

CONTROL DE VOLTAJE Y FRECUENCIA DE LA MÁQUINA SÍNCRONA MEDIANTE CONTROL DIFUSO DESACOPLADO.

Voltage and frequency Control of synchronous machine using decoupling control.

RESUMEN

Los sistemas de control difusos han mostrado sus ventajas en el control e identificación de sistemas complejos altamente no lineales. La máquina síncrona se caracteriza por ser un sistema no lineal difícil de modelar y sensible ante cualquier variación en sus parámetros de salida. El conocimiento de la máquina y su modelamiento mediante reglas lingüísticas permite mostrar la utilidad del control difuso ante diversas perturbaciones. El control desacoplado permite establecer la utilidad del controlador difuso aquí diseñado para el lazo de voltaje y frecuencia de la máquina.

PALABRAS CLAVES: Control voltaje-frecuencia, control desacoplado, lógica difusa, máquina síncrona.

ABSTRACT

Fuzzy systems have shown its advantages for controlling and identifying complex systems with nonlinearities. Synchronous machine is a nonlinear system which is very difficult for modelling and highly sensible due to the variation in the output. Synchronous machine modelling by linguistic rules is usefu, and it presents the advantage of fuzzy control. The decoupled control is used to decompose a multivariable process into a series of independant single loop subsystems and its use as a fuzzy controller is very important for presenting a voltage-frequency controller that has been designed in this project.

KEYWORDS: *Decoupled control, fuzzy logic, synchronous machine, voltage-frequency controller.*

ALFONSO ALZATE GÓMEZ

Ingeniero Electricista, M. Sc.
Profesor Titular
Universidad Tecnológica de Pereira
alalzate@utp.edu.co

ANDRÉS ESCOBAR MEJÍA

Ingeniero Electricista, M. Sc.
Profesor Auxiliar
Universidad Tecnológica de Pereira
andreses1@utp.edu.co

JUAN GUILLERMO OSORIO GARCIA

Estudiante X semestre
Programa de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira
juguoso@hotmail.com

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN ELECTRÓNICA DE POTENCIA

1. INTRODUCCIÓN

La máquina síncrona cumple un papel fundamental dentro del sistema eléctrico de potencia ya que impone las condiciones de operación de las variables eléctricas (tensión en bornes, la frecuencia, las potencias circulantes, entre otras), que son las que determinan el estado de operación del mismo [1]. Es por esta razón que los sistemas de control de las máquinas síncronas adquieren gran importancia y deben adaptarse nuevas metodologías que permitan un mejor manejo sobre dichas variables.

Con el perfeccionamiento de las técnicas de control que emplean la lógica difusa, se hace posible diseñar controladores que simulen las acciones que un experto humano toma ante sistemas físicos que son altamente no lineales con resultados satisfactorios [2]. A diferencia del control clásico, los controladores difusos son más eficientes, robustos, y complejos, y pueden ser

implementados en sistemas programables facilitando el desarrollo de los sistemas de control [3], [4], [6].

La tensión en bornes y la frecuencia de la máquina se ven afectadas directamente por las perturbaciones externas en los sistemas eléctricos de potencia. Estas perturbaciones son ocasionadas principalmente por operaciones normales de la red como conexión y desconexión de carga y por las fallas externas que son ajenas a los elementos que componen el sistema eléctrico. Al variar la carga se produce un cambio en el torque generado en la máquina, afectando directamente el equilibrio de potencias entre la turbina y la máquina síncrona.

La variación en la frecuencia causa una pérdida de sincronismo en el generador y las cargas. La variación en el voltaje en terminales afecta directamente los flujos de la potencia entregada por la máquina y las características de funcionamiento de los equipos conectados a ella, como se ve en [10].

Una metodología empleada para controlar sistemas multivariables que tienen lazos independientes (pero que pueden interactuar entre ellos) es la denominada control desacoplado [1]. Dicha metodología permite descomponer o desacoplar un sistema multivariable complejo en subsistemas con un solo lazo [2]. Esto permite controlar los modos propios de un sistema por separado mediante controladores clásicos.

