

CONTROL DIFUSO DE STATCOM PARA LA REGULACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA EN UNA RED ELÉCTRICA

Ing. Jhoan Coello
Universidad Privada Dr. Rafael
Belloso Chacin
coello@hotmail.com

MSc. Sergio de Pool
Universidad Privada Dr. Rafael
Belloso Chacin
sergiodepool@gmail.com

PhD. Ricardo Fabelo
Universidad Privada Dr. Rafael
Belloso Chacin
rfabelo@urbe.edu.ve

(Tipo de Artículo: **Investigación**. Recibido el 25/10/2013. Aprobado el 26/12/2013)

RESUMEN

Este artículo abarca el diseño de control difuso de un Inversor de tres niveles con IGBT (STATCOM) en una red eléctrica de media tensión para la regulación del Factor de Potencia (FP). La metodología empleada en la investigación está conformada por cuatro fases: El estudio de la red con sus variables dinámicas, Modelado del proceso, Estrategia de control mediante transformación Park y Modulación de Ancho de Pulso Senoidal y finalmente el Diseño de control difuso. El rendimiento y validez de los controladores se verificó usando los modelos experimentales, los resultados muestran que los controladores mantienen el FP dentro de la unidad o valor deseado con un margen de desviación de 0.005, cumpliendo así con el Reglamento General de la Ley de Servicio Eléctrico. Por otro lado se demuestra que este tipo de control avanzado tiene la habilidad de manejar data impredecible, haciéndolo adecuado para una gran variedad de aplicaciones, especialmente en procesos que son muy complejos para ser analizados por métodos clásicos.

Palabras claves

Control Difuso, Regulación del Factor de Potencia, Compensador Síncrono STATCOM.

STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR -STATCOM- FUZZY CONTROL FOR REGULATING POWER FACTOR IN ELECTRICAL GRID

ABSTRACT

This article covers the design of fuzzy control for a three-level Inverter with IGBT electronic devices (STATCOM) in a medium-voltage grid for Power Factor regulation. The design methodology consists of four stages: Electrical grid assessment, Process model construction, Inverter Control strategy by using Park transformation circuit and Sine Pulse Width Modulation and Fuzzy Logic design. The controller performance and validity was verified using experimental models, the results show that fuzzy controller keep the Power Factor within the desired value having a deviation margin of 0.005, meeting in this way with the General Regulations for Electric Service Law. Additionally it has been verified that this controller can handle rough and unpredictable real-world data which made it suitable for a wide range of applications, especially when processes are very complex to be analyzed by using classical methods.

Keywords

Fuzzy Controller, STATCOM synchronous compensator, Power Factor Regulation.

RÉGULATION FLOUE DE COMPENSATEUR SYNCHRONE STATIQUE - STATCOM- POUR CONTRÔLER LE FACTEUR DE PUISSANCE DANS UN RÉSEAU ÉLECTRIQUE

RÉSUMÉ

Cet article s'occupe de la conception d'un régulateur flou pour un onduleur à trois niveaux avec IGBT (STATCOM) dans un réseau électrique à moyenne tension pour le contrôle du Facteur de Puissance. La méthodologie utilisée dans cette recherche a quatre étapes: L'étude du réseau et ses variables dynamiques, modélisation du procès, stratégie de contrôle en utilisant la transformation de Park et modulation en largeur d'impulsion sinusoïdal et finalement la conception du régulateur flou. Le rendement et validité des régulateurs ont été vérifiés avec les modèles expérimentaux, les résultats nous montrent que les régulateurs maintiennent le facteur de puissance dans la valeur désirée avec une marge de déviation de 0.005 en accomplissant de cette manière avec le règlement général de la loi de service électrique. De plus, on a vérifié que ce type de régulation avancée a le potentiel de travailler avec données imprédictibles du monde réel, ce qui le rend approprié pour un grand variété d'applications particulièrement dans processus qui sont très complexes pour être analysés en utilisant des méthodes classiques.

Mots-clés

Régulation floue, contrôle du facteur de puissance, compensateur synchrone STATCOM.

1. INTRODUCCIÓN

La electricidad es una de las principales formas de energía usadas en el mundo, para la humanidad fue un avance sumamente importante y hoy en día difícilmente una sociedad pueda concebirse en ausencia de ella. Sin embargo en los sistemas eléctricos surgen perturbaciones que afectan la eficiencia del servicio eléctrico y requieren la implementación de acciones para su control y estabilidad.

