

# Sintonización de parámetros y ubicación de un SVC para amortiguar Oscilaciones Electromecánicas

J. Hernández, P. Maya-Ortiz, G. Becerra  
Facultad de Ingeniería-UNAM  
Coyoacán DF 04510, México  
paulm@dctrl.fi-b.unam.mx  
Teléfono: (52)-55-56223125

**Resumen**—En este artículo se presenta la sintonización de parámetros de un Compensador estático de VAR's (SVC), usando el método de los residuos, y su ubicación en el sistema de potencia, con la finalidad de amortiguar las oscilaciones electromecánicas que se presentan cuando el sistema es sujeto a una perturbación. En una situación de esta naturaleza, el SVC se emplea para aumentar el amortiguamiento del sistema lo que ayuda en la reducción de las oscilaciones. Para ilustrar el resultado se emplea el sistema IEEE de 3-máquinas y 9-buses. Los resultados de simulación demuestran la viabilidad del método.

**Palabras clave:** Sistemas de potencia, SVC, Ubicación de Compensadores, Oscilaciones electromecánicas.

## I. INTRODUCCIÓN

En Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) el amortiguamiento de oscilaciones electromecánicas es necesario para contrarrestar la aceleración y desaceleración de los generadores cuando ocurre una perturbación. Esto es, cuando un generador acelera, el ángulo de rotor incrementa ( $d\delta/dt > 0$ ), la potencia eléctrica demandada debe incrementarse para compensar el exceso de energía mecánica de entrada. Consecuentemente, cuando el generador desacelera, el ángulo de rotor decrece ( $d\delta/dt < 0$ ), y la potencia eléctrica demandada debe decrecer para balancear el déficit de potencia mecánica de entrada. El estabilizador del sistema de potencia (PSS) ha sido colocado estratégicamente en las unidades de generación para amortiguar oscilaciones locales, pero su efecto es mínimo ante oscilaciones de tipo inter-área. El SVC es un dispositivo FACTS en derivación basado en electrónica de potencia y elementos estáticos que, además de proporcionar regulación de voltaje de bus, ha sido utilizado para el amortiguamiento de oscilaciones electromecánicas. Sin embargo, el capital invertido y los costos de operación por los dispositivos FACTS pueden ser considerables, es por esto que surgen cuestiones muy importantes en el uso de estos, como lo son la ubicación y las estrategias de control necesarias para su utilización.

El análisis modal presenta una metodología que permite determinar características dinámicas del SEP como frecuencias de oscilación, modos de oscilación y factores

de amortiguamiento. Mediante el análisis modal y con el uso de los índices de controlabilidad y observabilidad modal se han ubicado compensadores (Messina, 1999), (Kulmar, 2007) y (Cheng, 2007). En este artículo se ubica al dispositivo compensador por el método de residuos los cuales pueden ser calculados a partir de los índices de observabilidad y controlabilidad modal como en (Yang, 1998), (Martins, 1989), (Aboul, 1996) y (Dejan, 1991). El cálculo de los parámetros para el compensador ha sido realizado mediante el ángulo de compensación proporcionado por el suplemento del argumento del residuo (Yang, 1998) y (Aboul, 1996), metodología inicialmente aplicada a la sintonización del PSS (Dejan, 1991). En este artículo se propone obtener el ángulo de compensación que debe proporcionar el dispositivo compensador SVC a partir del argumento del residuo, diseñando así los parámetros de la etapa de compensación.

En la Sección II se proporciona el modelo lineal del SEP y del SVC. En la Sección III revisamos las bases del uso de análisis modal y la manera de obtener los residuos para determinar la ubicación del SVC además del diseño de los parámetros del mismo. La Sección IV presenta el análisis y resultados de simulación para un punto de operación del sistema de 3 máquinas y 9 buses. La Sección V presenta las conclusiones.