La metodología de control que aquí se presenta se centra en reducir los efectos de la variación en la carga sobre el voltaje y la frecuencia en terminales de la máquina. Dicha metodología emplea sistemas difusos para el control de la frecuencia y la tensión en bornes de la máquina síncrona y su respectivo primomotor o turbina. Se utilizarán simulaciones de la máquina síncrona de polos salientes y de la turbina, además se tendrá en cuenta que esta opera como generador aislado ante perturbaciones en la carga. Se muestra la utilidad del controlador difuso desacoplado para el control de la máquina.

2. SISTEMAS DIFUSOS

El modelo de la máquina síncrona es altamente no lineal [4] y algunas de las variables requeridas para su modelamiento son difíciles de medir mediante sensores o estimar mediante observadores. Dependiendo del tipo de estudio que se requiera realizar sobre la máquina se requiere de un determinado modelo (representado por su orden y variables de estado).

Desde el punto de vista de la lógica difusa, la máquina síncrona es vista simplemente como un sistema de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO), que entrega valores numéricos en cierto rango de operación de las variables de control, para luego hacer un análisis interno y escoger las variables de salida más adecuadas para el óptimo funcionamiento del sistema [5]. Esto a simple vista puede ser una tarea no muy complicada, pero hay que tener en cuenta que la lógica difusa tiene muchos métodos para obtener la respuesta deseada, aunque esto no signifique que todos los métodos sean óptimos. Se puede dar el caso en que algunos métodos se extiendan mucho más que otros, o también realizar combinaciones de diferentes métodos e inclusive hasta combinar la lógica difusa con otras técnicas de control como redes neuronales, entre otras [8], para que le sirvan de complemento.

Luego de escoger el método más adecuado dentro de la lógica difusa, se obtiene el módulo de procesamiento que consta de la base de reglas, el sistema de inferencia, y la conversión de las variables reales, de entrada y salida a variables difusas y viceversa [9]. Este debe ser fácilmente adaptable en un sistema programable, y además debe actuar instantáneamente ante un mínimo cambio del sistema.

3. DISEÑO DE LOS CONTROLADORES DIFUSOS

En el control con lógica difusa se utiliza el conocimiento del sistema dado por el experto y plasmado en la base de conocimiento para ajustar la señal de control y su ganancia. Antes de establecer las estrategias a utilizar se presenta un esquema que representa el sistema y el controlador a implementar (figura 1).

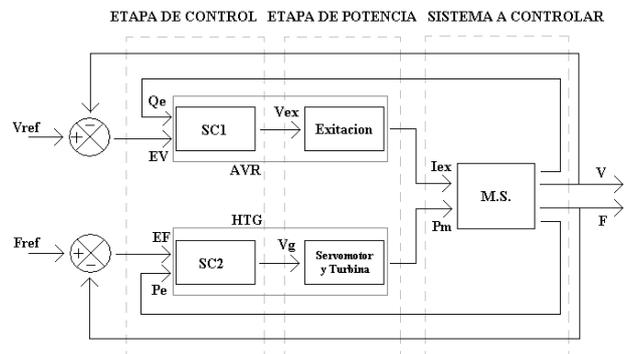


Figura 1. Sistema de control en lazo cerrado con realimentación negativa.

No es necesario utilizar un sistema de control multiacoplado porque las variables a controlar se pueden considerar de manera independiente [1], [2], por tal motivo se realizarán dos sistemas separados que formarán todo el sistema de control difuso (AVR, HTG), el primero se encargará de la corriente (I_{ex}) del campo de la máquina síncrona y el segundo de la potencia mecánica (P_m) suministrada a la misma.

3.1 Control del campo SC1

En general el regulador de la tensión (excitación) es un sistema bastante complejo [6] pero puede reemplazarse por un sistema (AVR difuso) que realice la misma función, figura 1. El control del campo (SC1) está constituido por un conjunto de base de reglas difusas y un mecanismo de inferencia difuso [3]. Se determinan cada uno de los mecanismos lógicos difusos a utilizar en cada una de las etapas del controlador (Defuzzificación, Fuzzificación, Base de conocimiento, Lógica de decisión). En el SC1 se toma como entradas el error de tensión en bornes de la máquina síncrona (EV) y las variaciones de potencia reactiva de la carga (NQ), de esta manera el controlador queda en condiciones de responder satisfactoriamente ante variaciones dentro de su rango.

$$EV = V_{leido} - V_{referencia} \quad (1)$$

Estos datos se consideran valores en p.u., donde: V_{leido} es una de las variables de estado de la máquina síncrona. EV puede ser positivo si V_{leido} es mayor al valor de referencia y negativo en caso contrario.