Una de estas perturbaciones está relacionada con el aumento de cargas reactivas y su consecuencia directa sobre el Factor de Potencia (FP), que culmina generando caída de tensión o baja regulación de voltaje, aumento de la Intensidad de corriente en los conductores eléctricos y transformadores, Incremento de potencia en las plantas, disminución de la transferencia de Potencia activa e Inestabilidad de los sistemas.

En Venezuela estos síntomas toman mayor relevancia por los requerimientos de energía de un mercado colapsado, desregulado que necesita mantener una alta eficiencia en el uso de sus instalaciones para evitar las interrupciones del sistema. Por otro lado, en la distribución de energía eléctrica cada vez es más común la presencia de cargas no lineales que introducen restricciones de estabilidad y limitan la cantidad de potencia activa transferida en una línea, requiriéndose entonces compensación de potencia reactiva.

Lo planteado anteriormente exige un proceso de cambio en el cual se debe estar inmerso para determinar deficiencias y avanzar en el desarrollo de controles que permitan optimizar el flujo de potencia activa en los SPE, apuntando así al desarrollo de técnicas de control de la energía reactiva para minimizar las perturbaciones presentes en las redes eléctricas.

Este trabajo de investigación está relacionado con el control difuso de reactivos en una red eléctrica mediante la inyección o absorción de energía utilizando electrónica de potencia (Statcom) para regular así el FP. En el cuerpo del artículo se muestra la configuración del control, la red eléctrica, el compensador y los resultados obtenidos en la simulación con matlab/simulink.

2. METODOLOGÍA

El procedimiento utilizado para darle cumplimiento al desarrollo de esta investigación, se enmarca en cuatro fases conformadas por cada uno de los objetivos específicos del estudio.

En la fase I se determinarán las variables dinámicas que intervienen en el proceso mediante su análisis, revisión

bibliográfica, verificación de planos, observación del proceso y recolección de especificaciones técnicas.

La fase II comprende el modelado del proceso mediante la recolección de datos o mediciones de potencia activa, reactiva y voltaje, filtrado de señales o procesamiento de datos de ser necesario.

La fase III enmarca el diseño del controlador difuso, la estrategia de control a utilizar para regular el Factor de potencia por medio de un dispositivo de compensación estática como el Statcom.

Finalmente en la fase IV de la investigación se realizan las simulaciones para determinar el desempeño del controlador difuso en la regulación del factor de potencia en una red eléctrica mediante el control de un Statcom.

3. RESULTADOS

Fase I: Variables Dinámicas del Sistema

El sistema en estudio corresponde a una red eléctrica con capacidad de 85 MVA divididos en 2 circuitos. Los consumos actuales de potencia activa oscilan entre 29 y 38 MVA, mientras que la potencia reactiva oscila entre 16 y 22 Mvar para el circuito 1 (en estudio). La Figura 1 muestra la simplificación del circuito 1 de la red.

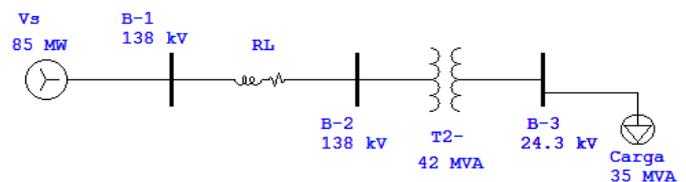


Fig. 1. Unifilar Red Eléctrica

La figura 2 muestra los datos de campo conformados por las mediciones de potencia activa-reactiva en la barra B-3, estos datos son fundamentales para el modelado del proceso y caracterización de la carga variable.

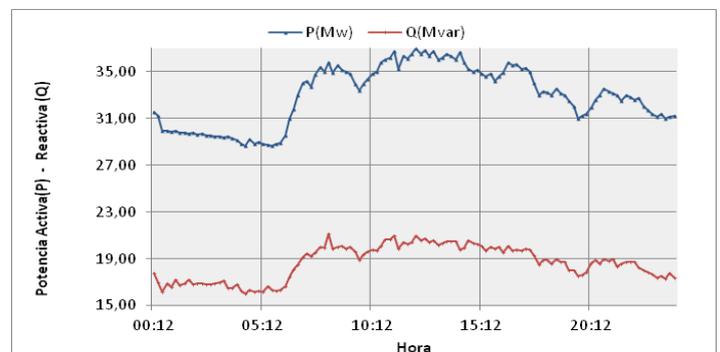


Fig. 2. Potencia P y Q de la Carga

Fase II: Modelado del Proceso

El modelado del proceso se realizó mediante la implementación de modelos de SimPowerSystem, al combinar los bloques de generación junto con los

elementos de carga, transformación e impedancia y configurando los parámetros de cada uno de ellos según especificaciones de la red se obtiene el modelo en estudio que se muestra en la figura 3.

