

Modelado y operación del compensador estático de distribución

Fernando Jurado¹, Nestor Gonzalez¹, Jose Barrera¹, Miguel Barrera¹, Juan Segundo²

Depto. de Maestría en Ingeniería Eléctrica¹, Facultad de Ingeniería²
Instituto Tecnológico Superior de Irapuato¹, Universidad Autónoma de San Luis Potosí²
Irapuato, Gto.¹, San Luis Potosí, S. L. P.², México
fejurado@itesi.edu.mx, juan.segundo@uaslp.mx

Abstract—The aim of this paper is to analyze the performance of the distribution static compensator which is a device able to mitigate some of the main problems concerning the power quality in distribution systems. The disturbances arising in networks of power cause variations in the voltage waveforms at each node of the network. Moreover, the massive increase in the use of power electronic based devices in the system has caused contamination of the waveforms of voltage and current by harmonic current components undesirable. In order to compensate for the condition: voltage regulation, reactive power, harmonic mitigation, and elimination of SAGS and SWELLS voltages present in the distribution system.

Keyword— *Custom Power, Compensator static of distribution, Flexible AC transmission system.*

Resumen— El objetivo de este artículo es analizar el desempeño del compensador estático de distribución el cual, es un dispositivo capaz de mitigar algunos de los principales problemas referentes a la calidad de la energía en sistemas distribución. Los disturbios suscitados en las redes de suministro de energía provocan variaciones en las formas de onda de voltaje en cada nodo de la red. Además, el incremento masivo en la utilización de dispositivos basados en electrónica de potencia en el sistema, han provocado la contaminación de las formas de onda de voltaje y corriente mediante componentes corrientes armónicas indeseables. Con el propósito de compensar las condiciones de: regulación de voltaje, potencia reactiva, mitigación de armónicos, y eliminación de SAGS y SWELLS presentes en los voltajes del sistema de distribución.

Palabras claves— *Custom Power, Compensador estático de distribución, sistemas de transmisión flexibles de corriente alterna.*

I. INTRODUCCIÓN

El estudio de calidad de la energía indica que las cargas día con día son más sensibles a las variaciones de voltaje y corriente en los sistemas de suministro de energía eléctrica; actualmente se pueden encontrar cargas industriales, residenciales y comerciales las cuales hacen uso intensivo de controles enfocados en microprocesadores, así como en la electrónica de potencia (EP), usada en distintas operaciones, por mencionar el caso de los controladores para motores eléctricos, que a su vez están reemplazando a los controladores electromagnéticos, los cuales presentan mucha sensibilidad a varios tipos de disturbios.

El gran interés de elevar la eficiencia en los sistemas eléctricos tiene como resultado un incremento continuo en la aplicación de dispositivos de alta eficiencia tales como: los controladores de velocidad en motores eléctricos, el uso de capacitores en paralelo para la corrección del factor de potencia y la reducción de pérdidas. Trayendo consigo un considerable incremento en los niveles de armónicas en el sistema eléctrico, así como una mayor atención por parte de los usuarios finales a problemas relacionados con la calidad del suministro de la energía eléctrica, que pueden afectar a las cargas, como son: las interrupciones de servicio, los transitorios por maniobras, las depresiones (SAGS) y elevaciones de voltaje (SWELLS). Por todo lo anterior, el conocimiento de los problemas relacionados a la calidad de la energía en sistemas eléctricos; es esencial para establecer acciones correctivas y preventivas que permitan el control de los efectos no deseables tanto por parte del suministrador como del consumidor.

La tecnología basada en EP ha provocado tres cambios fundamentales en la naturaleza de la carga del usuario y en el sistema de potencia, los cuales conciernen a los problemas de calidad de la energía.

- La EP está produciendo una creciente variedad de cargas a nivel residencial, comercial e industrial, que son muy sensibles a las variaciones en las formas de onda de los voltajes y corrientes.
- Con la EP surge una nueva generación de dispositivos de alta capacidad de potencia a un bajo costo. Sin embargo, estos dispositivos producen perturbaciones en la forma de onda de voltajes y corrientes; a su vez estos dispositivos son sensibles a tales variaciones.
- Mientras que estos cambios dramáticos suceden en las cargas, las empresas eléctricas y los consumidores siguen aplicando bancos de capacitores para la corrección del factor de potencia, para controlar el voltaje y reducir el flujo de reactivos, los cuales influyen en los problemas de la calidad de energía. Ya que su uso representa una ruta de baja impedancia para dichas corrientes de alta frecuencia.

Lo que nos lleva a nuevas generaciones de dispositivos de alta capacidad de potencia como lo son CUSTOM POWER y Sistemas de Transmisión Flexible AC (FACTS). Los sistemas modernos de potencia contienen diferentes tipos de cargas no lineales, lineales, y aquellas basadas en EP. La variedad de cargas conectadas en un sistema de distribución representa un reto para quien busca la operación correcta de los dispositivos y elementos eléctricos. Por un lado las cargas no lineales conmutadas, que requieren que las señales de voltaje y corriente estén libres de distorsión y que su magnitud y frecuencia se mantengan constantes para su correcta operación. Sin embargo, paradójicamente son estas mismas cargas las principales causantes de los problemas relacionados a la distorsión armónica de los voltajes y corrientes en las redes eléctricas.