Para construir la señal de error de la tensión, es necesario tomar primero el valor de la tensión en bornes de la máquina (Vleido), esta señal se obtiene de las mediciones realizadas sobre la máquina.

Luego de obtener la señal de error EV en p.u., se multiplica por la ganancia $K_{adev} = 10$, la cual se encarga de ajustar el error de tensión al universo de discurso de la base de reglas en el SC1.

La base del conocimiento contiene dos etapas, la base de datos y la base de reglas. La primera se encarga de generalizar el comportamiento de la tensión en bornes y el nivel de potencia reactiva ante las variaciones de la corriente de campo, mientras que la segunda se encarga de manipular los datos que entran al controlador (en este caso EV, NQ) para luego someterlos a la etapa de inferencia.

La base de reglas se puede considerar como la primera etapa de la base de conocimiento, esta etapa se encarga de recibir los datos del error de tensión y nivel de potencia reactiva, adecuarlos y entregarlos a la etapa de inferencia.

Las variables de entrada y las variaciones permitidas se dan en p.u., la tensión en bornes se debe mantener en 1 ± 0.1 en p.u., por lo tanto si se quiere mantener la tensión en el valor nominal, el intervalo de error permitido es de ± 0.1 en p.u. De esta manera el intervalo de acción de EV se determina con:

$$EV = kbr1 \cdot [-0.1, 0.1] \tag{2}$$

Donde $kbr1$ es una constante que permite calibrar el universo de discurso de EV ante errores de tensión mayores, estos se pueden presentar cuando la referencia de tensión no es la nominal. En el diseño se utilizó $kbr1 = 5$ por lo que la variación de EV queda contenida en $[-0.5, 0.5]$ en p.u. En este rango se ubican cada una de las funciones de pertenencia que hacen parte de la base de reglas de EV, mientras que para NQ se escoge una variación de $[-1, 1]$ en p.u., en este intervalo se ubican las funciones de pertenencias correspondientes a dicha variable.

Es conveniente que las funciones de pertenencia de la base de reglas tengan la misma forma que las funciones de pertenencia de la base de datos, esto ayuda a simplificar las operaciones en la etapa de inferencia. Por este motivo se escogen funciones de pertenencia trapezoidales y triangulares para ambas etapas, estas funciones son fácilmente derivables por segmentos y brindan una buena interpretación del comportamiento de los datos, además son fácilmente manipulables y programables.

Se definen los subconjuntos de la base de reglas que se distribuyen en el universo de discurso de EV y NQ,

además se asume un nivel de cuantización de siete para EV y tres para NQ. Estas particiones serán nombradas de la siguiente manera, para EV: NG $[-0.5, -0.273]$, NM $[-0.376, -0.144]$, NP $[-0.266, -0.027]$, ZE $[-0.132, 0.132]$, PP $[0.033, 0.242]$, PM $[0.143, 0.369]$ y PG $[0.263, 0.5]$. Para NQ: N $[-1, -0.23]$, ZE1 $[-0.41, 0.415]$ y P $[0.15, 1]$.

Las funciones de pertenencia para cada uno de los subconjuntos de la base de reglas se presentan en [1].

El conjunto de funciones que hacen parte de la base de reglas del SC1 se observa en las figura 2.

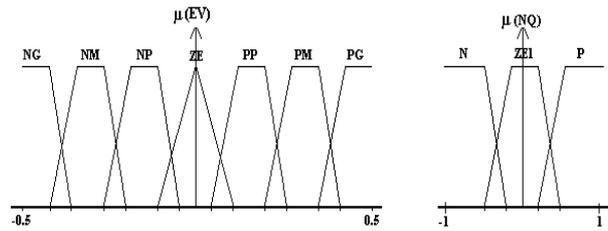


Figura 2. Funciones de pertenencia para EV y NQ.

El controlador SC1 actúa en la región lineal de la máquina síncrona estableciendo una serie de funciones de pertenencia que anticipan el comportamiento de un experto humano manipulando la corriente de excitación del campo a través de la variación de la tensión del arrollamiento de campo de la máquina síncrona. Se utiliza V_{exc} como variable en la base de datos y está contenida en el rango $[-3.3, 3.3]$.