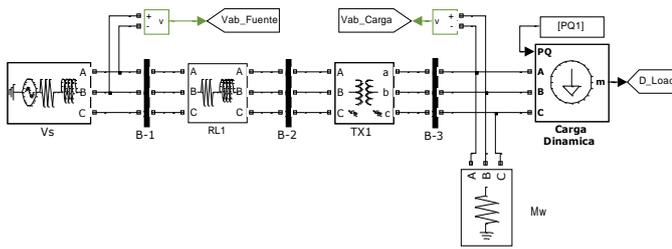


Fig. 3. Modelo del sistema -Red Eléctrica-

Una vez desarrollado el modelo se validó ejecutando flujo de carga y comparando los datos reales de la figura 2 con respecto a los resultados de las mediciones en la simulación. La tabla 1 detalla los valores máximos, mínimos, media, desviación estándar de los parámetros de Potencia y voltaje arrojados estadísticamente de la comparación.

Tabla 1. Desviación de Parámetros Reales vs Medidos

	Potencia Activa Real Vs Medida (%)	Potencia Reactiva Real Vs Medida (%)	Voltaje AC Real Vs Medido (%)
Diferencia máxima	1,25E+01	2,64E+01	2,89E+01
Diferencia mínima	3,69E-04	6,96E-05	1,18E+00
Media de la diferencia	9,68E-01	2,38E-01	1,33E+04
Error máximo	1,33E+01	3,04E+01	2,53E+01
Error mínimo	3,69E-04	6,96E-05	1,19E+00
media del error	9,76E-01	2,41E-01	1,33E+00
Desviación estándar	1,02E+00	8,97E-01	1,25E+00

Fase III: Diseño del Controlador Difuso

El diseño del controlador está sujeto a la estrategia de control a implementar para inyectar o absorber reactivos de la red, debido a que en este caso se utilizó un Statcom, es importante resaltar que este dispositivo está conformado por un inversor fuente de voltaje que intercambia flujo de potencia con la red a través de un transformador de reactancia, permitiendo de esta manera ampliar los límites de estabilidad del sistema y a la vez mejorar algunos de los parámetros de operación.

Este compensador se puede modelar como una fuente de voltaje regulada 'Vs' conectada a una barra de voltaje 'Vo' a través de un transformador según [4], como puede apreciarse en la Figura 4.

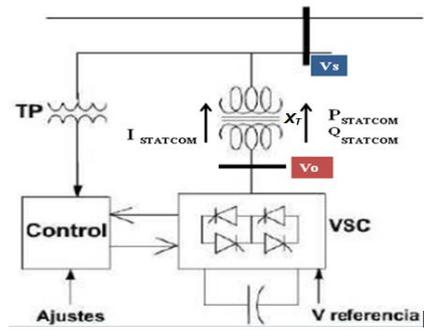


Fig. 4. Unifilar de un STATCOM

Utilizando las ecuaciones clásicas que describen el flujo de potencia activa y reactiva [2], en una línea corta en términos de los voltajes Vo y Vs, la impedancia del transformador XT (que puede asumirse ideal) y la diferencia angular entre ambas barras(δ), podemos definir PSTATCOM y QSTATCOM.

$$P_{STATCOM} = \frac{|V_0||V_s|}{X_T} \cdot \sin(\delta) \tag{1}$$

$$Q_{STATCOM} = \frac{|V_0||V_s|}{X_T} \cdot \cos(\delta) - \frac{|V_s|^2}{X_T} \tag{2}$$

Dónde δ es el ángulo de Vs respecto de Vo en éste sistema genérico. Cuando el STATCOM opera a δ=0 puede verse que la potencia activa enviada del dispositivo al sistema se hace cero mientras que la potencia reactiva dependerá fundamentalmente del módulo de las tensiones.