Los sistemas eléctricos de potencia convencionales se controlan principalmente por la apertura y cierre de interruptores electromecánicos: conexión y desconexión de capacitores de potencia, reactores, interruptores de potencia, seccionadores, restauradores, entre otros. Actualmente se conocen los dispositivos CUSTOM POWER capaces de mitigar los fenómenos de la calidad de energía tal es el caso del compensador estático de distribución (DSTATCOM) el cual tiene capacidad de controlar el flujo de potencia, corregir el factor de potencia y mantener el voltaje en el bus de carga en un valor definido .

Desde el punto de vista de operación la tecnología CUSTOM POWER y FACTS está relacionada con la habilidad de controlar las variables eléctricas de la red de potencia en diferentes maneras que no eran posibles hasta la llegada de la EP a los sistemas eléctricos. Los controladores FACTS son utilizados en redes de transmisión de potencia y los dispositivos CUSTOM POWER son utilizados en la red de distribución; ambos conceptos fueron introducidos por N.G, Hingorani [1].

Los dispositivos FACTS [2] mejoran la confiabilidad en los sistemas de transmisión, los CUSTOM POWER mejoran la calidad y confiabilidad de la potencia que es entregada a los consumidores, bajo este esquema un consumidor recibe una calidad de energía pre-especificada, esta especificación puede tener una combinación de las siguientes especificaciones:

- Disminución del número de interrupciones de potencia
- Regulación de voltajes entre límites establecidos
- Baja distorsión armónica en el voltaje de alimentación
- Bajo desbalance de fase
- Oscilaciones de baja frecuencia (Flicker)

II. DESARROLLO

El dispositivo DSTATCOM está diseñado para la compensación, en donde la distorsión armónica y el desbalance de fases pueden alcanzar niveles superiores a los máximos permitidos. El controlador DSTATCOM opera continuamente monitoreando las tensiones y las corrientes de carga y determina la cantidad de compensación que se requiere para el sistema CA para compensar una variedad de disturbios. El DSTATCOM tiene una gran capacidad para mitigar los SAGS de tensión proveyendo una compensación en paralelo; este dispositivo presenta muchas aplicaciones cuando se trata de sistemas de bajo voltaje, los cuales mejoran la calidad y confiabilidad de la energía entregada al consumidor. Teniendo una respuesta rápida del compensador es posible tener un control continuo y dinámico de la energía que se está entregando, incluyendo compensaciones de voltaje, potencia reactiva, mitigación de armónicos.

La estructura del DSTATCOM es mostrada en la Figura 1. Esta contiene tres puentes tipo H que están conectados a un capacitor de almacenamiento común en CD. Cada interruptor representa un dispositivo semiconductor de potencia en anti-paralelo con un diodo. Cada inversor de voltaje (VSI) está conectado a la red a través de un transformador. Las seis terminales de salida del transformador están conectadas en estrella. Estas seis terminales también se pueden conectar en delta para compensar una carga conectada en delta. En ese caso, cada transformador se conecta en paralelo con la carga correspondiente [3].

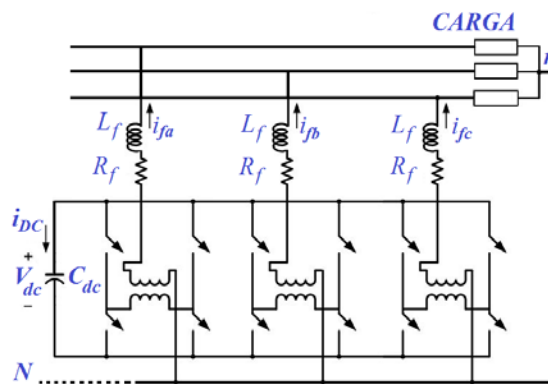


Fig. 1. Estructura del DSTATCOM.

El propósito de incluir los transformadores es para proporcionar un aislamiento entre las ramas del inversor. Esto previene que el capacitor de almacenamiento sea cortocircuitado a través de las ramas de los inversores tipo H. La inductancia L_f representa la inductancia de dispersión externa de cada transformador e inductancias adicionales, si las hubiera. Las pérdidas de conmutación de los inversores y las pérdidas del cobre del transformador de conexión están representadas por la resistencia R_f . Las pérdidas en el hierro del transformador para fines prácticos se desprecian. Para cargas conectadas en estrella, el punto neutro de los tres transformadores se conecta al neutro de carga. La línea punteada indica el 4to conductor y es conectado al neutro N del sistema, si está disponible.

La restricción más importante de estos inversores, es que la suma de la corriente a través de sus tres ramas debe ser cero. Así pues, no es posible compensar la corriente de secuencia cero que podría estar fluyendo en la carga, ni puede eliminar cualquier corriente de CD fluyendo hacia la fuente desde la carga. Esto da como resultado una distorsión en las corrientes de alimentación.

La topología que se muestra en la Figura 1 permite a los tres inversores inyectar corrientes de manera independiente. La corriente de CD saturaría los transformadores provocando calentamiento y aumento de las pérdidas reduciendo así la vida útil de los transformadores [4,5].

Una topología alternativa que permite la inyección de tres corrientes independientes incluyendo las de CD, que la carga puede extraer es propuesta en [6]. Esta topología contiene dos capacitores de almacenamiento de CD como se muestra en la Figura 2.

