

- ▶ En un sistema eléctrico de potencia, la compensación de potencia y la estabilidad del sistema pueden ser mejorados a través del uso de un **D-Statcom monofásico y trifásico**



Compensación de energía reactiva mediante el uso de un D-Statcom monofásico y trifásico

Compensation of Reactive Power Using D-Statcom Single and Three Phase

RESUMEN

El compensador sincrónico estático es muy empleado en la aplicación de sistemas de potencia y dispositivos FACTS (sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna). En general, el factor de potencia y la estabilidad de un sistema pueden ser mejorados con el uso de un D-STATCOM. En este trabajo se presentan las etapas del diseño, simulación y control de un D-STATCOM monofásico y trifásico.

ABSTRACT

The static synchronous compensator is very employed in the implementation of power systems and FACTS devices. In general, the power factor and stability of a system can be improved using the D-STATCOM. In this paper, we describe the design, simulation and control stage of a single and three phase D-STATCOM.

INTRODUCCIÓN

En el control de sistemas eléctricos de potencia, la compensación de potencia reactiva constituye un problema importante. Este factor puede ocasionar un incremento de las pérdidas en el sistema de transmisión, o reducir la capacidad de transmisión, y su variación puede causar oscilaciones en el voltaje final de la carga así como de la potencia.

Existen soluciones de estado sólido eficientes para el control de la potencia reactiva. Una de ellas es el D-STATCOM (compensador estático sincrónico de distribución), dispositivo de conmutación

propia de electrónica de potencia, que inyecta una corriente casi sinusoidal de magnitud variable en el punto de conexión del sistema. El D-STATCOM es capaz de un elevado desempeño dinámico y su compensación no depende del voltaje de acoplamiento común, por lo que es muy efectivo durante perturbaciones en el sistema de potencia.

Debido a que el sistema de potencia es cada vez es más complejo y hay una tendencia al incremento de cargas no lineales conectadas a este sistema, es necesario estudiar las características dinámicas del D-STATCOM y las alternativas para mejorar la capacidad transitoria. Los métodos de control recientemente estudiados se pueden revisar en [1], [7], [9], [10]. Los algoritmos de control del D-STATCOM se basan de preferencia en el modelo dinámico más que en el diagrama fasorial.

MODELO MATEMÁTICO DEL D-STATCOM TRIFÁSICO

El circuito equivalente de un D-STATCOM trifásico con fuente de tensión se muestra en la figura 1 [1].

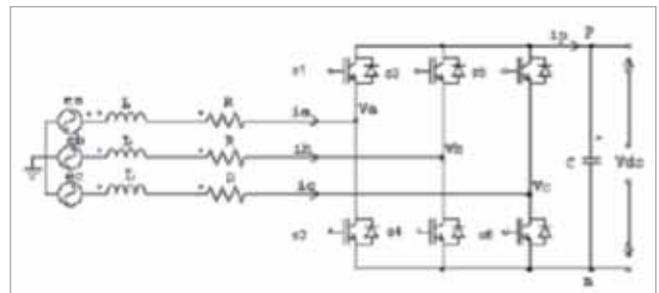


Figura 1. Circuito equivalente de D-STATCOM [1]



Palabras Claves

D-Statcom, FACTS (sistemas flexibles de transmisión de CA), control de potencia, compensación, sistema de potencia.

Key words

D-STATCOM, FACTS (Flexible AC Transmission Systems), Power Control, Compensation, Power System.