Esta condición operativa implica que la corriente que circula por el transformador (ISTATCOM) debe tener ±90° de desfase respecto al fasor Vs. En otras palabras si |Vs| es mayor a |Vo|, los reactivos serán enviados del STATCOM al sistema (operación capacitiva), originándose una circulación de corriente en este sentido. En caso contrario, los reactivos serán absorbidos del sistema por el STATCOM (operación inductiva) y la corriente circulará de manera opuesta.

Finalmente si los módulos de Vo y Vs son iguales, no habrá circulación de corriente ni de reactivos en el sistema. De aquí se concluye que, en estado estacionario, QSTATCOM depende solamente de la diferencia de los módulos de voltajes |Vo| y |Vs|.

Estrategia de Control

La estrategia de control para el inversor se basa en un circuito que usa dos controladores difusos, uno controlará la energía reactiva Q y otro el voltaje Vdc de los condensadores. El circuito utiliza la transformación de Park para descomponer los fasores trifásicos de

tensión y de corriente de la Red Eléctrica en dos componentes desacopladas entre sí, llamadas componente de eje directo d, y componente de eje de cuadratura q.

De tal manera que se transforma la corriente de la red del sistema de referencia abc en valores continuos o sistema de referencia síncrono d-q. Al estar desacopladas las componentes d y q, resulta idóneo el controlar el eje directo para la regulación del voltaje en los condensadores según [1]. El esquema del control se muestra en la figura 5.

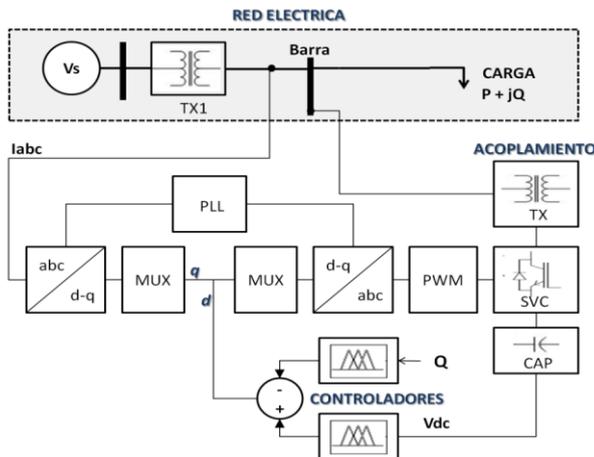


Fig. 5. Circuito de Control

Control Difuso

El controlador difuso contendrá el algoritmo capaz de convertir la estrategia de control lingüística en una de control automático. La configuración de los controladores está basada en la metodología de Mamdani con el método de los mínimos, defusificación tipo centroide según establece [3], [5]. La estructura de los controladores está conformada por dos entradas - una salida, como se muestra en la figura 6.

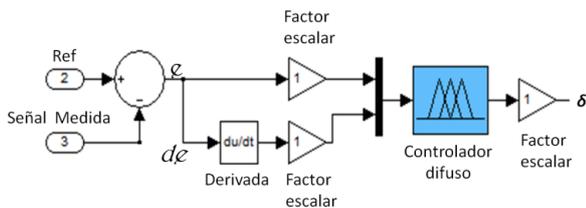


Fig. 6. Estructura de los controladores

Los controladores difusos utilizarán dos entradas de datos, la primera entrada es el error “e”, que se calcula como la diferencia entre el valor medido y el valor deseado. Esta entrada cuantifica que tan lejos o cerca está el valor actual de la referencia.

La segunda entrada es la derivada del error “de”, se calcula como la diferencia entre el valor actual y el valor medido en la iteración anterior. Esta entrada cuantifica

que tan rápido o lento cambia la variable.

La salida de los controladores se restaran para regular la corriente del eje directo, de tal manera que cuando se produce una variación entre la tensión de referencia de los condensadores y la energía reactiva de la fuente, la corriente del eje directo “id” cambia generando una variación en la magnitud de la tensión de los condensadores.

Partición difusa de los Controladores

Es usual escoger universos de discurso estandarizados, así que se tomara para las entrada e - de y salida δ [-1 1]. Luego se aplicará factores de escala para cada variable según el proceso. Para ambas variables de entrada, Error (e) y Der. Error (de) se particionó el universo de discurso de las variables de entrada en 3 conjuntos borrosos (para los dos controladores), definidos con funciones de pertenencia trapezoidales y triangulares.