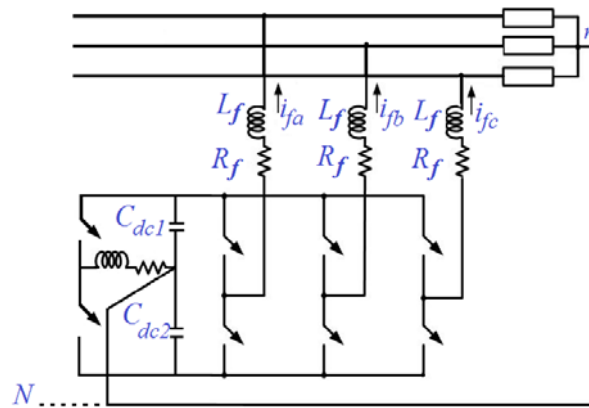


Fig. 2. Estructura del compensador usando inyección de tres corrientes.

En este circuito de unión (n') los dos capacitores están conectada al neutro de la carga. Esta topología proporciona un camino para la corriente de secuencia cero y por lo tanto las tres corrientes de compensación pueden ser controladas independientemente. Note que en esta configuración no hay transformador y cada rama del VSI está conectada al punto de acoplamiento común a través de un reactor de la interfaz. La inductancia L_f y la resistencia R_f en la Figura 2 representan una impedancia de interfaz. Otro componente importante de la topología de la Figura 2 es un circuito interruptor mostrado en la Figura 3 que está representado por los interruptores S_{ch1} y S_{ch2} , la inductancia L_p y la resistencia R_p . El propósito de este circuito es el de balancear las tensiones en los dos capacitores.

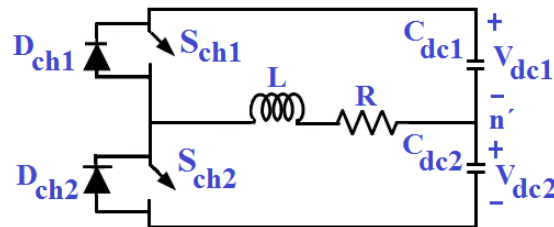


Fig. 3. Estructura del compensador usando inyección de tres corrientes.

A. Operación en modo voltaje del DSTATCOM

El propósito básico del DSTATCOM es compensar la carga inyectando corrientes de tal manera que el voltaje en PCC sea balanceado y sinusoidal, y que la corriente entregada por el sistema de potencia a la carga sea también balanceado y sinusoidal. Existen diferentes esquemas de compensación [6], [7]-[15]. La mayoría de estos esquemas de compensación asume el voltaje de la fuente balanceado y sinusoidal. En la práctica, las cargas se encuentran alejadas de las subestaciones de distribución y son alimentadas a través de sistemas de transmisión.

En una situación como esta, la fuente es ideal. Las corrientes de compensación calculadas por los algoritmos de compensación bajo estas condiciones son generadas usando fuentes convertidores de voltaje en un esquema de modulación por banda de histéresis, Como consecuencia de esto, las corrientes de compensación generadas por los convertidores contienen componentes armónicos. Estos distorsionaran voltajes en el PCC debido a la impedancia de los alimentadores. Ahora bien, este voltaje

distorsionado es tomado como el voltaje de entrada por los algoritmos de control, el cual como se ha mencionado con anterioridad, generalmente se asume balanceado y libre de armónicos. Como resultado de esto, los algoritmos de control generan corrientes de referencia erróneas y consecuentemente las corrientes de la fuente están distorsionadas y desbalanceadas. De esto, es fácil inferir que la directa aplicación de estos algoritmos de compensación con fuentes ideales resulta en voltajes distorsionados y desbalanceados en el PCC y corriente de la fuente severamente distorsionada y desbalanceadas.

En el presente artículo, el algoritmo utilizado será el propuesto en [6], bajo este algoritmo de compensación el DSTATCOM opera como un regulador de voltaje para mantener el voltaje en PCC. La magnitud de este voltaje es especificada mientras que su ángulo es generado de un lazo de control del capacitor de DC. Un controlador deadbeat [9] es usado en el convertidor para generar los voltajes de referencia. Con este algoritmo, el DSTATCOM es capaz de compensar el voltaje en el PCC sin importar si la distorsión o desbalance proviene de la carga, del sistema o de ambos.

B. Generación del voltaje de referencia

La magnitud del voltaje en PCC puede ser elegida arbitrariamente dentro de cierto límite. El límite inferior del voltaje v_t deberá escogerse por el máximo valor permisible de su ángulo $\delta (< \pi/2)$ con respecto al voltaje de la fuente, mientras que su valor máximo es fijado por la capacidad de los convertidores y el capacitor [9]. El control de retroalimentación se muestra en la Figura 4 P_{sh} es la potencia inyectada por el DSTATCOM. El bloque promediador es un ventana deslizante que promedia el valor de P_{sh} durante medio ciclo.

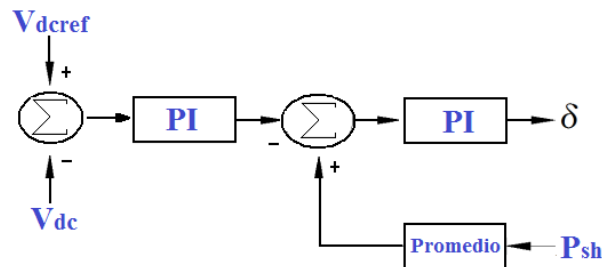


Fig. 4. Diagrama de bloques del control de lazo cerrado del voltaje.

C. Modelo simplificado del DSTATCOM en modo voltaje

Se ha desarrollado un modelo del DSTATCOM simplificado operando en modo voltaje. El modelo simplificado está basado en el principio de la conservación de la energía y toma en cuenta las pérdidas en el DSTATCOM así como el efecto de la inductancia en el transformador del compensador.

