

CONTROL DE UN STATCOM POR MEDIO DE UN SISTEMA ANFIS

RESUMEN

En este artículo un sistema de inferencia neuro-difuso adaptivo (ANFIS) es utilizado en la estrategia de control de un STATCOM de seis pulsos conectado a un sistema de potencia. Los resultados son comparados con los que se obtienen al aplicar un control difuso y un control clásico tipo PI. Esta implementación se realizó mediante la utilización de los paquetes MATLAB y PSCAD/EMTDC.

PALABRAS CLAVES: STATCOM, ANFIS, PSCAD/EMTDC.

ABSTRACT

In this paper an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) is used to control a six pulse STATCOM connected to an electric power system. Results are compared with those obtained when a fuzzy control and a classic PI controllers are applied. The simulation was made with MATLAB and PSCAD/EMTDC software.

KEYWORDS: STATCOM, ANFIS, PSCAD/EMTDC.

1. INTRODUCCIÓN

La compensación de potencia reactiva y el soporte en la regulación de voltaje son aspectos muy importantes dentro de la operación y control de los sistemas eléctricos de potencia y ahora lo están siendo aún más debido a las exigencias en calidad de energía que está siendo requerida por parte de los usuarios.

El compensador estático síncrono o STATCOM (STATIC Synchronous COMPensator), como parte de los sistemas FACTS, es un dispositivo que se ha venido perfilando como una alternativa de solución a estos problemas [9,12,13] e incluso se plantea como una solución con ciertas ventajas sobre su predecesor el SVC [4,11].

En la figura 1 se observa la configuración básica de un STATCOM conectado al sistema eléctrico de potencia.

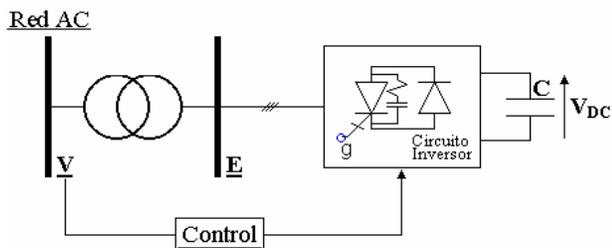


Figura 1. Conexión de un STATCOM al barraje del sistema CA.

Sistema de control: En este caso el sistema de control permite que el STATCOM opere como un dispositivo encargado de compensar reactivos y capaz de mantener el voltaje del barraje al cual se encuentra conectado a la red en un valor específico a través del control del ángulo de

ALFONSO ALZATE G.

Profesor Titular.
Programa en Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira
alazate@utp.edu.co

DAVID A. MANCERA CÁRDENAS

Ingeniero Electricista
Programa en Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira
damc@ohm.utp.edu.co

Grupo de Investigación: Electrónica de potencia

desfase (α) que se produce entre las tensiones (E) del STATCOM y (V) del sistema en AC.

Debido a que los STATCOM son sistemas inherentemente no lineales, en la práctica y en muchas de las aplicaciones de este tipo de sistemas se utilizan esquemas de control lineal debido a su simplicidad en la estructura comparados con los sistemas de control del tipo no lineal. Sin embargo, es bien reconocido que este tipo de controladores aunque provee resultados satisfactorios [13] no puede operar en forma robusta cuando el sistema de potencia está sujeto a variaciones en su estado de operación o en sus condiciones de control [4].

En la mayoría de los casos, cuando se usan esquemas de control clásicos el diseño de un controlador para un STATCOM requiere un modelo analítico válido del sistema [11], el cual puede ser no necesario cuando es utilizado para estos casos un controlador basado en sistemas difusos [1].

En los sistemas difusos, la forma de las funciones de pertenencia depende de sus parámetros (centros y anchos) y cambiando estos parámetros se ajustan los parámetros del controlador. A través de la utilización de un sistema ANFIS es posible escoger estos parámetros automáticamente a partir de datos de entrenamiento (entrada-salida).