## II. MODELO

El sistema eléctrico de potencia multi-máquina se expresa como un conjunto de ecuaciones algebro-diferenciales no lineales de la forma

$$\dot{x} = f(x, z, u) \quad (1)$$

$$0 = g(x, z, u) \quad (2)$$

para  $m$  máquinas síncronas con reguladores de voltaje en una red de  $n_b$  buses, donde el conjunto de ecuaciones (1) involucran la dinámica de las máquinas síncronas y el conjunto de ecuaciones (2) representa restricciones de balance de potencia en la red,  $x \in R^{n_x}$  representa los estados del sistema,  $z \in R^{2(n_b+m)}$  son variables algebraicas

como corriente y voltaje,  $u \in R^p$  representa señales de entrada (Sauer, Pai, 1998).

Por otra parte, el modelo dinámico lineal del SVC está representado por la función de transferencia  $H(s)$ ,

$$H(s) = KH_1(s) \quad (3)$$

donde

$$H_1(s) = \left( \frac{1}{1 + sT_m} \right) \left( \frac{1 + sT_{v1}}{1 + sT_{v2}} \right)^{m_c} \left( \frac{1}{1 + sT_{SVC}} \right) \quad (4)$$

En la expresión 4, la constante de tiempo  $T_{SVC}$  representa el tiempo de respuesta del circuito de conmutación de los tiristores,  $T_m$  es la constante de tiempo que representa un retardo por la acción de medición,  $T_{v1}$  y  $T_{v2}$  son las constantes de tiempo que representan el bloque de regulación de voltaje,  $m_c$  representa el número de etapas de compensación y  $K$  es una ganancia (Pal, 2005).

Para aplicar el método de los residuos, el conjunto de ecuaciones (1)-(2) es linealizado alrededor de un punto de equilibrio, considerando los valores de equilibrio de la red ( $x_0, z_0, u_0$ ), lo que conduce a una representación en el espacio de estados multivariable de la forma

$$\Delta \dot{x} = A\Delta x + B\Delta B_b \quad (5)$$

$$\Delta V = C\Delta x + D\Delta B_b \quad (6)$$

donde  $\Delta V \in R^{n_b}$  y  $\Delta B_b \in R^{n_b}$  representa las variaciones de la amplitud de voltaje y susceptancia de bus respectivamente.

La Figura 1 muestra el sistema con el SVC,  $G(s)$  representa el SEP y  $H(s)$  representa el SVC.

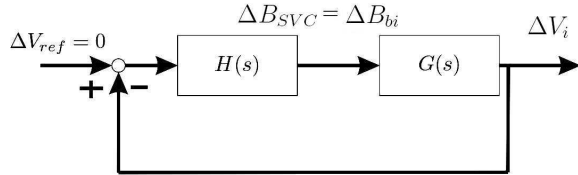


Figura 1. Lazo de conexión del SVC

Cabe señalar que el SVC trabaja con señales locales, por lo que la función de transferencia  $\Delta V/\Delta B_b$ , utiliza  $\Delta V_i/\Delta B_{bi}$  del  $i$ -ésimo bus (el bus donde será conectado el SVC), para  $i = 1, 2, \dots, n_b$ . Bajo la consideración anterior, la función de transferencia de una sola entrada y una sola salida que resulta de (5)-(6),

$$G(s)_{ii} = \frac{\Delta V_i}{\Delta B_{bi}} = c_i(sI - A)^{-1}b_i + d_{ii} \quad (7)$$

donde  $c_i$  es el  $i$ -ésimo vector fila de la matriz de salida,  $b_i$  es el  $i$ -ésimo vector columna de la matriz de entrada, y  $d_{ii}$  es el elemento  $ii$  de la matriz de transmisión directa. El objetivo es encontrar la ubicación del compensador SVC donde se pueda proporcionar la mayor compensación.