En el modelo detallado, los dispositivos de conmutación (IGBTs/diodos), el esquema de modulación por banda de histéresis, y el circuito de DC son explícitamente representados. En los modelos simplificados del DSTATCOM en modo voltaje la distorsión armónica de alta frecuencia introducida por las conmutaciones en el convertidor es despreciada.

D. Modelo simplificado basado en fuentes ideales de voltaje

En este modelo, el enlace entre el lado de DC y el lado de CA está bien representado por medio del principio de conservación de la energía. Los tres puentes convertidores tipo H son reemplazados por tres fuentes controladas de voltaje. La principal ventaja de este modelo es que permite el uso de pasos de integración más grandes que el modelo detallado. Además, el ciclo límite puede ser calculado usando un método de disparo y su estabilidad puede ser directamente calculada.

En la Figura 5 se muestra la representación esquemática del DSTATCOM operando en modo voltaje. Esencialmente este modelo se basa en que la consideración $v_{tx} = v_{tx}^*$ es cumplida, donde v_{tx}^* es el voltaje de referencia en PCC.

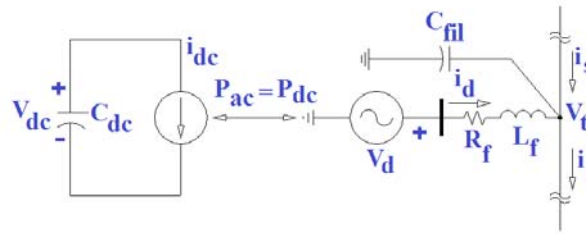


Fig. 5. Representación esquemática del modelo simplificado del DSTATCOM.

El voltaje de referencia en PCC v_{tx}^* es

$$v_{tx}^* = V_m \sin(\omega t - \delta - \phi_x) \tag{1}$$

y δ es calculada usando un controlador proporcional integral descrito por,

$$\delta = K_{p\delta} (\bar{P}_{sh} - P_{sh}^*) + K_{i\delta} \int (\bar{P}_{sh} - P_{sh}^*) dt \tag{2}$$

P_{sh} es la potencia promedio de la potencia instantánea P_{sh} que consume el DSTACOM y P_{sh}^* es su referencia; P_{sh} es dada por,

$$P_{sh} = v_{ta} i_{fa} + v_{tb} i_{fb} + v_{tc} i_{fc} \tag{3}$$

P_{sh}^* es obtenida como,

$$P_{sh}^* = K_{pdc} (v_{dc}^{average} - v_{dc}^*) + K_{idc} \int (v_{dc}^{average} - v_{dc}^*) dt \tag{4}$$

Donde v_{dc}^* es el voltaje de referencia en el capacitor de dc, $V_{dc}^{average}$ es el voltaje promedio a través del capacitor de dc.

El voltaje en las terminales del convertidor es,

$$v_{dx} = R_f i_{dx} + L_f \frac{di_{dx}}{dt} + v_{tx} \tag{5}$$

La corriente inyectada por el compensador es,

$$i_{dx} = -C_{fil} V_m \sin(\omega t - \delta - \phi_x) \left(\omega - \frac{d\delta}{dt} \right) + i_{lx} - i_{sx} \tag{6}$$

La primera derivada de i_{dx} es calculada como,

$$\frac{di_{dx}}{dt} = \frac{d(i_{ix} - i_{sx})}{dt} - C_{fil}V_m \left(\sin(\alpha\theta - \delta - \phi_x) \frac{d^2\delta}{dt^2} + \cos(\alpha\theta - \delta - \phi_x) \left(\omega - \frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right) \tag{7}$$

La dinámica del voltaje en el capacitor de dc es dada por,

$$C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} = - \frac{i_{da}v_{da} + i_{db}v_{db} + i_{dc}v_{dc}}{v_{dc}} \tag{8}$$

Donde

$$\begin{aligned} x &= a, b, c \\ \phi_a &= 0 \\ \phi_b &= 2\pi / 3 \\ \phi_c &= -2\pi / 3 \end{aligned} \tag{9}$$

$$\frac{d\delta}{dt} = K_{p\delta} \left(\frac{dP_{sh}}{dt} - K_{pv} \frac{dv_{dc}^{average}}{dt} \right) + K_{i\delta} (P_{sh} - P_{sh}^*) \frac{d^2\delta}{dt^2} = K_{p\delta} \left(\frac{d^2P_{sh}}{dt^2} - K_{pv} \frac{d^2v_{dc}^{average}}{dt^2} \right) + K_{i\delta} \left(\frac{dP_{sh}}{dt} - K_{pv} \frac{dv_{dc}^{average}}{dt} \right) \tag{10}$$

E. Modelo simplificado del DSTATCOM operando en modo voltaje basado en una banda histéresis cero

Al igual que para el DSTATCOM operando en modo corriente, únicamente tiene que cambiarse la curva de histéresis por un curva sigmoide para obtener un modelo simplificado del DSTATCOM operando en modo corriente.

En general, cualquier convertidor que sea modulado por banda de histéresis puede ser fácilmente representado a través de un modelo simplificado únicamente cambiando la curva de histéresis por una función sigmoide.