En este artículo se propone un método de control basado en un sistema de inferencia neuro-difuso adaptivo (ANFIS, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems) el cual es un tipo de red adaptiva que es funcionalmente equivalente a un sistema de inferencia difuso [5].

Los resultados mostrados en este artículo fueron obtenidos a partir de simulaciones realizadas en el

PSCAD/EMTDC y una combinación de este con el MATLAB a través de su interfaz [6], además dichos resultados son comparados con los obtenidos cuando el sistema opera bajo un controlador difuso y un controlador clásico tipo PI.

2. FUNCIONAMIENTO DEL STATCOM

Considerando la expresión general del flujo de potencia aparente entre terminales de la red y el STATCOM se tiene:

$$S = \frac{V \cdot E}{x_L} \sin(\alpha) - j \left(\frac{V \cdot E}{x_L} \cos(\alpha) - \frac{V^2}{x_L} \right)$$

De donde se puede obtener las ecuaciones para el flujo de potencia activa y reactiva como:

$$P = \frac{V \cdot E}{x_L} \sin(\alpha)$$

$$Q = \frac{V \cdot E}{x_L} \cos(\alpha) - \frac{V^2}{x_L}$$

Donde: x_L representa la reactancia de dispersión del transformador a través del cual se acopla el STATCOM a la red y α representa el ángulo de desfase entre las tensiones de la red (V) y la del STATCOM (E).

Así, introduciendo pequeños desfases, α en la señal de sincronismo de las tensiones de red con la del STATCOM se altera la tensión del condensador DC y, por lo tanto se altera la amplitud de la tensión AC del propio STATCOM y de este modo se realiza un control de potencia reactiva. O dicho de otra forma, al controlar el ángulo de fase α del voltaje a la salida del inversor con respecto al de fase en la red a la que está conectado, se puede controlar el voltaje del condensador V_{DC} y la componente fundamental del voltaje a la salida del STATCOM y de esta forma controlar la potencia reactiva.

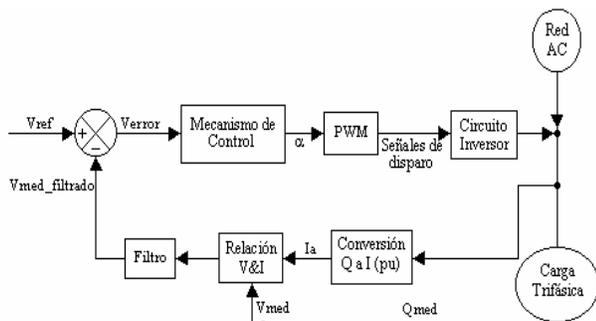


Figura 2. Diagrama de bloques del sistema de control.

En la figura 2 se muestra el diagrama de bloques para el sistema de control de fase utilizado en este trabajo.

Para el sistema de control se pueden adoptar diferentes estrategias tal como se plantea en diferentes trabajos desarrollados [11,12]. En este artículo, la aplicación se basa en la teoría del delta del error de voltaje y la curva característica del STATCOM [10] donde la variable de salida α representa el requerimiento entre el voltaje del sistema y el voltaje del STATCOM.

Adicional a este mecanismo de control y para que el funcionamiento del STATCOM sea adecuado es necesario contar con un sistema PWM (Pulse Width Modulation) a partir del cual generar las señales de disparo de los dispositivos de conmutación en el inversor y un PLL (Phase Locked Loop) mediante el cual se mantenga el sincronismo entre las tensiones del sistema (secuencia positiva) y las generadas por el inversor. El modelo y forma de control de estos dispositivos no será tratado en este artículo.

3. MECANISMO DE CONTROL PROPUESTO

El ANFIS es una arquitectura utilizada comúnmente en sistemas de identificación y control, que partiendo de las mediciones de entrada y salida del proceso elabora un sistema de inferencia difusa sobre la base de una red adaptativa neuro difusa. El ANFIS como toda red adaptativa utiliza un procedimiento de aprendizaje para el cual existen dos alternativas [1]. En estas alternativas pueden ser aplicados métodos de aprendizaje basados en mínimos cuadrados o el gradiente.