El nivel de cuantización de la base de datos es de 7, porque permite hacer una fácil asociación de los conjuntos de la base de reglas. Estos subconjuntos son llamados NL, NM, NS, CE, PS, PM, PL y contienen datos sobre el comportamiento de la corriente de excitación. Los dominios para los subconjuntos mencionados y la respectiva función se presentan en [1].

Las operaciones lógicas difusas utilizadas para llevar a cabo la implicación entre los diferentes conjuntos están muy relacionadas con la forma en que se escriban las reglas lógicas difusas, por lo tanto se enuncia el sistema de reglas que se utiliza para llevar a cabo el control de la tensión en bornes de la máquina síncrona:

If (EV is NG) and (NQ is N) then (V_{exc} is PM) (3)

If (EV is NM) and (NQ is N) then (V_{exc} is PS) (4)

If (EV is NP) and (NQ is N) then (V_{exc} is CE) (5)

Para la etapa de fuzificación se escoge el fuzificador triangular [4], teniendo en cuenta que este tipo de fuzificadores reducen el nivel de ruido que se puede presentar a la entrada del controlador y además reduce el cálculo de la máquina de inferencia, porque el tipo de

funciones de pertenencia a trabajar incluye de tipo triangular. Para la etapa de defuzzificación se utiliza el método del centro de gravedad [3].

3.2 Control de la Potencia Mecánica SC1

El SC2 actúa sobre la turbina hidráulica, y controla la frecuencia entregada por la máquina síncrona a través de la tensión aplicada al servomotor.

El SC2 tiene como entrada Epos y como salida Vg, la ecuación del error es similar al SC1 pero con variables diferentes, no se tomará directamente la señal de frecuencia para controlarla, esta se cambiará por la señal de velocidad mecánica, esto se hace porque la señal de Wm está en p.u. y por lo tanto una variación de esta es similar a una de frecuencia:

$$EWm = Wmleida - Wmreferencia \tag{6}$$

Estos datos se consideran valores en p.u. donde Wmleida es una de las variables de estado de la máquina síncrona y la Pe es la potencia eléctrica entregada por la máquina síncrona en p.u.

El esquema de control se tiene que la señal de potencia se multiplica por una ganancia Kp, la cual relaciona la potencia nominal con la frecuencia, para luego sumarla con la señal del error de velocidad. Esta ecuación representa el error de posición:

$$Epos = Kp * (Pe - Pm) - (Wref - Wm) \tag{7}$$

En el SC2, el EWm es positivo si Wmleida es mayor al valor de referencia y es negativo en caso contrario.

Para la base de reglas el nivel de cuantización elegido es de 3 particiones. Las diferentes etiquetas lingüísticas que operan en el universo de discurso de Epos se expresan como N [-0.1947 -0.2], ZE1 [-0.796 0.806] y P [0.2 1].

Las funciones de pertenencia de cada uno de los subconjuntos se presentan en [1].

Para obtener una fácil asociación con las etiquetas de la base de reglas se utilizan también tres etiquetas lingüísticas en la base de datos. El rango de la salida está contenido en el intervalo [-1, 1].

Para la lógica de decisión, las reglas que se utilizan para el SC2 son representadas por PD atómicas, esto hace que los procesos de implicaron e inferencia sean más sencillos:

If Epos is N0 then Vg is Ns (8)

If Epos is ZE0 then Vg is CEs (9)

If Epos is NP0 then Vg is Ps (10)

Los procesos lógicos difusos utilizados en el SC2 como la inferencia la fuzificacion y defuzzificacion son los mismos que para el SC1.

4. RESULTADOS

Para mostrar la efectividad del controlador difuso multivariable desacoplado, se presentan los siguientes esquemas que hacen referencia a cada una de las etapas del sistema de control.

Los bloques que contienen el AVR y el HTG (la turbina) son difusos, y actúan sobre el modelo que describe la máquina síncrona (el cual no requiere ser proporcionado), la turbina, el servomotor y las cargas utilizadas sirven para darle robustez al sistema y mostrar la operatividad del controlador difuso ante cambios en los puntos de operación del sistema.

Los esquemas que representan el AVR difuso que contiene el controlador SC1 y el HTG que contiene el controlador SC2, se muestran en las figura 3 y 4 respectivamente.

