

APLICACIÓN DEL CONTROL DIFUSO EN UN STATCOM

RESUMEN

En este artículo se muestra la aplicación del Control Difuso en la operación de un STATCOM de seis pulsos conectado a un sistema de potencia. El sistema de control es puesto a prueba cuando el STATCOM es sometido a perturbaciones externas representadas por un fallo trifásico a tierra ocurrido en la carga y cambios en el valor del voltaje de referencia. Se comprobó el método propuesto mediante la simulación en el paquete PSCAD/EMTDC.

PALABRAS CLAVES: STATCOM, control difuso.

ABSTRACT

This paper shows fuzzy control application to operate a six pulse STATCOM connected to a electric power system. The control proposed is verified when the STATCOM supports external perturbations such as three-phase fault at the load and changes in the reference voltage. The proposed method was verified simulating the systems in the PSCAD/EMTDC package.

KEYWORDS: STATCOM, fuzzy control.

1. INTRODUCCIÓN

La compensación de potencia reactiva y el soporte en la regulación de tensión son asuntos muy importantes dentro de la operación y control de los sistemas eléctricos de potencia.

El compensador estático síncrono o STATCOM (STATic Synchronous COMpensator) como parte de los sistemas FACTS es un dispositivo que se ha venido planteando como una alternativa de solución a estos problemas.

Los STATCOM son dispositivos altamente no lineales, al igual que el resto del sistema al cual están conectados. Los esquemas de control no lineal tienen una estructura más sofisticada y son más difíciles de diseñar e implementar comparados con los sistemas de control del tipo lineal.

La lógica difusa, por su parte proporciona un medio para enfrentar situaciones del mundo real, complejas y dinámicas, que son planteadas más fácilmente mediante palabras del lenguaje común que por modelos matemáticos y como se muestra con este artículo, posee una gran aplicabilidad en este tipo de sistemas no lineales.

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

A continuación se describen brevemente cada una de las partes integrantes del STATCOM:

Inversor: Los Inversores son un conjunto de elementos constituidos principalmente por dispositivos electrónicos de potencia como GTOs e IGBTs, con capacidad de corte

ALFONSO ALZATE

Profesor Titular
Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira
alalzate@utp.edu.co

DAVID MANCERA

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

Grupo de investigación en Electrónica de Potencia

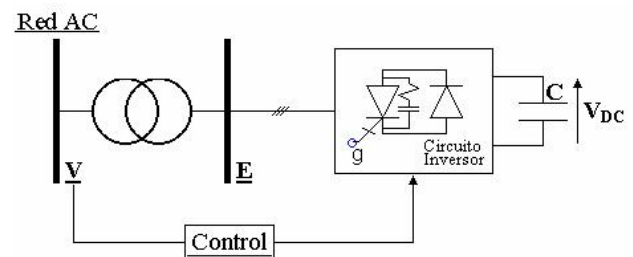


Figura 1. Conexión de un STATCOM al barraje del sistema AC.

y conducción. Su función en el STATCOM es la de generar la tensión AC a partir de la tensión DC en los terminales del condensador.

Condensador del lado DC: La principal función del condensador del lado DC en el STATCOM es servir de fuente de tensión continua; además el condensador en el lado DC sirve como acumulador temporal de energía permitiendo el intercambio entre el sistema eléctrico y el STATCOM.

Transformador: En el STATCOM los transformadores son utilizados para dos funciones principales. Acople con el sistema eléctrico adecuando las tensiones de operación de los equipos y adecuando la tensión de los inversores con la red. Además con ciertas configuraciones especiales [2] el transformador elimina algunos de los armónicos generados por los inversores reduciendo el contenido armónico insertado en la red eléctrica. También es posible utilizar el transformador para realizar estructuras de bloqueo de secuencia cero, en el caso de que esta exista, y servir como elemento de amortiguamiento de transitorios.

Sistema de control: Permite que el STATCOM cumpla correctamente su función como elemento compensador de reactivos a través del control del ángulo de desfase (α) que se produce entre las tensiones (E) del STATCOM y (V) del sistema en AC.

2. CONTROL DIFUSO

La lógica difusa proporciona un medio para enfrentar situaciones del mundo real, complejas y dinámicas, que son más fácilmente caracterizadas por palabras que por modelos matemáticos.

En esencia un controlador difuso contiene un algoritmo capaz de convertir una estrategia de control lingüística en una de control automático, con lo que se busca imitar el razonamiento humano.