La figura 3 muestra la arquitectura de un sistema ANFIS.

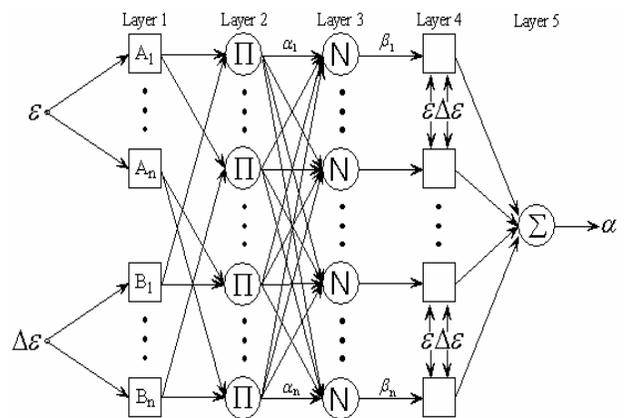


Figura 3. Arquitectura de un sistema ANFIS.

En [1,5] se explica con detalle la función de cada capa y los algoritmos de aprendizaje.

4. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

El sistema general simulado al cual se encuentra conectado el STATCOM lo conforma una fuente de alimentación trifásica que opera a 115 kV y 60 Hz la cual alimenta una carga trifásica balanceada de 88 MVA con factor de potencia 0.906 en adelanto. El STATCOM de seis pulsos es conectado al sistema a través de un transformador trifásico de 100 MVA, relación 115 kV – 25 kV en configuración Y - Δ, $X_t = 0.1 pu$ y pérdidas despreciables en los devanados. El condensador en el lado DC del circuito inversor tiene un valor de 300 μF y los dispositivos de conmutación utilizados por el circuito inversor del STATCOM son GTOs con red snubber de 5 kΩ y 0.05 μF.

En la figura 4 se muestra el sistema de potencia estudiado.

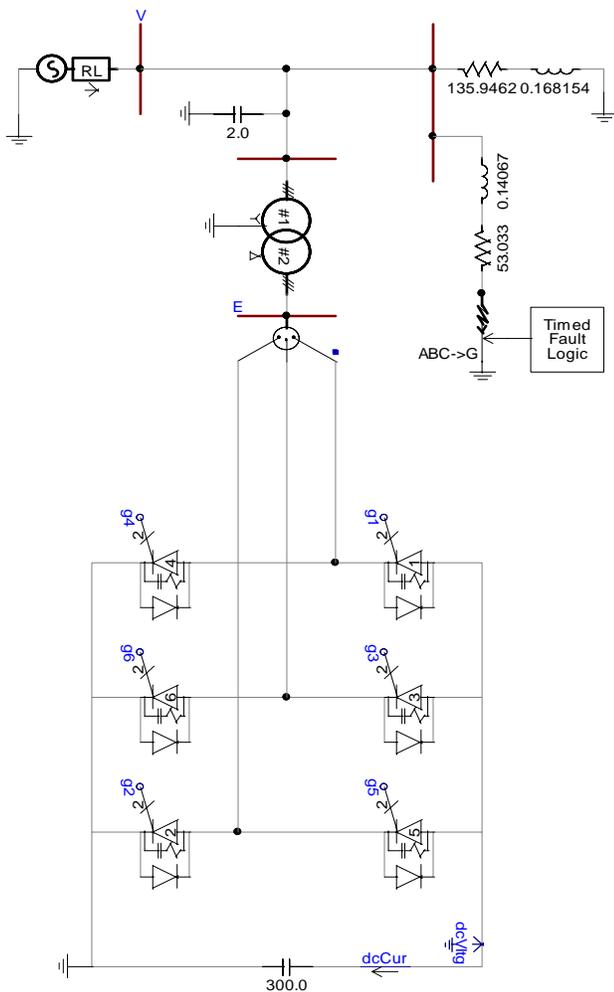


Figura 4. Sistema de potencia simulado.

