig. 3. El motor es de 1 HP de dos pares de polos, con una carga

mecánica constante de 4 Ntm. ( $R_s=2.643 \Omega$ ;  $R_R=3.4 \Omega$ ;  $L_s=0.1527$  Hy;  $L_R=0.1527$  Hy;  $L_0=0.1459$  Hy;  $J=0.005$  Kg m s<sup>2</sup>). Se le aplicó como entrada  $i_{sq} = 15$  A,  $i_{sd} = 10$  A y una fuente de tensión continua de 500 V.



**Fig. 4:** Corriente  $i_{sq}$  del motor y la de referencia.

La Fig. 4 representa la corriente  $i_{sq}$  del motor y la de referencia. Se puede apreciar que la corriente  $i_{sq}$  del motor sigue a la referencia hasta aproximadamente los 0.12 s que es el punto hasta donde la velocidad del motor y la tensión de la barra de continua lo permite.



**Fig. 5:** corriente de la fase R del motor.

La Fig. 5 representa la corriente que circula por la fase R del motor, mientras que la Fig. 6 muestra la velocidad en el eje del motor. Se puede apreciar que en un principio la velocidad es negativa debido a que el par antagónico es mayor que el par motor al inicio de la simulación.

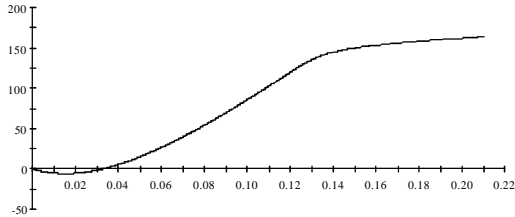
## 6. CONCLUSIONES

Se han desarrollado modelos de distintas máquinas eléctricas, circuitos de electrónica de potencia y bloques para el cálculo y control. La herramienta utilizada resulta útil y adecuada para este trabajo ya que permite modelar y simular sistemas compuestos por diversos tipos de componentes: máquinas eléctricas, circuitos electrónicos y bloques con programas desarrollados en C o en Fortran.

La interpretación del modelo resulta sencilla porque la topología y el acceso a las variables se asemejan bastante al sistemas físico que se desea estudiar. En los modelos de los componentes electrónicos, por ejemplo, en los puertos se tiene accesibles la tensión de nodo y la corriente que circula por el componente. Estas variables se pueden graficar y obtener registros

similares a los que se obtendrían con un instrumento de medición.

Existe un entorno gráfico que se comercializa junto con el lenguaje de simulación, que permite generar modelos en forma más sencilla, ya que se hace



**Fig. 6:** Velocidad del eje del motor.

uniendo bloques que se escogen de una biblioteca de componentes. Por ejemplo, los circuitos electrónicos, se modelan uniendo bloques como si se tratara de conductores eléctricos. Cada uno de los bloques encapsula el modelo de un componente electrónico.

Se puede concluir que se ha logrado disponer de una librería para la simulación de sistemas de control de máquinas eléctricas y circuitos electrónicos en general, para ser usada como herramienta para el

estudio y análisis de estos sistemas. Esta librería se puede enriquecer depurando algunos modelos, como es el caso de la los semiconductores de potencia, por ejemplo, incorporándoles a estas características propias de un componente en particular en base a los parámetros que brinda su fabricante.

- [1] Chee-Mun Ong, Dynamic Simulation of Electrical Machinery Using Matlab/Simulink, Prentice Hall PTR, USA (1998).
- [2] Empresarios Agrupados, ECOSIM Simulation Language (EL), Empresarios Agrupados and ESA, Spain (1999).
- [3] Empresarios Agrupados, ECOSIM User Manual, Empresarios Agrupados and ESA, Spain (1999).
- [4] Hydro-Quebec and TEQSIM International Inc., Power System Blockset Users Guide, TEQSIM International Inc., Canada (1998).
- [5] Leonhard, W, Control of Electrical Drives, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (1996).