F. Comparación entre el modelo detallado y los modelos simplificados del DSTATCOM operando en modo voltaje

En esta sección, el desempeño de los modelos simplificados es comparado contra la solución obtenida con el modelo detallado propuesto en [10]-[11]. El sistema de prueba es el mostrado en la Figura 6 y sus parámetros son dados en la Tabla 1. La banda de histéresis es h=10. El voltaje de referencia en PCC es de 250 volts.

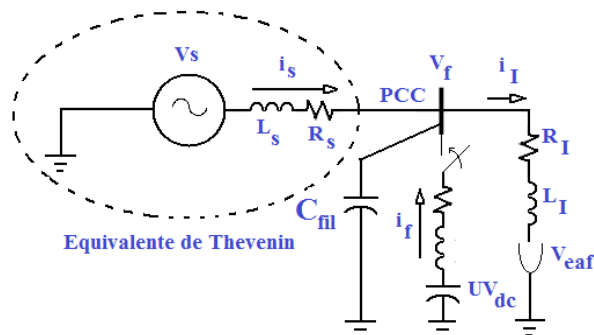


Fig. 6. Sistema de prueba.

Los parámetros eléctricos y del DSTATCOM están en la Tabla 1.

Tabla I. : Parámetros del sistema y del DSTATCOM en Modo Voltaje

Parámetros del sistema	Parámetros del DSTATCOM en modo voltaje
Voltaje del sistema (Vs):440 Volts (pico)	Ganancias del control de voltaje de dc: $k_{pdc}=154, k_{idc}=3500$
Impedancia del alimentador (Rs+jωLs):1+j7.54Ω	Ganancia del control de δ : $k_{p\beta}=27e-6, k_{i\delta}=8e-3$
Capacitor ca (Cdc):70μ	Capacitor de dc (Cdc):1500Mf
Impedancia del alimentador de la carga (R1+jωL1):0.5+j3.77Ω	Circuito de interface (Rf+jωLf): 0.05+j3.77Ω
Parámetros de EAF:k1=15, k2=0.05, k3=800, m=0 y n=2	Voltaje de referencia del capacitor de dc: 1200 Volts

Inicialmente el sistema está en estado estacionario y el interruptor s_w está abierto. En $t=0$ s el interruptor se cierra y el DSTATCOM comienza la compensación. La Figura 7 muestra las comparaciones entre el modelo detallado y el simplificado basado en fuentes ideales de voltaje. La Figura 7(a) muestra los resultados de la comparación para el ángulo δ , Figura 7(b) el voltaje en el capacitor de dc v_{dc} , y Figura 7(c) para la corriente de compensación i_{fa} . Estos resultados muestran estar en muy buena relación. El paso de integración empleado en el modelo detallado es de $1\mu s$ y de $60\mu s$ para el modelo simplificado basado en fuentes ideales de voltaje.

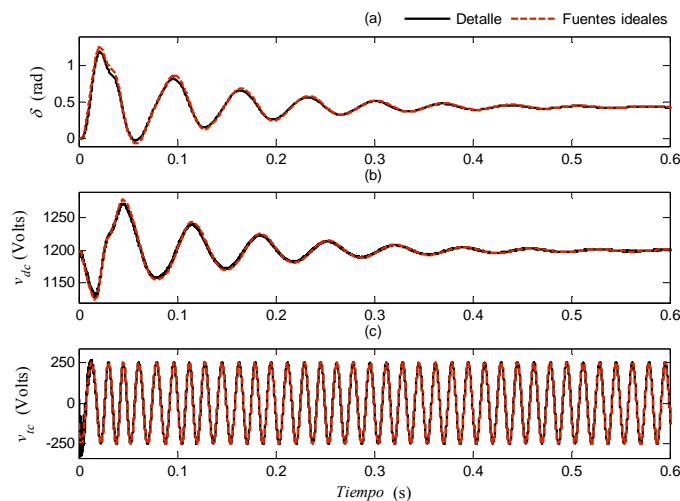


Fig. 7. Comparación entre el modelo detallado y el modelo simplificado basado en fuentes ideales de voltaje (a) ángulo de fase δ , (b) voltaje en el capacitor de dc v_{dc} , y (c) voltaje terminal en PCC v_{fc} .

La Figura 8 muestra las comparaciones entre el modelo detallado y el simplificado basado en fuentes ideales de voltaje. La Figura 8(a) muestra los resultados de la comparación para el ángulo δ , Figura 8 (b) el voltaje en el capacitor de dc, v_{dc} , y Figura 8 (c) para la corriente de compensación i_{fa} . El paso de integración empleado en el modelo detallado es de $1\mu s$ y de $20\mu s$ para el modelo simplificado basado en fuentes ideales de voltaje.

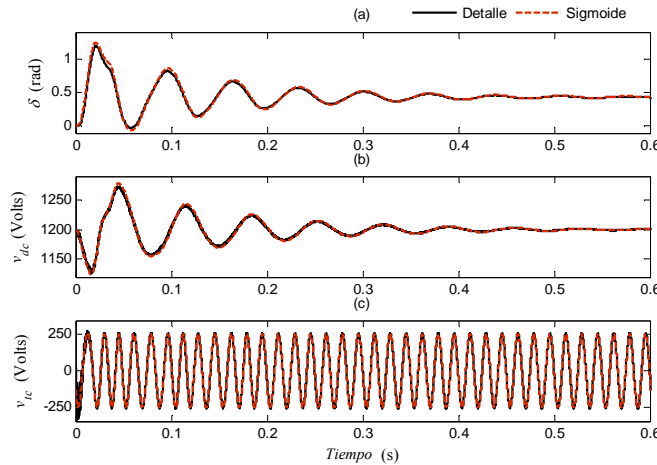


Fig. 8. Comparación entre el modelo detallado y el modelo simplificado sigmoide (a) ángulo de fase δ , (b) voltaje en el capacitor de dc v_{dc} , y (c) voltaje terminal en PCC v_{fc} .