Para probar el sistema bajo condiciones de operación distintas a la normal en estado estacionario se simula un fallo trifásico a tierra en la carga con el cual se hace evidente la necesidad de compensación de reactivos y de

soporte en la regulación de tensión. Además también se generan perturbaciones como cambios en el sistema de referencia de tensión.

La tabla 1 muestra la secuencia de eventos realizados durante la simulación.

Tiempo	Evento
0.0 s	Inicio de la simulación
0.1 s	Partida del STATCOM
1.5 s	Fallo trifásico a tierra
2.25 s	Liberación del fallo
4.0 s	Variación de la referencia de voltaje en un 10% (0.1 pu) positivo
5.0 s	Variación de la referencia de voltaje en un 10% (0.1 pu) negativo, a partir del valor anterior.
6.0 s	Fin de la simulación

Tabla 1. Secuencia de eventos durante la simulación.

4.1 Sistema de potencia sin STATCOM

En condiciones normales y sin presencia del STATCOM el valor del voltaje en el barraje al cual se encuentra conectada la carga es de 0.78 pu. Se puede observar en el instante del fallo el efecto sobre la regulación de voltaje con una disminución considerable en el voltaje del barraje de alimentación a 0.61 pu, lo cual equivale a un decremento del 21.79%, además también se observa como la fuente debe aumentar su potencia activa de 0.49 pu a 0.75 pu y la reactiva de 0.228 pu a 0.596 pu, lo cual equivale a un incremento en reactivos del 161.4%.

4.2 STATCOM operando bajo un Control PI

En la figura 5 se muestra la respuesta obtenida cuando el sistema se encuentra en presencia del STATCOM trabajando con una acción de control tipo PI.

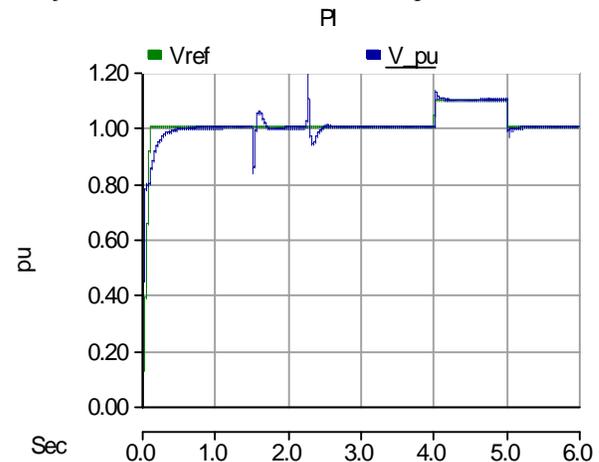


Figura 5. Respuesta del sistema bajo una estrategia de control PI.

Este resultado se obtuvo con valores en las ganancias de los parámetros del controlador de 1.08 y 0.1.

4.2 STATCOM operando con un Control Difuso

El controlador difuso utilizado en este caso es del tipo Mamdani de nueve reglas con funciones de pertenencia de tipo triangular uniformemente espaciadas. Se definen como variables de entrada del controlador el error de voltaje (ϵ) y la derivada del error ($\Delta\epsilon$) y como variable de salida (u) el ángulo α , que representa el desfase entre el voltaje del sistema y el voltaje de salida del STATCOM. Para la obtención de este sistema difuso fue utilizado un método heurístico.

La tabla 2. muestra la base de reglas utilizada para este controlador.

		$\Delta\epsilon$		
		<i>NG</i>	<i>S</i>	<i>PG</i>
ϵ	<i>PG</i>	<i>PG</i>	<i>PG</i>	<i>PG</i>
	<i>S</i>	<i>S</i>	<i>S</i>	<i>S</i>
	<i>NG</i>	<i>NG</i>	<i>NG</i>	<i>NG</i>

Tabla 2. Base de Reglas Difusas.

En la figura 6 se muestra la respuesta obtenida cuando el sistema se encuentra en presencia del STATCOM trabajando con una acción de control difusa.