El algoritmo de control se da como un conjunto de expresiones del tipo:

Si <Condiciones> Entonces <Acciones>

En la figura 2 se muestra la arquitectura básica de un controlador difuso.

3. CONTROL DEL STATCOM

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.

3.1 Mecanismo de control

Para el sistema de control se pueden adoptar diferentes estrategias de control como se observa en diferentes trabajos desarrollados [4,7]. En este artículo, la aplicación se basa en la teoría del delta del error de voltaje y la curva característica del STATCOM donde la variable de salida α representa el requerimiento entre el voltaje del sistema y el voltaje del STATCOM.

En la figura 3 se muestra el diagrama de bloques para el sistema de control de fase.

En la mayoría de los artículos en años recientes, han sido utilizadas técnicas de control lineal para modelar los STATCOM y consecuentemente para diseñar sus

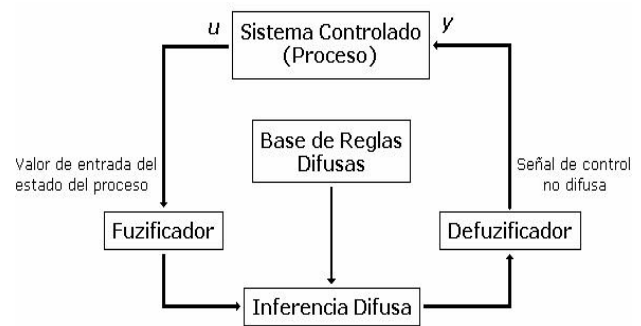


Figura 2. Configuración básica de un control difuso.

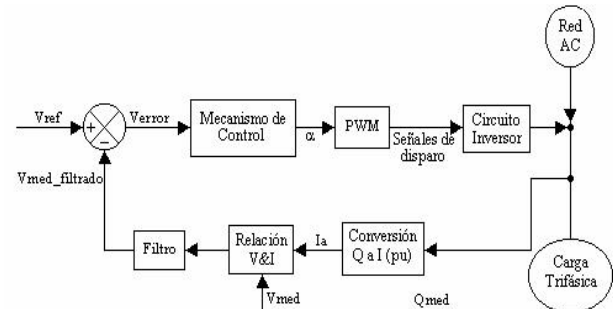


Figura 3. Diagrama de bloques del sistema de control.

controladores. En tales aproximaciones el sistema de ecuaciones es lineal y se sintonizan los controladores basados en un modelo linealizado.

El control difuso por lo tanto puede ser una buena solución debido a su buena capacidad de desempeño en modelos no lineales y a su estructura, que aunque sofisticada puede llegar a ser mucho más fácil de implementar que muchos otros tipos de estrategias de control basadas en modelos no lineales.

4. IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL DIFUSO PARA UN EL STATCOM

El paquete de simulación PSCAD/EMTDC brinda al usuario la posibilidad de crear nuevas componentes, introduciendo su propia pieza de código en el algoritmo del programa principal [6]. En muchos casos, este código representa modelos de componentes las cuales son diseñadas y creadas dependiendo de las necesidades del usuario y que no se encuentran disponibles en la librería principal.

En este caso, el control difuso se implemento creando una nueva componente dentro del PSCAD/EMTDC para tal fin. Esta nueva componente representa el modelo del control difuso y su código está escrito en una combinación de lenguaje standard de fortran y PSCAD script.

Se definen como variables de entrada del control difuso el error de voltaje (ε) y la derivada del error ($\Delta\varepsilon$) 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.

$$\varepsilon = V_{Ref} - V_{pu} \quad (1)$$

Se establecen los valores máximos de operación y entre estos rangos se establecen los límites de los universos de discurso de cada variable.

$$Univ\text{erso de discurso de } \varepsilon = [-rme, +rme] \quad (2)$$

$$Univ\text{erso de discurso de } \Delta\varepsilon = [-rmde, +rmde] \quad (3)$$

$$Univ\text{erso de discurso de } u = [-rmu, +rmu] \quad (4)$$

Cada variable de entrada y salida es descompuesta en un grupo de términos difusos, donde cada uno de ellos representa un conjunto difuso en el universo de discurso de la variable. En este caso cada variable es descompuesta en tres conjuntos difusos cada una:

- NG = Negativo Grande
- S = Pequeño
- PG = Positivo Grande

4.1 Fuzificación

Las señales de entrada al fuzificador se adecuan primero a través de las constantes Ke y Kde. Estas constantes permiten la normalización de los universos de discurso de estas variables dentro del intervalo [-1, 1]. Al ser normalizados los valores de entrada en este intervalo, la señal entregada posteriormente por el defuzificador también será una señal con valores normalizados, por lo tanto es necesario adecuarla a un valor no normalizado antes de ser entregada como señal de control a la planta. Esto se hace multiplicando la señal de control normalizada por una constante Ku. Los valores iniciales de Ke, Kde y Ku se hallan con los valores de los rangos máximos de las señales de entrada y salida del controlador.