Ambos modelos simplificados muestran tener un muy buen desempeño en comparación con el modelo detallado. Sin embargo, el modelo basado en fuentes de voltaje no es capaz de reproducir los transitorios más rápidos con tan buena precisión como el modelo sigmoide. La desventaja del modelo basado en fuentes de voltaje se debe a que asume explícitamente que los convertidores responden instantáneamente. Por otro lado, el modelo sigmoide es más preciso porque no asume una respuesta instantánea de los convertidores, sino la respuesta real asociada a su esquema de control. Además, este modelo es capaz de tomar en cuenta el algoritmo de control para los disparos de los dispositivos de conmutación.

Por ejemplo, puede observarse que las muescas en el voltaje a través del capacitor de DC son reproducidas por el modelo sigmoide. El transitorio rápido que aparece en el voltaje en PCC de la fase C es también capturado por el modelo sigmoide.

La diferencia entre el modelo detallado y el modelo sigmoide se debe principalmente a que el algoritmo de control de disparos es un esquema deatbeat; este tipo de esquemas dependen de la banda de histéresis y del paso de integración, ya que este algoritmo se está expresado en términos de ecuaciones en diferencias, por lo que el modelo matemático detallado del sistema eléctrico incluyendo el DSTATCOM es un sistema híbrido.

III. RESULTADOS

En este apartado se detalla un caso típico del uso del dispositivo mostrando algunos resultados del análisis de la simulación del sistema siguiente: Como se ha mencionado el propósito básico del DSTATCOM es compensar la carga donde el dispositivo estará expuesto a varios esquemas como se desarrolla a continuación, se estudia la respuesta dinámica y de estado estacionario, problemas de factor de potencia, SAGS, SWELLS, distorsión armónica y desbalance de fases. El circuito clásico de estudio multi/cargas se muestra en la Figura 9. La carga lineal Z_L es $Z_{La}=60 \Omega$, $Z_{Lb}=70 \Omega$ y $Z_{Lc}=80+j 70 \Omega$.

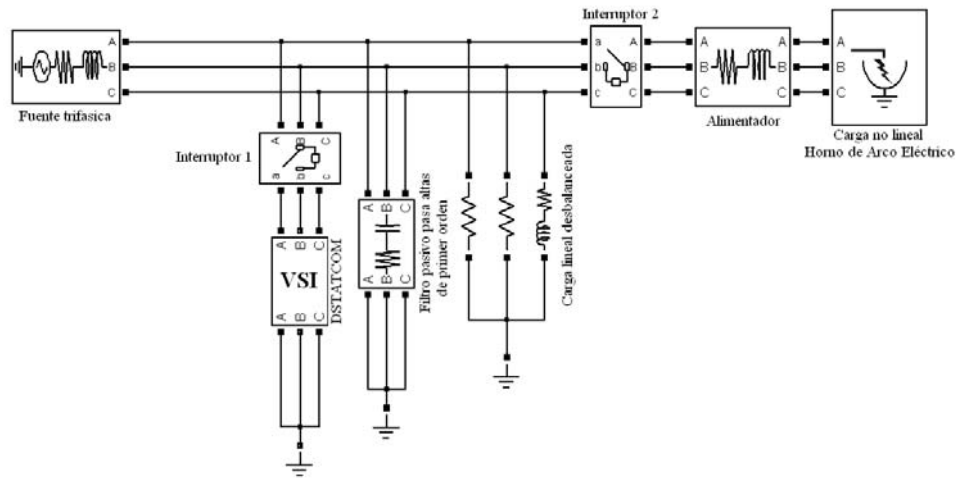


Fig. 9. Circuito clásico multi/cargas del DSTATCOM para diferentes casos.

En este modo el funcionamiento del DSTATCOM es esencialmente como un *regulador de voltaje* cuya enfoque es mantener el voltaje en el bus de carga en un valor definido, especificando su magnitud de voltaje en un valor de referencia, mientras que su ángulo de fase se determina por medio del control, teniendo un controlador independiente para cada convertidor determinando la magnitud del voltaje que el DSTATCOM debe generar.

Los resultados de la simulación como un regulador se presentan a continuación, la oscilación del voltaje v_t se desenvuelve como se aprecia en la Figura 10.

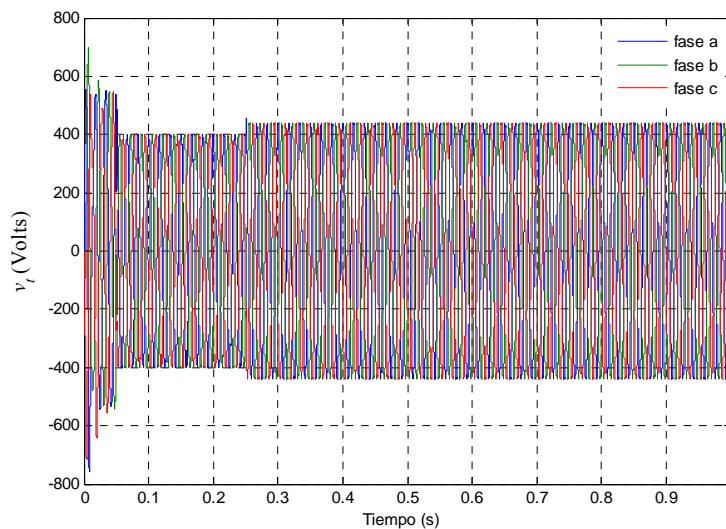


Fig. 10. Oscilación del voltaje v_t en un segundo.