### III. ANÁLISIS MODAL

El análisis modal es una metodología basada en el cálculo de los valores y vectores propios de la matriz de estado  $A$ , y es un procedimiento matemático conveniente para analizar el sistema de manera desacoplada y que permite identificar las variables  $\Delta V_i$  y  $\Delta B_{bi}$  con las cuales el SVC podrá proporcionar la mayor amortiguación de oscilaciones.

Puede notarse que los valores propios complejos conjugados, obtenidos de la matriz de estado  $A$  corresponden a modos de oscilación (Chen, 1984) del sistema, y la parte imaginaria es la frecuencia de oscilación,

$$\lambda = \sigma \pm j\omega \quad (8)$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (9)$$

mientras que el factor de amortiguamiento está dado por

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}}. \quad (10)$$

Así, se considera que el par valores propios con menor coeficiente de amortiguamiento son los valores propios críticos, y en ellos se centra el análisis, porque son dominantes en la respuesta transitoria.

#### III-A. El Método de los Residuos

La función de transferencia (7), puede ser expresada en términos de los residuos y los valores propios del sistema como,

$$G(s)_{ii} = \sum_{k=1}^{n_x} \frac{R_{iik}}{s - \lambda_k} + d_{ii} \quad (11)$$

donde  $R_{iik}$  es el residuo asociado al  $k$ -ésimo modo, la  $i$ -ésima entrada y la  $i$ -ésima salida.  $R_{iik}$  se calcula mediante,

$$R_{iik} = c_i \Phi_k \Psi_k b_i \quad (12)$$

donde  $\Phi_k$  y  $\Psi_k$  son los vectores propios derecho e izquierdo, asociados al  $k$ -ésimo modo.

Cuando se expresa (11) en fracciones parciales, es apreciable que las magnitudes de los residuos dependen tanto de los polos como de los ceros y las magnitudes relativas de los residuos determinan la importancia relativa de las componentes de la forma desarrollada de  $G(s)_{ii}$ . Esto es, si hay un cero lejos (cerca) de un polo, el residuo de este polo es grande (pequeño) y la componente relativa de la respuesta transitoria asociada a este polo se vuelve grande (pequeña). Así, si  $R_{iik}$  es el residuo de mayor módulo entonces la respuesta transitoria de  $\Delta V_i/\Delta B_{bi}$  del  $i$ -ésimo bus,  $i = 1, \dots, n_b$ , presenta más oscilaciones, ya que la componente relativa del modo de oscilación crítico es mayor, por lo que es necesario compensar en el  $i$ -ésimo bus para reducir las oscilaciones electromecánicas.

En general, para todo sistema, la magnitud del residuo con mayor módulo indica la ubicación de dispositivo compensador, para sistemas de fase no mínima el ángulo de compensación que debe proporcionar el SVC es tomado como en (Yang, 1998), (Aboul, 1996) y (Dejan, 1991), pero para sistemas de fase mínima (Skogestad, 2004) el

argumento del residuo indica el ángulo de compensación que debe proporcionar el SVC para desplazar al polo a la izquierda del plano complejo como lo muestra la Figura 2.

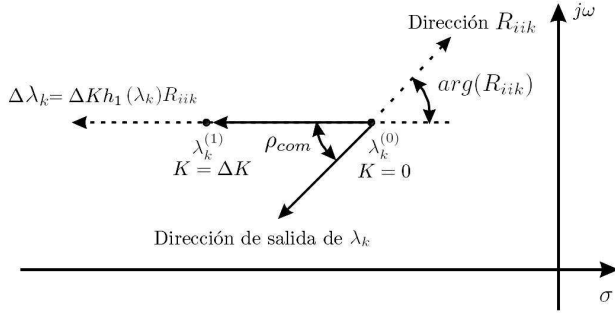


Figura 2. Valor propio crítico y el efecto de compensación

Si el argumento del residuo cumple con  $arg(R_{iik}) = \rho_{com} \geq \pi/2$  rad se necesitan dos etapas de compensación. Por lo anterior los parámetros de la etapa de compensación son calculados por las siguientes ecuaciones (Alex, 2011),