En la figura 4 se muestra la implementación y adecuación del controlador difuso dentro del ambiente del PSCAD.

Cada valor de entrada del error y la derivada del error presenta un grado de pertenencia con dos conjuntos difusos como se muestra en la figura 5. El fuzificador debe identificar en todo instante a que conjuntos pertenece cada valor y cual es su valor de pertenencia $\mu(x)$ [1]. La fuzificación se efectúa por separado para cada una de las variables de entrada.

4.2 Inferencia Difusa

En este caso el mecanismo de inferencia difusa escogido es de tipo Mamdani [1], por ser uno de los más adecuados y comunes en aplicaciones de sistemas de

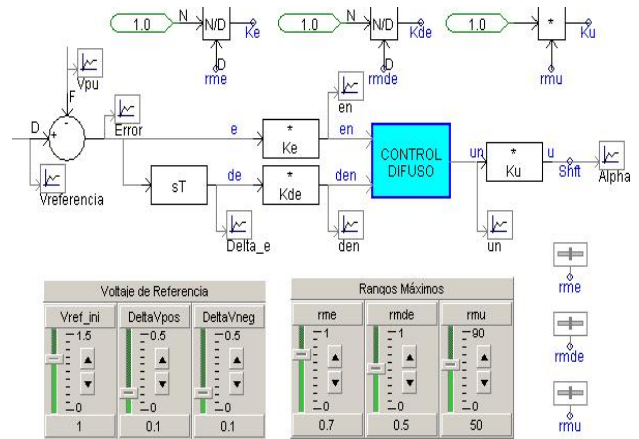


Figura 4. Control Difuso implementado dentro del ambiente del PSCAD.

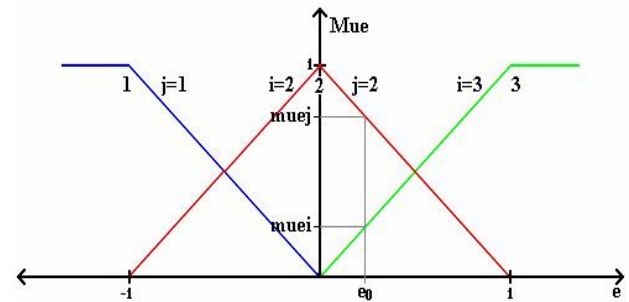


Figura 5. Fuzificación del error.

control con lógica difusa. Se utiliza el operador min para los operadores con norma t y max para los operadores con norma s.

4.3 Base de Reglas Difusas

La base de reglas difusas derivada para esta aplicación se obtuvo mediante la aplicación de un método heurístico. Después de observar y analizar el comportamiento del STATCOM bajo una acción de control clásico tipo PI se dedujo la relación (de tipo if - then) que debía existir entre las entradas al controlador difuso (e y de) y la señal de control (u). Estas relaciones se resumen en la tabla 1.

		$\Delta\varepsilon$		
		NG	S	PG
ε	PG	PG	PG	PG
	S	S	S	S
	NG	NG	NG	NG

Tabla 1. Base de Reglas Difusas.

En la figura 6 se muestra un ejemplo de cómo funciona el sistema de inferencia difusa y la base de reglas para dos valores de entrada cualquiera, error y la derivada del error, e_0 y de_0 respectivamente.

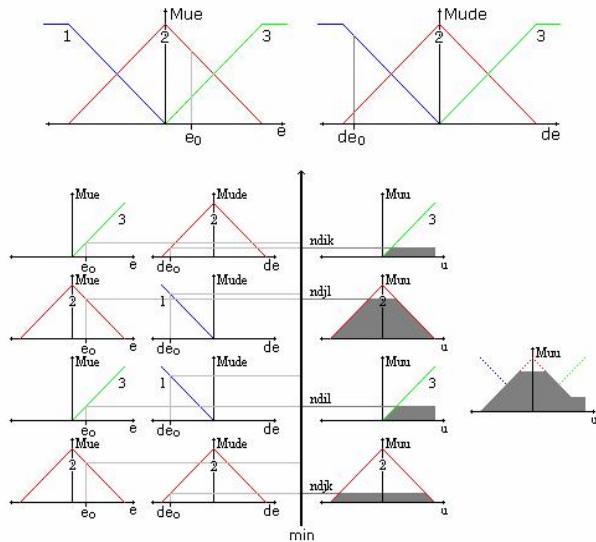


Figura 6. Sistema de inferencia difusa para dos valores de entrada cualquiera del error y la derivada del error.