En $t=0s$ el interruptor se cierra e inicia el proceso de regulación, el sistema inicialmente parte de cero y en un tiempo de $t=0.05s$ el regulador entra en operación, compensando y manteniendo la regulación de la magnitud del voltaje en 400 volts durante un tiempo de 0.05 s a 0.25 s. En 0.25 s se presenta un cambio en la referencia de voltaje del regulador de 400 volts a 440 volts; obsérvese que el voltaje en el bus de conexión cambia en un tiempo menor a un ciclo. En la Figura 10 se aprecia que una vez que el

dispositivo inicia la compensación, el voltaje v_t se regula inmediatamente en el valor deseado y cada una de las fases se mantiene balanceada.

En la Figura 11 se presenta la corriente de carga i_L ante la operación de multi/cargas. Desde $t=0$ s a $t=0.5$ s la única carga presente en el sistema de estudio es la carga lineal desbalanceada compuesta por un arreglo en paralelo de inductores y resistencias (ver Figura 9), y para $t>0.5$ s la carga total conectada al sistema es una combinación de la carga lineal desbalanceada en paralelo con un horno de arco eléctrico de corriente alterna. La carga lineal desbalanceada no distorsiona la corriente de carga, mientras que el horno de arco distorsiona severamente la forma de onda de la corriente de carga.

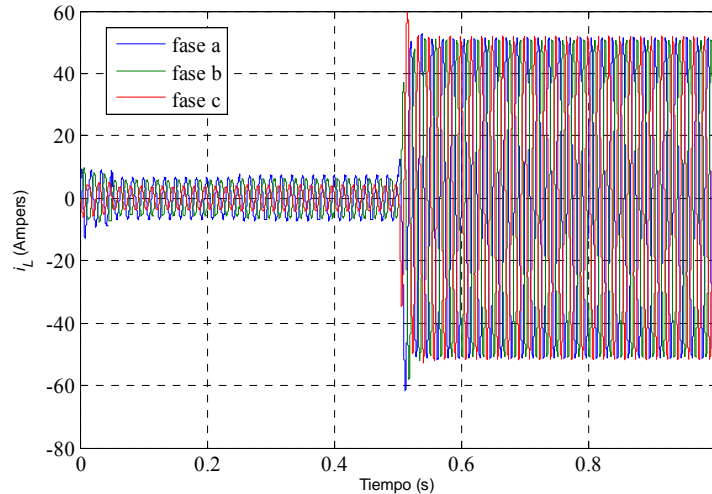


Fig. 11. Oscilación de la corriente i_L .

En la Figura 13 se presenta el ángulo de voltaje δ . Como se puede observar para cada cambio de carga y de voltaje de referencia existe un ángulo de carga. Además, a medida que la carga aumenta también lo hace el ángulo del voltaje.

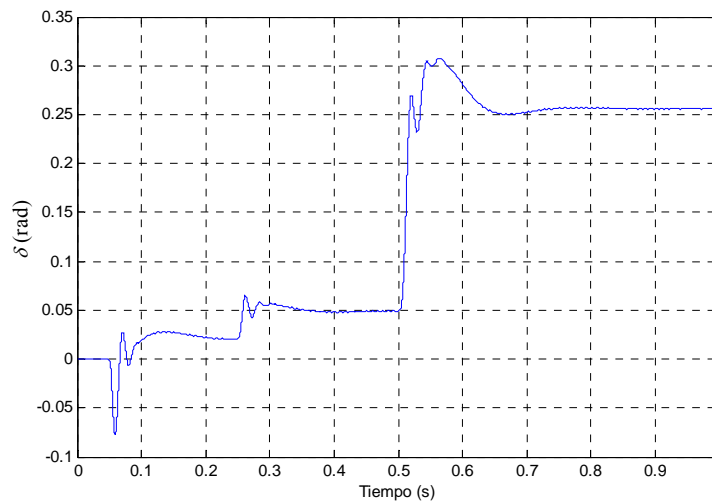


Fig. 12. Oscilación del ángulo delta

La Figura 14 presenta el voltaje en el capacitor de cd, con un valor de referencia de 1500 volts, el sistema se mantiene constante a partir del tiempo 0 hasta 0.05 s. En 0.05 s, entra el DSTATCOM a compensar la carga con un voltaje de referencia de 400 volts y en ese instante el voltaje en el capacitor de CD sufre un aumento súbito debido a la respuesta del controlador; sin embargo, en $t=0.06$ s el voltaje cae por debajo de la referencia de 1500 volts debido a que transitoriamente el DSTATCOM inyecta potencia activa almacenada en el capacitor en forma de voltaje; observe que para $t=0.2$ s el voltaje de DC ha alcanzado nuevamente el valor de referencia.