Del circuito equivalente presentado en la figura 1, podemos derivar el modelo matemático de D-STATCOM (ecuación 22). De los principios de electrónica de potencia, se tiene:

$$i_p = \begin{bmatrix} D_{ap} - D_{bp} \\ D_{bp} - D_{cp} \\ D_{cp} - D_{ap} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde:

D_{kp} son funciones de conmutación y $k = a, b, c$

Además:

$$\begin{bmatrix} V_a - V_b \\ V_b - V_c \\ V_c - V_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{ap} - D_{bp} \\ D_{bp} - D_{cp} \\ D_{cp} - D_{ap} \end{bmatrix} V_{pn} \quad (2)$$

Al resolver para cada una de las ramas, se obtiene:

$$\begin{cases} Ri_a + L \frac{di_a}{dt} = e_a - V_a \\ Ri_b + L \frac{di_b}{dt} = e_b - V_b \\ Ri_c + L \frac{di_c}{dt} = e_c - V_c \end{cases} \quad (3)$$

Considere que:

$$L \frac{di_{ab}}{dt} = \frac{1}{3} L \left(\frac{di_a}{dt} - \frac{di_b}{dt} \right) \quad (4)$$

Si se reemplaza esta ecuación en la anterior, tenemos:

$$\begin{cases} L \frac{di_{ab}}{dt} = \frac{1}{3} [(e_a - e_b) - (V_a - V_b)] - i_{ab}R \\ L \frac{di_{bc}}{dt} = \frac{1}{3} [(e_b - e_c) - (V_b - V_c)] - i_{bc}R \\ L \frac{di_{ca}}{dt} = \frac{1}{3} [(e_c - e_a) - (V_c - V_a)] - i_{ca}R \end{cases} \quad (5)$$

Al aplicar la ecuación (2) en la ecuación (5), y llevarla a la matriz, se llega a:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} = \frac{1}{3L} \begin{bmatrix} e_a - e_b \\ e_b - e_c \\ e_c - e_a \end{bmatrix} - \frac{1}{3L} \begin{bmatrix} D_{ap} - D_{bp} \\ D_{bp} - D_{cp} \\ D_{cp} - D_{ap} \end{bmatrix} V_{pn} - \frac{R}{L} \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} \quad (6)$$

y

$$C \frac{dV_{pn}}{dt} = i_p = \begin{bmatrix} D_{ap} - D_{bp} \\ D_{bp} - D_{cp} \\ D_{cp} - D_{ap} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} \quad (7)$$

El modelo matemático representado por la serie de la ecuación (1) a la ecuación (7) corresponde a un sistema trifásico. Para simplificar este modelo se utilizará la transformación de Park (convierte un sistema trifásico en componentes ortogonales e invariantes en el tiempo), considerando una referencia rotativa a una velocidad angular w , se tiene.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ 0 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

y

$$P = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(wt) & \cos\left(wt - \frac{2}{3}\pi\right) & \cos\left(wt + \frac{2}{3}\pi\right) \\ -\sin(wt) & -\sin\left(wt - \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(wt - \frac{2}{3}\pi\right) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Donde:

i_d : componente de la corriente activa
 i_q : componente de la corriente reactiva

Al usar la inversa de la transformación de Park, tenemos:

$$\begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} i_a - i_b \\ i_b - i_c \\ i_c - i_a \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Donde:

$$T^{-1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -\sin\left(wt - \frac{1}{3}\pi\right) & \cos\left(wt - \frac{1}{3}\pi\right) & 1 \\ \sin(wt) & -\cos(wt) & 1 \\ -\sin\left(wt + \frac{1}{3}\pi\right) & \cos\left(wt + \frac{1}{3}\pi\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Finalmente, la corriente en el eje directo y en cuadratura será:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Similarmente, para las tensiones y las funciones de conmutación (D), tenemos:

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} e_{ab} \\ e_{bc} \\ e_{ca} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} D_d \\ D_q \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} D_{ab} \\ D_{bc} \\ D_{ca} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Al aplicar la ecuación (13) y (14) a la ecuación (6):

$$\frac{dT^{-1}}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + T^{-1} \begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} = \frac{1}{3L} T^{-1} \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} - \frac{1}{3L} T^{-1} \begin{bmatrix} D_d \\ D_q \end{bmatrix} V_{pm} - \frac{R}{L} T^{-1} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (15)$$

Si tomamos los principios de sistemas de potencia:

$$\begin{bmatrix} e_d = V_m \\ e_q = 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$T \frac{dT^{-1}}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & -w \\ w & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Si se multiplica T a ambos lados de la ecuación (15) y se aplica la ecuación (17) obtenemos:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & w & -\frac{D_d}{3L} \\ -w & -\frac{R}{L} & -\frac{D_q}{3L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ V_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{3L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} V_m \quad (18)$$