4.4 Defuzificación

En la etapa de defuzificación se utilizó el método del centro de gravedad [1] para obtener el valor de la salida de control no difusa por su eficacia y sencillez computacional de los métodos de defuzificación. Su representación (y^*) está dada por:

$$y^* = \frac{\sum \Delta S_i y_i}{\sum \Delta S_i} \quad (5)$$

Donde ΔS_i representa el área de la salida de control difusa sugerida por cada una de las metareglas y y_i la ubicación de su respectivo centroide.

5. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones efectuadas bajo el software PSCAD/EMTDC V. 3.0.7 para probar la operación de la estrategia de control propuesta.

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 , $X_t = 0.1\text{pu}$ 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 $\text{k}\Omega$ y 0.05 μF .

Para probar el sistema bajo condiciones de operación distintas a la de régimen permanente 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 la referencia del sistema.

La tabla 2 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 2. Secuencia de eventos durante la simulación.

En la figura 7 se observan las características de los principales parámetros en consideración, como son el voltaje de alimentación de la carga y la potencia activa y reactiva suministradas por la fuente durante el fallo sin presencia del STATCOM.

En esta figura se puede observar el efecto que tiene el fallo sobre la regulación de tensión y la compensación de reactivos.

Se puede observar en el instante del fallo ($t = 1.5$ s) el efecto sobre la regulación de voltaje con una disminución considerable en el voltaje del barraje de alimentación de 0.78 pu a 0.61 pu, lo cual equivale a un decremento del 21.79% en el voltaje, además también se observa como la fuente tiene que aumentar su generación de potencia activa de 0.49 pu a 0.75 pu y reactiva de 0.228 pu a 0.596 pu lo cual equivale a un incremento en reactivos del 161.4%.

En la figura 8 se muestra la respuesta obtenida cuando el sistema se encuentra en presencia del STATCOM trabajando con una acción de control tipo PI.

El tiempo de establecimiento inicial es alcanzado por el sistema en $t = 0.7$ s aproximadamente sin presencia de sobrepulsos. Al alcanzar el estado estacionario se puede observar un muy pequeño (0.22%) pero constante rizado. Cuando se presenta el fallo, el tiempo de respuesta

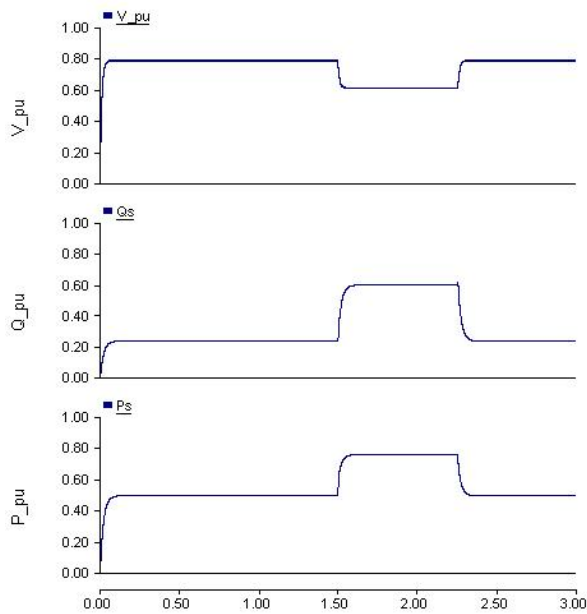


Figura 7. Respuesta del sistema sin presencia del STATCOM.

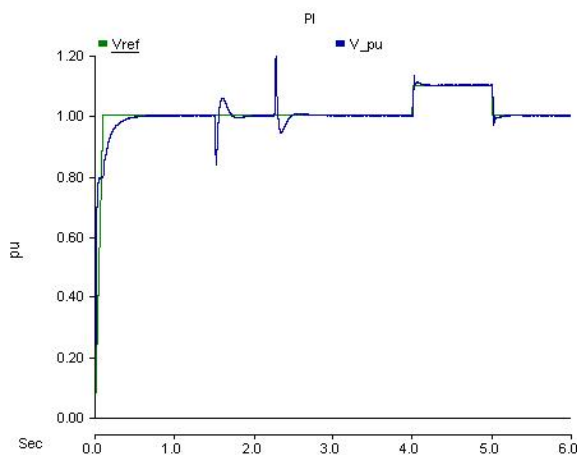


Figura 8. Respuesta del sistema siguiendo el voltaje de referencia bajo una estrategia de control PI.

es de aproximadamente $t = 0.56$ s con un máximo sobreimpulso de 19.68% después que este se libera. Para la perturbación presentada como un cambio en el voltaje de referencia del 10% el tiempo de respuesta es de aproximadamente $t = 0.25$ s con un máximo sobreimpulso del 3.2%.