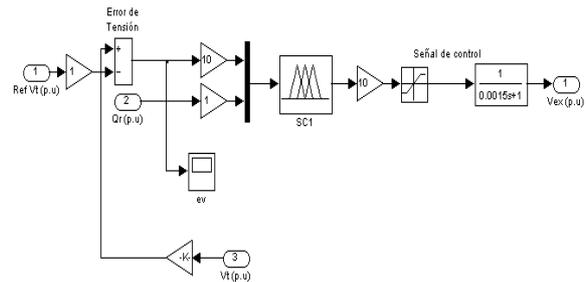


Figura 3. Esquema del AVR difuso que incluye el SC1.

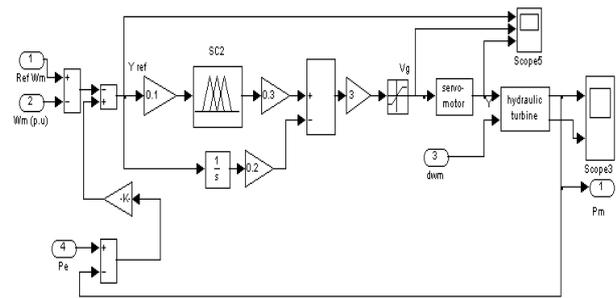


Figura 4. HTG difuso y turbina.

El bloque SC1 contiene las etiquetas lingüísticas anteriormente presentadas para la base de reglas y para la base de datos, además para la base de conocimiento se utilizo el conjunto de reglas contenidas en [1].

En el bloque SC2 se utilizaron las etiquetas lingüísticas antes mencionadas para la base de reglas y para la base

de datos, además para la base de conocimiento se utilizó el conjunto de reglas contenidas en [1].

Las pruebas realizadas permiten observar el comportamiento de la planta y la funcionalidad del controlador. En estas pruebas se hacen variaciones de carga resistiva, inductiva y capacitiva [11].

Para instantes de tiempo de 0, 10, 15 y 25 segundos, se hicieron perturbaciones en la carga de 1.0Kw, 1.5Kw, y 1.5Kw+5KVar. Las simulaciones muestran los resultados obtenidos para los controladores de frecuencia y tensión difusos.

Las referencias del voltaje en terminales y la frecuencia del sistema están dadas en 1p.u. y el tiempo de la simulación es de 50s.

Ante las pruebas realizadas, se observa en la figura 5 como la tensión en bornes de la máquina síncrona utilizando ambos sistemas de control reacciona adecuadamente y sostiene la referencia ante las variaciones de carga utilizadas en la simulación.

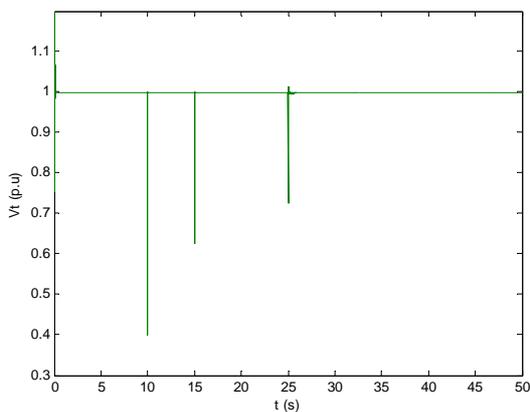


Figura 5. Vt utilizando el sistema de control SC1 y SC2.

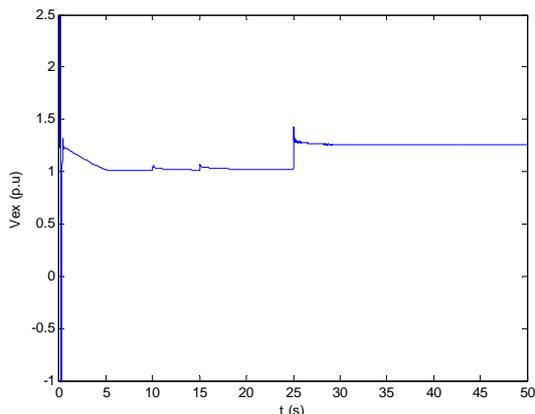


Figura 6. Vexc sobre que actual el sistema de control SC1.