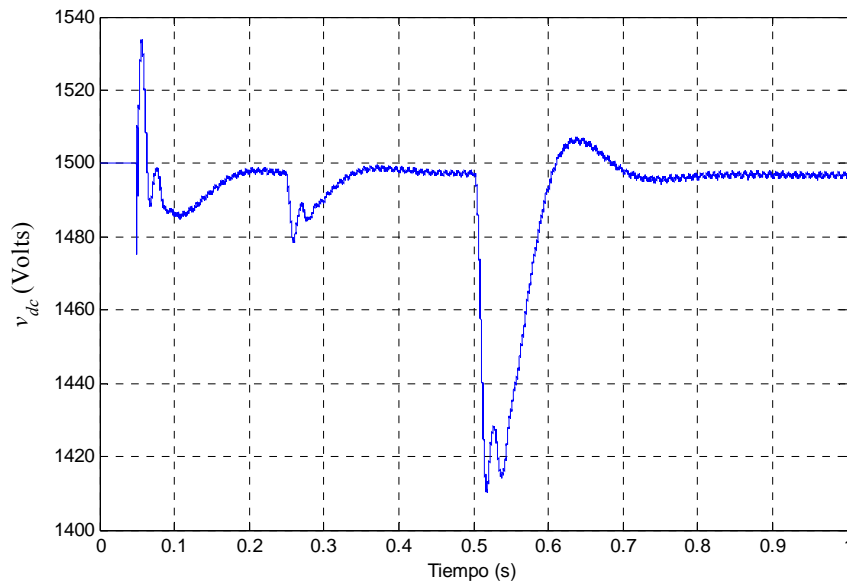


Fig. 13. Respuesta momentánea del voltaje DC

En el tiempo 0.25 s entra un cambio de referencia en el bus de carga de 400 a 440 volts, y nuevamente el voltaje de DC cae debido a que la carga conectada demanda una mayor potencia ya que el voltaje en el bus de carga ha aumentado y transitoriamente el DSTATCOM suministra potencia activa mientras el controlador alcanza un nuevo punto de operación en el que la potencia activa consumida por la carga es completamente suministrada por la fuente de voltaje v_s . En $t=0.5$ s se presenta un nuevo cambio de carga y nuevamente el capacitor experimenta una caída momentánea de voltaje.

IV. CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha presentado el análisis de regulación de voltaje en un sistema eléctrico mediante la inserción de un dispositivo de electrónica de potencia (DSTATCOM) conectado al PCC. Entre uno de los objetivos primordiales fue el realizar el análisis de un dispositivo compensador estático de distribución enfocado en la solución de problemas relacionados con la calidad de energía, ya que son estos disturbios son los que con mayor frecuencia afectan el desempeño de equipos eléctricos sensibles. Considerando lo anterior, se busca como prioridad lograr una regulación del voltaje de carga altamente confiable. Con el correcto funcionamiento del DSTATCOM es posible reducir el efecto que los problemas en el sistema de distribución ejercen del lado del usuario, siendo posible mejorar la operación y confiabilidad de los diferentes tipos de cargas conectadas.

REFERENCIAS

- [1] Hingorani, N. G. 1995. Introducing Custom Power. IEEE Spectrum. Jun 1995, Vol. 32, 6, pp. 41-48.
- [2] Hingorani, N. G. and Gyudyi, L. 2000. Understanding FACTS. New York: IEEE Press, 2000.
- [3] A. Ghosh and A. Joshi, "The use of instantaneous symmetrical components for balancing a delta connected load and power factor correction" Electric Power System Research, Vol.54, pp.67-74, 2000
- [4] J. Segundo, A. medina and A. Ghosh and G. Ledwich. Stability Analysis Based on Bifurcation Theory of the DSTATCOM Operating in Current Control Mode, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 24, NO. 3, JULY 2009
- [5] J. Segundo, A. medina G. Ledwich and A. Ghosh. "Nonlinear Oscillations Assessment of the DSTATCOM Operating in Voltage Control Mode" Electric Power Components and Systems Volume 38, Issue 12, 2010
- [6] G. Ledwich and A. Ghosh, "A flexible DSTATCOM operating in voltage or current control mode," IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., vol. 149, no. 2, pp.215-224, March 2002.
- [7] M. K Mishra, A. Ghosh and A. Joshi "A new STATCOM topology to compensate loads containing ac and dc components" IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Singapore, January, 2000.
- [8] Mahesh K. Mishra, A. Ghosh and A. Joshi, "Operation of a DSTATCOM in Voltage Control Mode", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 18, no. 1, pp- 258-264, 2003
- [9] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. IA-20, pp. 625-630, May/June 1984.
- [10] H. Akagi, A. Nabae, and S. Atoh, "Control strategy of active power filters using multiple voltage-source PWM converters," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. IA-22, no. 3, pp. 460-465, May/June 1986.
- [11] M.K. Mishra, A. Ghosh, and A. Joshi, "Load compensation for systems with non-stiff source using state feedback", Electric Power Systems Research, vol. 67, pp. 35-44, 2003.
- [12] A. Ghosh and G. Ledwich, "Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices", Norwell, MA. Kluwer, 2002.
- [13] A. Ghosh and G. Ledwich, "Load compensating DSTATCOM in weak AC systems", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 18, no. 4, pp.1302-1309, Oct. 2003
- [14] Acha E., Semlyen A., y Rajakovic N. "A Harmonic Domain Computation Package for Nonlinear Problems and its Application to Electric Arcs", IEEE Transactions on Power Delivery, vol 5, no. 3 July 1990, pp. 1390-1397.
- [15] A. Ghosh and A. Joshi, "A New Approach to Load Balancing and Power Factor Correction in Power Distribution Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 15, no.1, pp. 60-62, 1998.