Al reajustar la ecuación 18 tenemos:

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L} i_d + i_q w - \frac{V_{dc}}{3L} D_d + \frac{1}{3L} V_m \quad (19)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L} i_q - i_d w - \frac{V_{dc}}{3L} D_q \quad (20)$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{3}{2C} i_d D_d + \frac{3}{2C} i_q D_q \quad (21)$$

Finalmente, para representar la dinámica del D-STATCOM, en una representación espacio-estado, se tiene:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ V_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & w & -\frac{D_d}{3L} \\ -w & -\frac{R}{L} & -\frac{D_q}{3L} \\ \frac{3}{2C} D_d & \frac{3}{2C} D_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ V_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{3L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} V_m \quad (22)$$

La ecuación (22) completa el modelo dinámico del D-STATCOM. En este se observan los estados de los lazos dinámicos del D-STATCOM: i_d, i_q , y V_{dc} . EL valor V_m puede ser considerado como parámetro del sistema. Las variables de control son D_d, D_q .

IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL ENERGÉTICO V_{dc}

Para el diseño del lazo de control de la compensación de potencia en derivación, se debe trabajar con una función de transferencia que relacione todos los términos de potencia con la variación de energía. En la figura (2) se representa la estructura final del controlador energético del sistema de compensación.

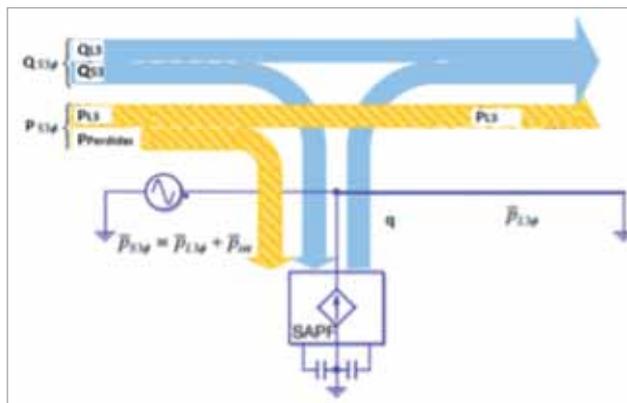


Figura 2. Estructura del controlador energético. Elaboración propia.

Para evaluar el comportamiento del controlador se medirán los tiempos de respuesta del dispositivo. Ello nos permitirá evaluar las capacidades del compensador en la potencia consumida por la carga. La figura (3) muestra el diagrama de bloques del controlador utilizado [11].

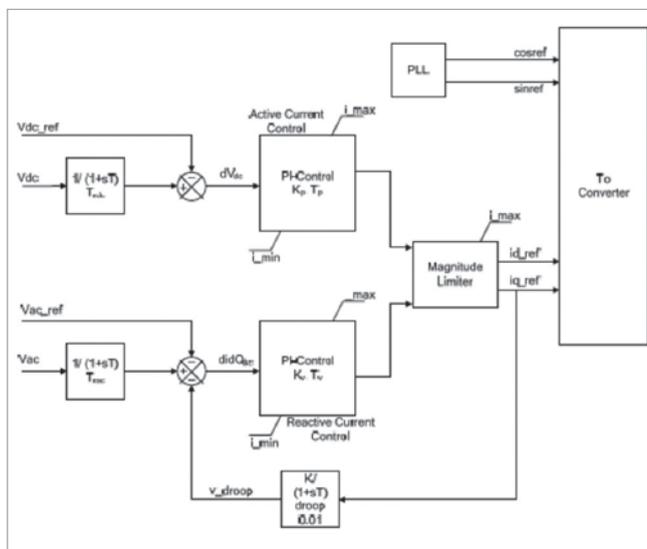


Figura 3. Diagrama de bloques del controlador [11].