Para un análisis del cálculo de los parámetros de este tipo de control [3, 4, 7].

5.1 Simulación del sistema en presencia del STATCOM operando con un control difuso.

Los valores que se utilizaron para las constantes K_e , K_{de} y K_u son 0.7, 0.5 y 50 respectivamente. Se debe aclarar que estos valores no corresponden a valores óptimos, estos se obtuvieron después de una etapa de sintonización

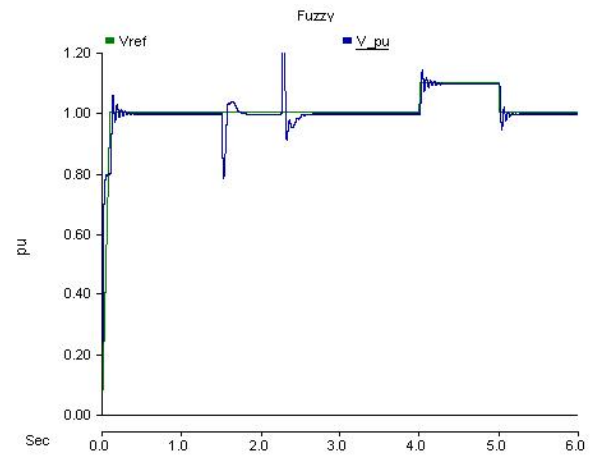


Figura 9. Respuesta del sistema siguiendo el sistema de referencia cuando el STATCOM opera bajo el control difuso.

sencilla (heurística) del controlador después de haber sido modelado y puesto en funcionamiento sobre el sistema.

En la figura 9 se muestra la respuesta al seguir el sistema de referencia cuando este es sometido a varias perturbaciones (tabla 2).

El tiempo de establecimiento inicial es alcanzado por el sistema en $t = 0.4$ s con un máximo sobreimpulso de 5.59% en $t = 0.1376$ s. La respuesta a diferencia del resultado en la sección anterior presenta un error de estado estacionario de 0.43% pero con un rizado menos pronunciado (0.12%). El tiempo de respuesta al fallo es de 0.326 s y de 0.43 s al liberarse, con un sobreimpulso de 28.5% en $t = 2.2796$ (0.0296 s después de liberarse el fallo). Cuando se efectúa el cambio en el voltaje de referencia, el tiempo de respuesta es de 0.27 s con un máximo sobreimpulso de 4.91%.

La característica de potencia activa y reactiva del STATCOM cuando este opera bajo el control difuso se muestra en la figura 10.

Los valores de la potencia reactiva suministrada por el STATCOM en estado estacionario, durante el fallo y durante el cambio en la referencia de voltaje son 115 MVar, 285 MVar y 187 MVar respectivamente, lo cual indica que el STATCOM incremento su generación de potencia reactiva en un 147.83 % al momento del fallo y en un 62.61% cuando se cambia el voltaje de referencia en un 10 % (0.1 pu). Los valores de potencia activa oscilan entre 0 MW y -1.6 MW en estado estacionario y entre -1.9 MW y -3.2 MW durante el fallo a fin de compensar las perdidas generadas por su funcionamiento. Sin embargo se presentan cambios bruscos en los momentos en que ocurren las perturbaciones como se puede observar con el valor pico de -32.5 MW que se obtiene al liberarse el fallo. Se observo también que la oscilación de

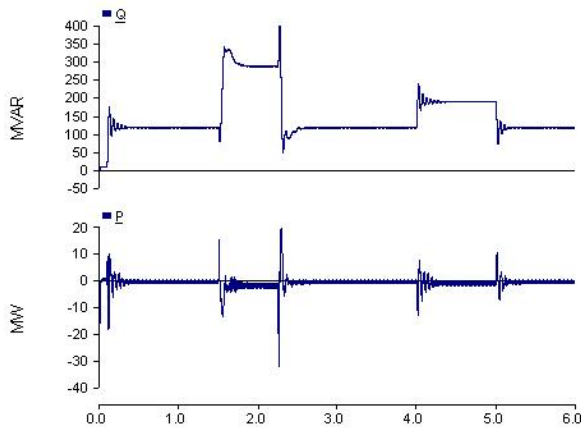


Figura 10. Característica de Potencias (a) Reactiva, (b) Activa suministradas por el STATCOM.