A cada conjunto borroso le asoció una etiqueta lingüística. La siguientes figuras muestran la partición difusa del Error (e) y derivada del Error para los dos controladores.

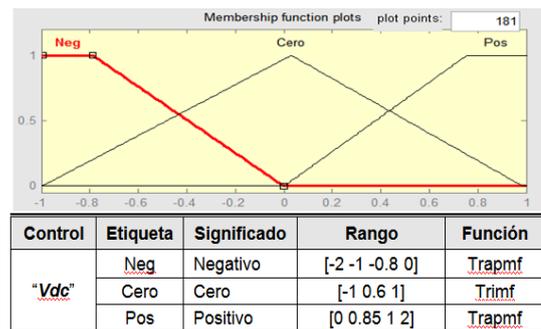


Fig. 7. Partición difusa del Error “control Vdc”

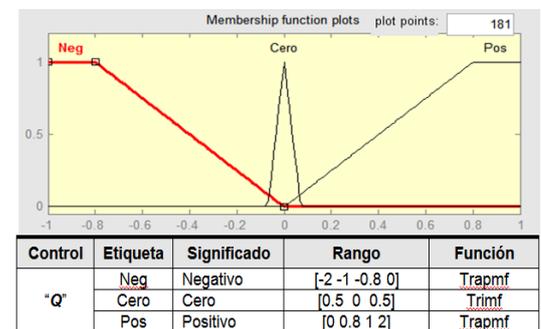


Fig. 8. Partición difusa del Error “control Q”

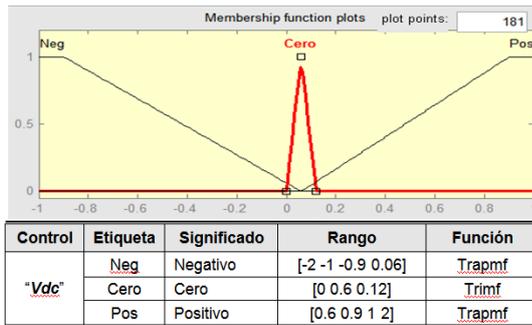


Fig. 9. Partición difusa Deriv. Error "control Vdc"

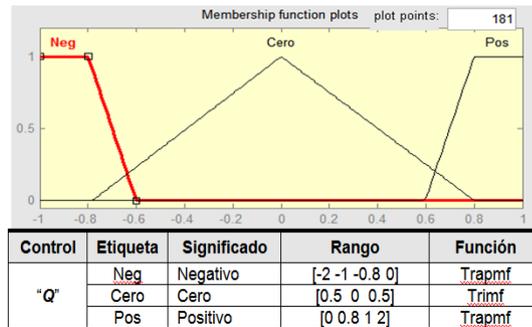


Fig. 10. Partición difusa Deriv. Error "control Q"

Partición difusa de las salidas

En la variable de salida delta (δ) se particionó el universo de discurso en 3 conjuntos borrosos para ambos controladores, definidos con funciones de pertenencia gaussianas, trapezoidales y triangulares.

Las siguientes figuras muestran las respectivas configuraciones.

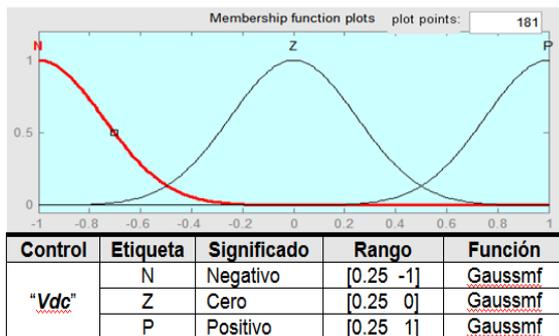


Fig. 11. Partición difusa de la Salida "control Vdc"

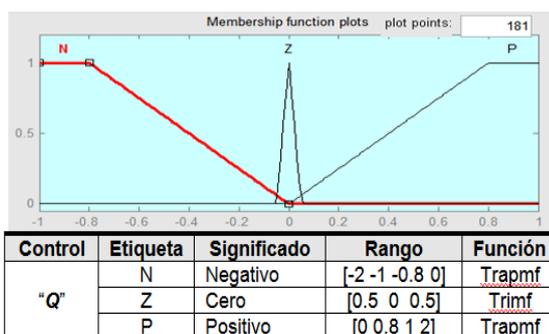


Fig. 12. Partición difusa de la Salida "control Q"