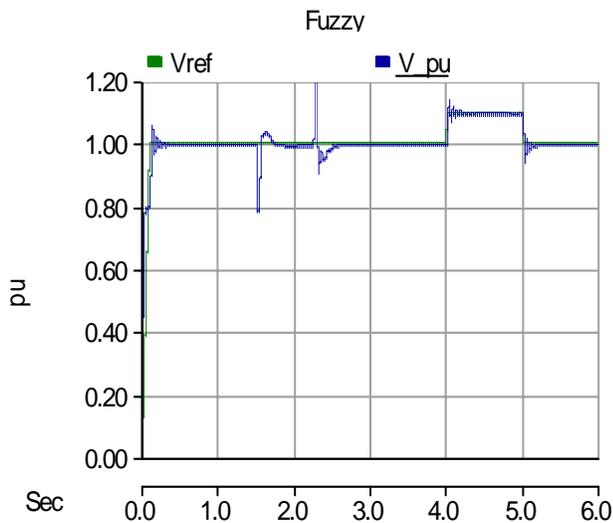


Figura 6. Respuesta del sistema bajo una estrategia de control difuso.

A continuación se propone un sistema ANFIS para la optimización de los parámetros de las funciones de pertenencia del controlador difuso con un número mayor de reglas y con funciones de pertenencia de tipo campana de gauss.

4.3 STATCOM operando bajo la acción de control basada en un sistema ANFIS

Esta aplicación se realizó con la ayuda del MATLAB Fuzzy Logic Toolbox y en especial de sus funciones *anfis* y *genfis1* [7]. El sistema fue entrenado con datos obtenidos cuando el sistema operaba bajo las acciones de control PI y fuzzy, estos datos se obtuvieron con la ayuda que brinda el EMTDC a través de sus *output files* los cuales son archivos de texto organizados por columnas que exceptuando la primera (siempre es el tiempo) representan los datos grabados de los respectivos canales de salida existentes dentro del proyecto. Posteriormente y utilizando la función *anfis* se construyó un sistema de inferencia donde los parámetros de las funciones de pertenencia fueron sintonizados a través de un algoritmo de aprendizaje híbrido el cual es una combinación de los métodos de mínimos cuadrados y propagación hacia atrás. El sistema de inferencia obtenido está compuesto por veinticinco reglas con funciones de pertenencia tipo campana de gauss.

La respuesta del sistema sometido a las perturbaciones de la tabla 1 se muestra en la figura 7.

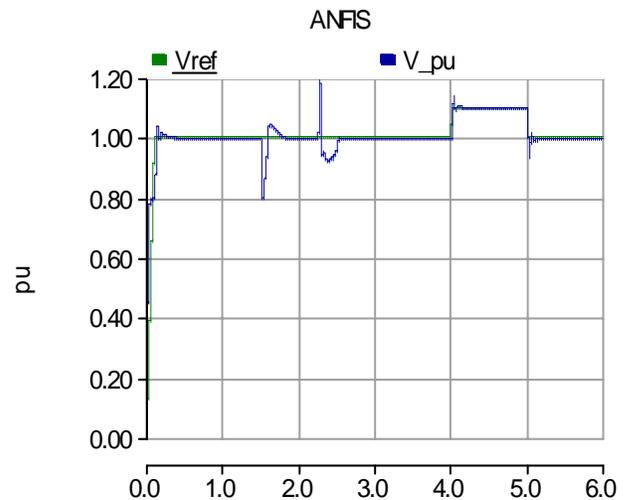


Figura 7. Respuesta del sistema bajo una estrategia de control utilizando un sistema ANFIS.

El STATCOM incrementa su generación de potencia reactiva en un 144.63% al momento del fallo y en un 61.37% cuando el voltaje de referencia cambia en un 10% (0.1 pu). Los valores de potencia activa oscilan entre -0.2 MW y -1.66 MW en estado estacionario y entre -1.29 MW y -3.37 MW durante el fallo a fin de compensar las pérdidas generadas debido a su funcionamiento. Se observó también que la oscilación de potencia reactiva en estado estacionario es menor cuando el STATCOM opera bajo la acción de control difuso o el sistema ANFIS comparandola cuando opera bajo la acción de control PI.