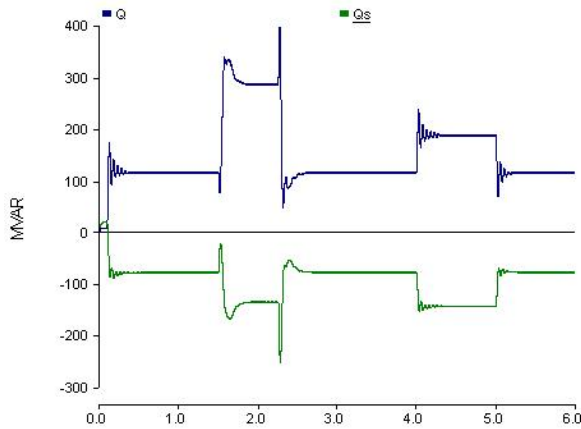


Figura 11. Relación de Potencia Reactiva entre la fuente y el STATCOM.

la potencia reactiva en estado estacionario es menor que cuando el STATCOM trabaja bajo el control PI.

En estado estacionario el valor del ángulo de desfase α varía entre 0.49 grados y 0.2 grados, durante el fallo este se incrementa a valores positivos entre 0.63 grados y 0.362 grados. Sin tener en cuenta los valores antes que entre a funcionar el STATCOM ($t < 0.1$ s), después de la liberación del fallo en $t = 2.27$ s se observa el mayor valor para este ángulo correspondiente a -9.52 grados.

Se observa también como el voltaje VDC que corresponde al voltaje del condensador en el lado DC del STATCOM, varía entre 43.38 kV y 44.73 kV en estado estacionario, 48.63 kV y 52.23 kV durante el fallo y entre 48.97 kV y 50.90 kV cuando es aumentada en un 10% (0.1 pu) el voltaje de referencia. El mayor valor que alcanza este voltaje es de 70.40 kV que se observa como un pico 0.014 s después que es liberado el fallo.

En la figura 11 se muestra la relación entre la potencia reactiva suministradas por el STATCOM y por la fuente.

En estado estacionario el valor neto de potencia reactiva suministrados por el STATCOM y la fuente es de 36.5 MVar, aproximadamente el valor nominal de potencia reactiva demandada por la carga. Cuando se presenta el fallo este produce un incremento en la demanda de potencia reactiva del 307.97% y cuando se aumenta en un 10% el voltaje de referencia el incremento en la demanda de potencia reactiva es de tan solo el 18.34%.

6. CONCLUSIONES

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

En los resultados obtenidos, el control difuso provee una respuesta satisfactoria, rápida y estable para el sistema cuando este se somete diferentes perturbaciones.

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

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ALZATE G., Alfonso. Control difuso. Pereira : Universidad Tecnológica de Pereira, 2001.
- [2] CARREIRO CAVALIERE, Carlos André. Análise de STATCOM operando em sistemas desbalanceados. Trabajo de grado (Mestre em ciências em engenharia elétrica). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Programa de Engenharia Elétrica. Rio de Janeiro, 2001.
- [3] CROW, M. L. and YANG, Zhiping. STATCOM Control for Power System Voltage Applications. IEEE : Transactions on Power Delivery. Vol. 15, No. 4 (oct. 2000).
- [4] ESCOBAR, G. et al. From Adaptive PBC to PI Nested Control for STATCOM. DIGITAL CONTROL 2000: PAST, PRESENT AND FUTURE OF PID CONTROL. Terrassa: Elsevier Science, 2000.
- [5] GIRALDO B., Didier y TABARES G., Iván. Control de Velocidad de un Motor DC Utilizando Lógica Difusa. Universidad Tecnológica de Pereira : Scientia et Technica. Año 5, No. 9. 1999.
- [6] MANITOBA HVDC RESEARCH. PSCAD/EMTDC User's Guide. 1998.
- [7] SOTO, D., PEÑA, R. S. y CASTRO, G. Desarrollo de una Estrategia de Control Lineal para STATCOM Múltipulsos. XIV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA. Antofagasta : Universidad de Antofagasta, 2001.