Base de Reglas difusas

Las reglas de control se basarán en la forma de una declaración IF – AND - THEN. Los antecedentes de las reglas corresponderán directamente al grado de membresía calculada durante el proceso de fusificación. La base de reglas quedo configurada para ambos controladores como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Reglas Difusas

		Error "e"		
		Neg	Cero	Pos
Deriv. Error "de"	Neg	P	Z	N
	Cero	P	Z	N
	Pos	P	Z	N

Configuración General del Sistema

La Fig. 13 muestra la red en estudio conformada por una fuente de 138 kV, una impedancia RL= 0,002 Ω , un transformador TX1 138kV/24kV, una carga lineal de 23 Mw y una carga resistiva-inductiva de 15Mw/22MVar. El compensador está representado por un puente de tres niveles con IGBTs y capacitores de 5mF, la rama de acoplamiento está integrada por un filtro RL con resistor de 0,095 Ω e inductor de 1,15mH para representar las pérdidas del conductor y atenuar el contenido armónico del inversor, el transformador de acoplamiento tiene una relación de 24kV/4,8kV.

Fase IV: Desempeño del Control Difuso

Para probar el sistema bajo condiciones de operación distintas a la de régimen permanente se simula el ingreso violento de una carga resistiva-inductiva de 15 Mw - 22 MVar mediante el cierre programado de un Interruptor seteado entre [0,15 0,25] seg, la cual hace evidente la necesidad de compensación de reactivos y regulación de tensión. El procedimiento se llevará a cabo tomando las mediciones del lado de la fuente y del lado de la carga con y sin el Statcom conectado a la red.

Las gráficas de la Fig. 14 y 15 muestran una simulación de 0.3 segundos en régimen transitorio de la potencia activa/reactiva en la Fuente barra B-1, con y sin el Statcom. El interruptor BK1 cerrado y el interruptor BK2 de la carga no lineal programado de [0,15 - 0,25] seg.

En la Fig 15 se observa cómo responde el sistema ante la entrada brusca de carga inductiva sin el Statcom, mientras que en la Fig. 15 se Observa la potencia activa y reactiva en p.u. con respecto a la fig 14, donde se puede apreciar la regulación de energía reactiva.