Las salidas de referencia del controlador son las corrientes en el eje directo y de cuadratura (i_d, i_q), las cuales son necesarias para calcular el intercambio de potencia reactiva entre el sistema y el D-STATCOM.

SIMULACIÓN DEL D-STATCOM MEDIANTE EL USO DE PSIM

Puesto que el D-STATCOM es usado para la compensación de potencia reactiva en sistemas de potencia, las variables de res-

puesta del sistema de control deben ser constantes. Asimismo, D_d y D_q debe estar entre $[-1, +1]$ y el rizado de la forma de onda de corriente debe ser bajo para que la distorsión armónica obtenida sea pequeña.

En las figuras (4) y (5) se aprecia el comportamiento de la corriente de salida del D-STATCOM considerando una potencia capacitiva e inductiva de la carga.

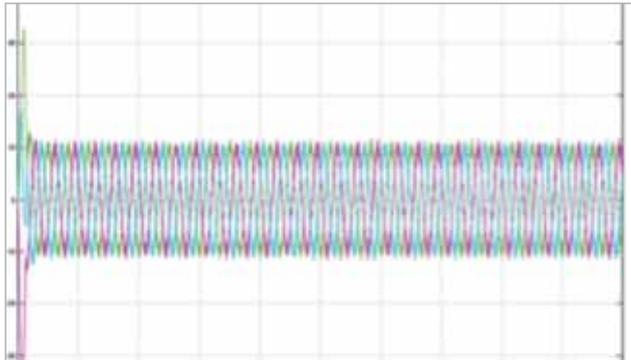


Figura 4. Corriente de salida del D-STATCOM trifásico con potencia reactiva capacitiva.

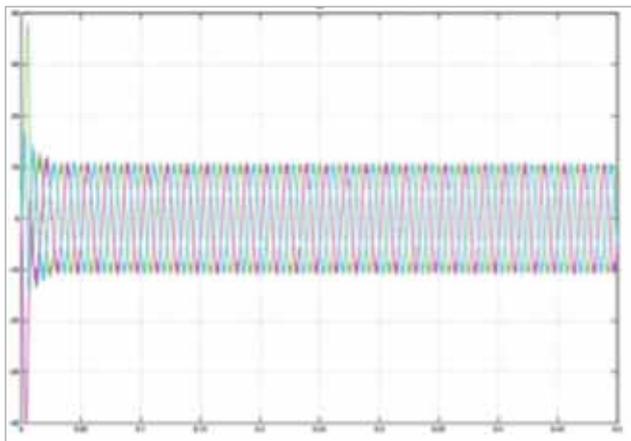


Figura 5. Corriente de salida del D-STATCOM trifásico con potencia reactiva inductiva.

Como se observa en las figuras (4) y (5), el convertidor tiene un rizado en la corriente debido al efecto de la conmutación, pero dicha corriente presenta un comportamiento estable, que es lo que se esperaba del controlador.

También se llevó a cabo el diseño y simulación de un D-STATCOM monofásico. Las figuras (5) y (6) muestran el comportamiento de la corriente de salida del convertidor y la tensión del condensador.

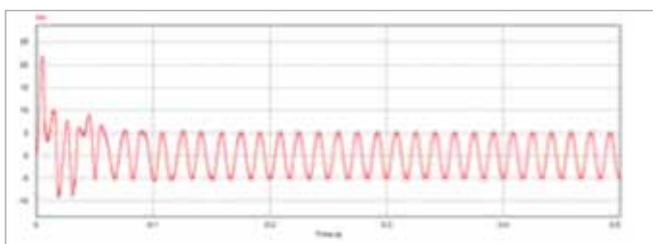


Figura 6. Corriente de salida del convertidor para una potencia reactiva capacitiva en un D-STATCOM monofásico.