El comportamiento del voltaje en la excitación es presentado en la grafica 6. Para cada uno de los casos de variación de carga, se puede observar que el esfuerzo en

la señal de control no es muy grande en comparación con el que se podría presentar empleando otros controladores convencionales (ver [1] para la comparación). Esto se debe a que el lazo del controlador SC2 (que no actúa sobre la excitación), está actuando indirectamente sobre el lazo de control de la excitación con el fin de darle más robustez al controlador. Se logro determinar que la magnitud del voltaje de la excitación está directamente relacionada con la base de reglas de SC1 y las oscilaciones presentes en la excitación están directamente relacionadas con la base de reglas de SC2.

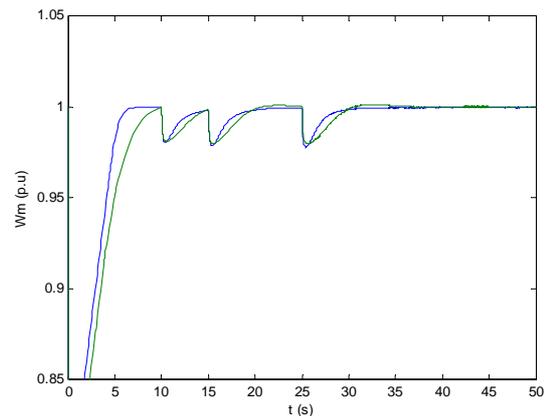


Figura 7. Wm utilizando el sistema de control SC2 (verde) y Wm utilizando SC1 y SC2 2 (azul).

En la figura 7 se presenta el comportamiento de la potencia mecánica en el eje de la máquina dadas las perturbaciones presentadas. La línea azul representa el comportamiento de la velocidad de la turbina empleando ambos sistemas de control. La línea verde representa el comportamiento de la velocidad de la turbina cuando se emplea solamente el controlador SC2 que actúa sobre el primomotor.

Se detalla que en el transitorio se presenta un envolvente en ambas señales debido a la carga inductiva. Esta situación no afecta significativamente el desempeño de los controladores porque la velocidad de rotación solo se afecta significativamente con la variación de la potencia activa que se le exige a la máquina síncrona. Si bien existe un transitorio, el sistema logra garantizar una frecuencia constante de operación.

5. CONCLUSIONES

En el caso de un aumento de carga en terminales de la máquina, el control desacoplado proveen una señal de control que permite tener un transitorio (de aproximadamente 14ms para las pruebas aquí realizadas).

Durante el transitorio se presenta una caída en el voltaje que resulta despreciable ya que su duración es del orden de 200µs. Sin la presencia de un control de tensión no se podría mantener la referencia de tensión escogida.

Mediante el análisis de las simulaciones se concluye que la respuesta de los controladores difusos es satisfactoria para los lazos de tensión y frecuencia ante las perturbaciones de carga realizadas. Si bien la complejidad del controlador desacoplado es mucho mayor a la de un solo controlador difuso, el control desacoplado garantiza más robustez en la respuesta del sistema ante las perturbaciones en terminales de la máquina.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] K. Guerra, G, Osorio, “La lógica difusa aplicada al control de la máquina síncrona”, disertación de pregrado, Programa de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, Marzo 2009.
- [2] M. T. Tham, “Multivariable control: An introduction to decoupling control”, University of Newcastle, July 1999.
- [3] J.J. Slotine Jean, W. LI, “Applied Nonlinear Control”, Prentice Hall, New Jersey 1991.
- [4] V. Zoran, “Nonlinear Control Systems”, Control Engineer Series, Marcel Dekker, inc., New York, 2003.
- [5] L. X. Wang, “A course in Fuzzy Systems and Control”, Prentice Hall, New York 1997.
- [6] A. Alzate, “Control Difuso”, Maestría en Ingeniería Eléctrica. Universidad Tecnológica de Pereira, 1998.
- [7] J. Jantzen, “Design of fuzzy controllers”, Technical University of Denmark, department of automation, lyngby Denmark, technical report no 98-E 864, 1998.
- [8] K. M., Passino, S., Yurkovich, “Fuzzy control”, Addison and Wesley Longman Inc, EEUU, 1998.
- [9] B. K. Bose, “Expert system, fuzzy logic, and neural network applications in power electronics and motion control”. Proceedings of the IEEE, Vol 82 No 8, pág. 1303-1322, Agosto de 1994.
- [10] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, S. D. Umans, “Máquinas eléctricas”. Mc. Graw Hill, 2004.
- [11] C. M. Ong, “Dinamic simulation of electrical machinery using matlab/simulink”. Ed. Prentice Hall, 1998.