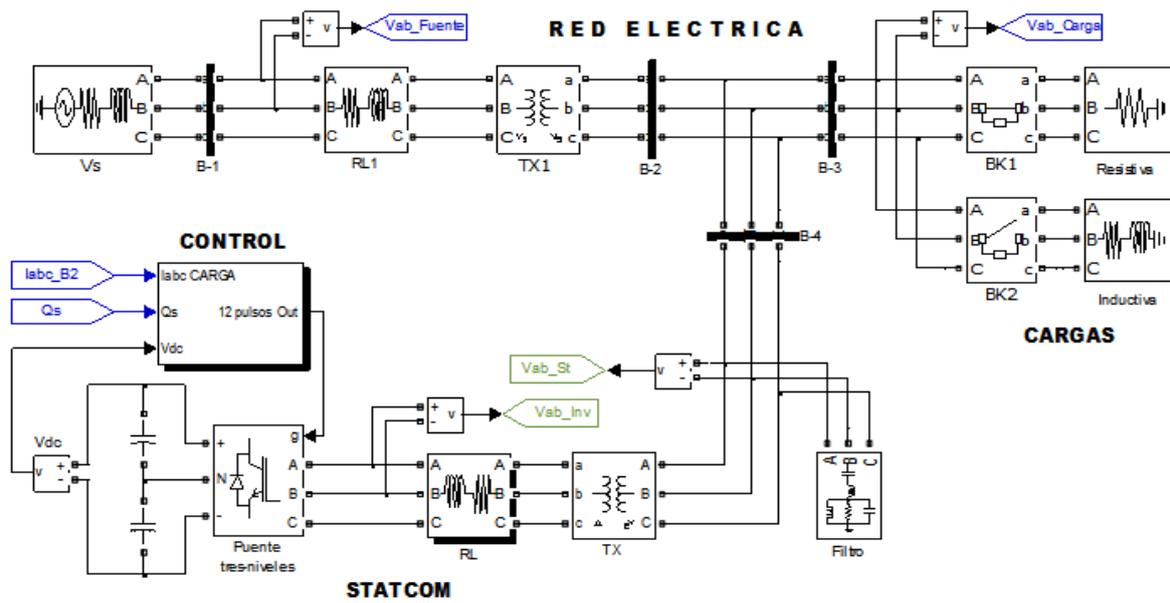


Fig. 13. Diagrama General de la Red Eléctrica

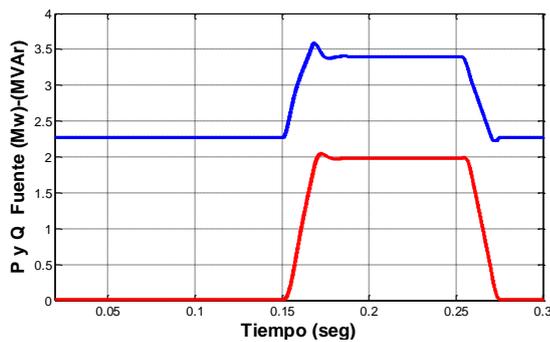


Fig. 14. Potencia P-Q fuente sin Statcom

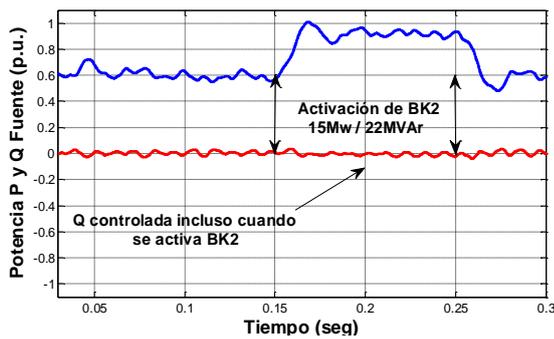


Fig. 15. Potencia P-Q fuente con Statcom

17 muestra el VAC ampliado en la barra de carga de la red con Statcom entre 0,975 (p.u.) y 1,002 (p.u.), lo cual demuestra que la compensación de energía reactiva mantiene el voltaje AC dentro de los límites deseados [0,95-1,05 VAC (p.u.)].

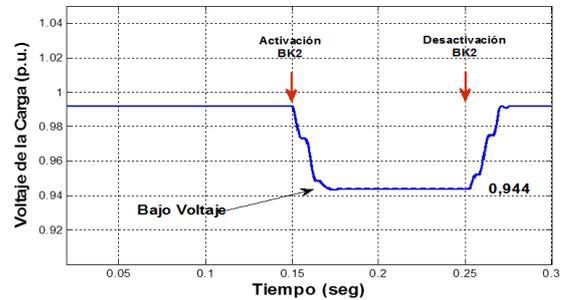


Fig. 16. Voltaje AC en la carga sin Statcom

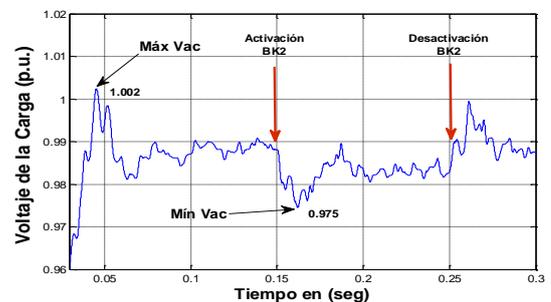


Fig. 17. Voltaje AC en la carga con Statcom (Ampliado)

Las gráficas de la Fig. 16 al 19 muestran la simulación de 0.3 segundos en régimen transitorio del voltaje AC en la Fuente (B-1) y en la barra de carga (B-3) con y sin Statcom. El interruptor BK1 permanece cerrado y el interruptor BK2 de la carga no lineal activado [0,15 - 0,25] seg.

La Fig. 16 muestra la afectación del perfil de VAC en la barra de carga de la red tocando niveles de 0,944 en p.u. (sin Statcom) al momento de activar BK2. La Fig.