$$\rho_{com} = arg(R_{iik}) \quad (13)$$

$$\alpha_c = \frac{1 - \sin\left(\frac{\varphi_{com}}{m_c}\right)}{1 + \sin\left(\frac{\varphi_{com}}{m_c}\right)} \quad (14)$$

$$T_{v2} = \frac{1}{\omega_i \sqrt{\alpha_c}} \quad (15)$$

$$T_{v1} = \alpha_c T_{v2} \quad (16)$$

donde,

$arg(R_{iik})$  es el argumento del residuo  $R_{iik}$ ,

$\alpha_c$  se denomina factor de atenuación,

$\omega_i$  es la frecuencia del modo de oscilación en  $rad/seg$ ,

$m_c$  es el numero de etapas de compensación.

Con la magnitud del residuo se determina la ubicación del SVC y con el argumento del residuo se determinan los parámetros de la etapa de compensación del SVC. La ganancia  $K$  del SVC es seleccionada a partir de construir el lugar geométrico de las raíces y obtener la mayor compensación posible.

#### IV. CASO DE ESTUDIO

Se considera el sistema WSCC de 3 máquinas y 9 buses que se muestra en la Figura 3 (Sauer, Pai, 1998). Para determinar el punto de operación en que se realizó el análisis, se repartió la carga real demandada entre las máquinas síncronas en función de las constantes de inercia.

El SEP en ese punto de operación es asintóticamente estable de acuerdo a los valores propios obtenidos de la matriz de estado  $A$ . El par de valores propios críticos, su frecuencia de oscilación y el factor de amortiguamiento se muestra en la Tabla I,

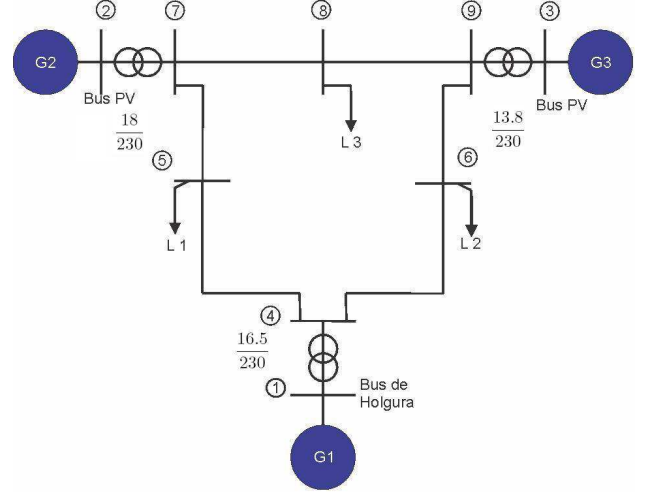


Figura 3. WSCC 3 máquinas y 9 buses

| $\lambda$             | $f$ (Hz) | $\zeta$ |
|-----------------------|----------|---------|
| $-0,1768 \pm 4,3946i$ | 0.6994   | 0.0402  |

TABLA I

VALORES PROPIOS CRÍTICOS

En la Tabla II se muestran los residuos asociados al modo de oscilación crítico para las funciones de transferencia  $\Delta V_i / \Delta B_{bi}$ ,  $i = 1, \dots, 9$ , obtenidos a partir de (12), donde el residuo de mayor módulo está asociado al bus 2, por lo cual se determina que la ubicación del dispositivo compensador SVC es el bus 2.

| No. de BUS Ubicación | Residuo $ \cdot $ | Residuo $\angle$ rad |
|----------------------|-------------------|----------------------|
| 1                    | 0.0343            | -1.3845              |
| 2                    | 0.1045            | 1.1318               |
| 3                    | 0.0601            | 1.2117               |
| 4                    | 0.0244            | -1.4344              |
| 5                    | 0.0145            | 0.9952               |
| 6                    | 0.0583            | -1.6107              |
| 7                    | 0.0601            | 1.6948               |
| 8                    | 0.0889            | 1.1735               |
| 9                    | 0.0238            | 1.6355               |