En estado estacionario el valor del ángulo de desfase α varía entre 0.32 grados y 0.4 grados; durante el fallo este se incrementa a valores positivos entre 0.46 grados y 0.53 grados. Además se observa que el mayor valor para este ángulo correspondiente a -16.46 grados se presenta cuando se libera el fallo. Se observa también como el voltaje V_{DC} que corresponde al voltaje del condensador en el lado DC del STATCOM varía entre 43.5 kV y 44.9 kV en estado estacionario, 48.84 kV y 52.23 kV durante el fallo y entre 49 kV y 51.15 kV cuando es aumentado en un 10% (0.1 pu) el voltaje de referencia. El mayor valor que alcanza este voltaje es de 67.1 kV que se observa después que es liberado el fallo.

En la figura 8 se muestra la relación entre la potencia reactiva suministrada por el STATCOM y por la fuente de alimentación trifásica.

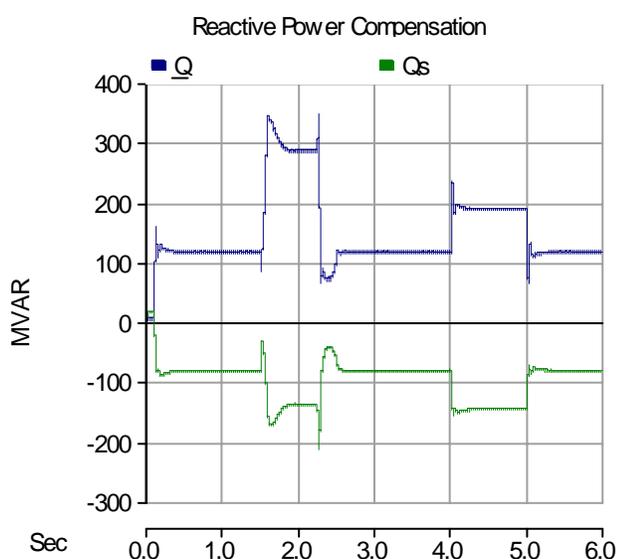


Figura 8. Relación entre la potencia reactiva suministrada por la fuente y el STATCOM.

A continuación, en la tabla 3 se muestra un análisis cuantitativo realizado de forma comparativa para los valores más representativos de las respuestas obtenidas bajo cada uno de los mecanismos de control mostrados anteriormente.

5. CONCLUSIONES

Se observó como el STATCOM brinda soporte en la regulación de tensión y en la compensación de reactivos, contribuyendo de esta forma a mejorar el comportamiento dinámico del sistema de potencia dentro del cual se encuentre.

Los resultados obtenidos muestran la eficiencia, validez y robustez del método de control propuesto en este artículo

Parámetro	Control PI	Control Difuso	ANFIS
Tiempo de establecimiento inicial	0.7 s	0.4 s	0.27 s
Máximo sobreimpulso inicial	0 %	5.59 %	3.9%
Error de estado estacionario	± 0.1 %	0.43 %	0.25%
Tiempo de establecimiento cuando ocurre el fallo	0.56 s	0.326 s	0.24 s
Máximo sobreimpulso cuando ocurre el fallo	17 %	22 %	20%
Tiempo de establecimiento después del fallo	0.58 s	0.4 s	0.25 s
Máximo sobreimpulso después del fallo	19.68 %	28.5 %	20%
Tiempo de establecimiento después de incrementar el valor del voltaje de referencia 10%	0.25 s	0.27 s	0.042 s
Máximo sobreimpulso al incrementar el valor del voltaje de referencia 10%	3.2 %	4.91 %	3.9%
Tiempo de establecimiento después de reducir el valor del voltaje de referencia 10%	0.19 s	0.26 s	0.092 s
Máximo sobreimpulso al reducir el valor del voltaje de referencia 10%	3.16 %	6 %	6.4%

Tabla 3. Análisis comparativo de las respuestas obtenidas bajo las diferentes acciones de control mostradas.