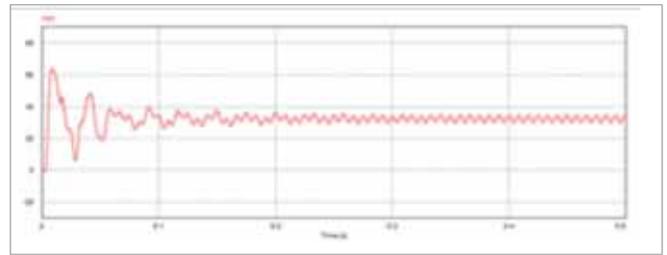


Figura 7. Tensión del condensador para una potencia reactiva capacitiva en un D-STATCOM monofásico.

Se observan, además, los tiempos de respuesta del controlador para corriente de salida y la tensión V_{dc} del STATCOM.

CONCLUSIONES

El D-STATCOM tiene la capacidad de producir potencia reactiva inductiva o capacitiva, a partir de la misma energía que le entrega la red.

Las simulaciones mostraron que la frecuencia de conmutación de los IGBT es de 10 kHz. Esto produce un rizado con corrientes pico de 1.5 A en el compensador trifásico y de 0.5 A en el compensador monofásico.

Si existe un flujo de potencia reactiva en el compensador, la tensión del convertidor presenta un rizado, que deberá ser eliminado.

Para el control de un D-STATCOM, una solución sencilla y rápida es utilizar controladores PI.

Se deben considerar diferentes fallas en el sistema para evaluar si ello influye en el tamaño del D-STATCOM.

REFERENCIAS

- [1] Xing, L. (2003). A comparison of pole assignment & LQR design methods for multivariable control for STATCOM. Tesis de Maestría, The Florida State University, Florida.
- [2] Venkata, P. & Rama, S. (2014). "Compensation of Reactive Power Using D-Statcom". IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering.
- [3] Canizares, C. "Power flow and transients stability models of facts controllers for voltage and angle stability studies" Proc. Of IEEE/PES Winter Meeting Singapore, January 2000.
- [4] Grainger, J. & Stevenson, W. Análisis de Sistemas de Potencia. McGraw Hill.
- [5] Kundur P. (1994). Power System Stability and Control. McGraw-Hill.
- [6] Hingirani, N. (1998). "Flexible AC Transmission". IEEE Spectrum, 30 (4), pp. 40-45.
- [7] Anderson, P. (1994). Power System Control and Stability. IEEE Press.

- [8] Vlachogiannis, J. G. (2000). "FACTS applications in load flow studies effect on the steady state analysis of the Hellenic transmission system", *Electric Power Systems Research*, 55, (3), pp. 179-189.
- [9] Rao, P.; Crow, M. L. & Yang, Z. (2000). "STATCOM control for power system voltage control applications". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 15 (4), pp 1311-1317.
- [10] Sensarma, P. S.; Padiyar, K. R. & Ramanarayanan, V. (2001). "Analysis and performance evaluation of a distribution STATCOM for compensating voltage fluctuations". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 16 (2), pp. 259-264.
- [11] Aditya, J. (2008). Application of STATCOM for improved dynamic performance of wind farms in a power grid. Tesis de Maestría, Missouri University of Science and Technology, Estados Unidos.

ACERCA DE LOS AUTORES

María Teresa Mendoza Llerena

Ingeniero Electricista por la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de San Agustín (UNSA), Arequipa, Perú, 2003. Msc., Departamento de Máquinas Eléctricas, Accionamientos y Energía de la Universidad Federal de Rio Grande do Sul (UFRGS), Brasil, 2006.

Doctor por el Departamento de Sistemas de Control y Energía por la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Computación (FEEC) de la Universidad Estadual de Campinas (UNICAMP), Brasil, 2011. Actualmente es docente en el Área de Medidas Eléctricas, Instrumentación y Máquinas Eléctricas en Tecsup, Arequipa.

@ mmendoza@tecsup.edu.pe

Baldomero Néstor Enríquez Ychocan

Ingeniero Electricista por la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de San Agustín (UNSA), Arequipa, Perú, 2012. Actualmente es jefe de Oficina Técnica Área Eléctrica e Instrumentación de Graña y Montero, en el proyecto de Expansión de la mina Cerro Verde en Arequipa.

@ nbenriquez@gmail.com