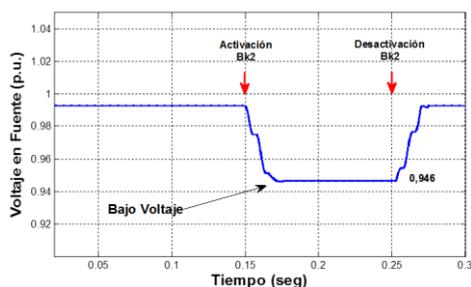


Fig. 18. Voltaje AC en la fuente sin Statcom

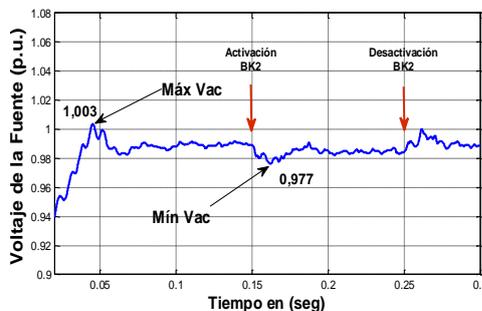


Fig. 19. Voltaje AC en la fuente con Statcom (Ampliado)

De manera similar ocurre en la fuente (B-1), el VAC se ve afectado con la entrada de energía reactiva hasta llegar a niveles de 0,946 en p.u. sin Statcom, mientras que en la Fig. 19 observamos que con el Statcom funcionando el voltaje oscila entre niveles de tensión de 0,977 y 1,003.

Finalmente analizando el comportamiento del Factor de Potencia sin el Statcom, observamos como en la Fig. 20 el mismo cae hasta niveles 0,863 con la interrupción de la carga inductiva durante el periodo de 0,15 y 0,25 seg. Por otro lado, en la Fig. 21 se observa la regulación del FP en la unidad cuando el Statcom está operando.

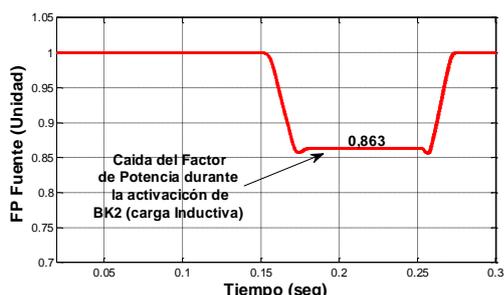


Fig. 20. Factor de Potencia fuente sin Statcom

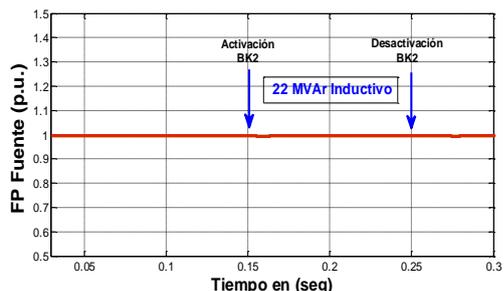


Fig. 21. Factor de Potencia fuente con Statcom

4. CONCLUSIONES

Se demostró que el control difuso presenta excelente desempeño en el control de un inversor de tres niveles (STATCOM) brindando buena regulación de energía reactiva y compensación de reactivos en régimen transitorio.

Los resultados obtenidos demuestran que el control difuso mantiene una respuesta satisfactoria, rápida y estable para el sistema eléctrico cuando se somete a perturbaciones.

La estrategia de control empleada ratifica que es posible regular el Factor de Potencia en una red eléctrica mediante el control del eje directo del sistema trifásico de la carga.

Se compenso una carga con reactivos del tipo inductivo que generaba una caída del FP hasta 0,86. Logrando un FP de 1 con un error de 0,005.

Durante la compensación se obtuvo un THD de voltaje de 1,2% y un THD de corriente de 5,8 %. Valores que están dentro de la norma IEEE 519-1992, ya que la norma especifica un 5% para el voltaje y 30% para la corriente.

REFERENCIAS

- [1] Brahim Ferdi, Chellali Benachaiba, Brahim Berbaoui and Rachid Dahini. "Statcom Dc-Link Fuzzy Controller for Power Factor Correction". 2011.
- [2] C. Díaz. "Modelación de un compensador estático para el control de generación distribuida con energías renovables", Tesis de Ingeniería Civil Eléctrica no publicada, Santiago de Chile, Chile. 2009.
- [3] Hao Ying. "The simplest fuzzy controllers using different inference methods are different nonlinear proportional-integral controllers with variable gains". Automática, vol 29 N° 6, pp. 1579-1589. 1993.
- [4] José H. Vivas N., José G. Suárez P., Jonathan Expósito L. "Simulación en ATP del compensador estático de potencia reactiva (STATCOM) utilizando técnicas de modulación SPWM" Universidad Simón Bolívar – CVIE 2004.
- [5] Mourad Ousslaah, Hung T. Nguyen, Vladik Kreinovich. (sf) "A new derivation of centroide defuzzification". 2001.