Inicialmente, el tiempo de respuesta del sistema es menor cuando este funciona bajo el control difuso comparado al obtenido bajo el control PI. En estado estacionario la respuesta obtenida con el control PI muestra un mejor desempeño en cuanto el error es menor, no obstante se observa un rizado más pronunciado alrededor del valor de referencia. Al ser incorporado el sistema ANFIS en el control del STATCOM este mejora notablemente su desempeño en el estado transitorio comparándolo con el obtenido bajo el control difuso al obtenerse una respuesta más suave, con un tiempo de respuesta y un sobrepasso menor. En el estado estacionario se obtiene una respuesta con un error menor y un rizado menos pronunciado que el mostrado con el control PI. Por lo tanto se puede decir que cuando se implementa el sistema de control para el STATCOM utilizando un sistema ANFIS la respuesta del sistema se comporta de manera más satisfactoria comparándola con las respuestas obtenidas bajo el control PI y el control difuso.

El tiempo computacional requerido para las simulaciones cuando se realiza la interfaz entre el PSCAD/EMTDC y el MATLAB es mayor, pero esto se compensa al poder aprovechar las ventajas que ambos paquetes brindan por separado.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ALZATE G., Alfonso. Control difuso. Pereira : Universidad Tecnológica de Pereira, 2001.
- [2] ALZATE G. Alfonso, Mancera C. David. Fuzzy Control Applied in a STATCOM. IASTED International Conference on Modelling and Simulation (MS 2005), Cancún, México, Mayo 2005. Approved.
- [3] ESCOBAR, G.; STANKOVIC, A. M. and MATTAVELLI, P. Reactive Power and Unbalanced Compensation using STATCOM with Dissipativity-Based Control. En: IEEE : Transactions on Control System Technology. Vol. 9, No. 5, sep. 2001.
- [4] HONGESOMBUT. Komsan; MITANI, Yasunori and TSUJI, Kiichiro. Fuzzy Logic Controller Based on Observed Signals and a Genetic Algorithm Application with STATCOM for Power System Stabilization. IEEJ : Transactions on Power and Energy. Vol. 123, No 5, may. 2003.
- [5] JANG Jyh-Shing Roger, SUN Chuen-Tsai and MIZUTANI Eiji. Neuro – Fuzzy and Soft Computing. Prentice Hall, 1997.
- [6] MANITOBA HVDC Research. PSCAD/EMTDC User's Guide. 2004.
- [7] MATLAB Fuzzy Logic Toolbox.
- [8] MOHAGHEGHI S, PARK Jung-Wook, HARLEY RG, VENAYAGAMOORTHY GK, CROW ML. An Adaptive Neural Network Identifier for Effective Control of a Static Compensator Connected to a Power System. INNS-IEEE International Joint Conference on Neural Networks, Portland, OR, USA, July 20 -24, 2003.
- [9] MOURENTE Miguel, Jaime; HENRIQUES, L. O. A. P. ; AREDES, M. ; WATANABE, E. H. Simulação de um Compensador Síncrono Estático de Potência. CBA 2000 - XIII Congresso Brasileiro de Automática, 2000, Florianópolis. Anais do CBA 2000. Florianópolis : SBA, 2000.
- [10] SOO-Young Jung, TAE-Hyun Kim, SEUNG-II Moon y BYUNG-Moon Han. Analysis and Control of DSTATCOM for a Line Voltage Regulation. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 2002, Vol.2, No.0, April 2002.
- [11] SOTO, D., PEÑA, R. S. y CASTRO, G. Desarrollo de una Estrategia de Control Lineal para STATCOM Multipulsos. XIV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA. Antofagasta : Universidad de Antofagasta, 2001.
- [12] SOTO Diego y PEÑA Rubén. Nonlinear Control Strategies for Cascaded Multilevel STATCOMs. IEEE: Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 4, Oct 2004.
- [13] RAO Pranesh, CROW M.L. y YANG Zhiping. STATCOM Control for Power System Voltage Control Applications. IEEE: Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 4, Oct. 2000.