TABLA II

RESIDUOS

De la función de transferencia  $G_{22}$  se determina que el sistema es de fase mínima y a partir del argumento del residuo se diseñan las constantes de tiempo  $T_{v1}$  y  $T_{v2}$  mostradas en la Tabla III para una etapa de compensación ( $m_c = 1$ ) del SVC, las constantes de tiempo  $T_{SVC}$  y  $T_m$  se seleccionan de  $10ms$  (Pal, 2005). La ganancia  $K$  es seleccionada a partir del lugar geométrico de las raíces con el fin de obtener el mayor amortiguamiento posible como lo muestra la Figura 4.

El coeficiente de amortiguamiento  $\zeta$  de SEP cuando el SVC está conectado en el bus 2 se muestra la Tabla IV, comparando las Tablas I y IV, claramente el factor

|      |       |           |          |          |
|------|-------|-----------|----------|----------|
| K    | $T_m$ | $T_{SVC}$ | $T_{v1}$ | $T_{v2}$ |
| 21.6 | 10 ms | 10 ms     | 0.0508 s | 1.0200 s |

TABLA III  
PARAMETROS DE SVC

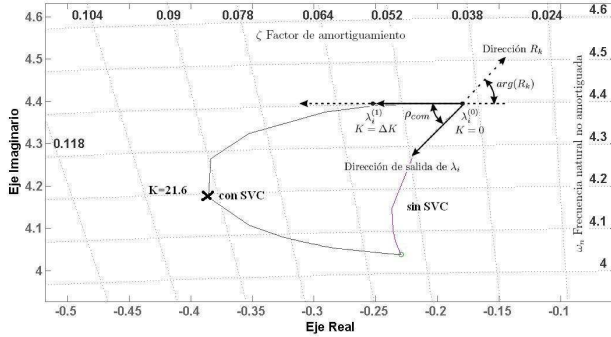


Figura 4. Lugar de raíces

de amortiguamiento es aumentado con el desplazado a la izquierda del plano complejo por la acción de compensación del SVC como lo muestra la Figura 4.

| $\lambda$ con SVC     | $f$ con SVC | $\zeta$ con SVC |
|-----------------------|-------------|-----------------|
| $-0,3856 \pm 4,1733i$ | 0.6642      | 0.0920          |

TABLA IV  
VALOR PROPIO CRÍTICO

A partir de los resultados mostrados en la Tabla IV y en la Figura 4 es evidente que se mejora el desempeño del SEP con la ubicación y con el diseño de los parámetros del SVC a partir de los residuos.

#### IV-A. Simulaciones

El SEP es sometido una perturbación tipo pulso de 1 seg. de duración, que consiste en la variación del 25% en las potencias activa y reactiva en el bus 5, donde la carga instalada es de  $P_{L5} = 1,25 p.u.$  y  $Q_{L5} = 0,5 p.u.$  Los resultados de simulación de la respuesta del SEP se muestran en las siguientes figuras.

Las desviaciones angulares de las unidades de generación exhiben un transitorio de alrededor de 25 segundos de duración sin el SVC y, cuando el SVC es ubicado en el bus 2 la respuesta transitoria dura alrededor de 15 segundos, lo que demuestra los resultados obtenidos de la Tabla 4 y de la Figura IV. El máximo sobrepaso no muestra un cambio significativo por la compensación.

Las velocidades angulares de las unidades de generación, figuras 7 y 8, sin el uso del SVC muestran una respuesta transitoria superior a los 25 segundos, mientras que al colocar el SVC esta respuesta tiene una duración de 10 segundos aproximadamente, por lo que es muy notorio el efecto de compensación.

La variación de susceptancia por parte del SVC en el bus 2 se muestra en la Figura 9, alrededor de 15 seg con

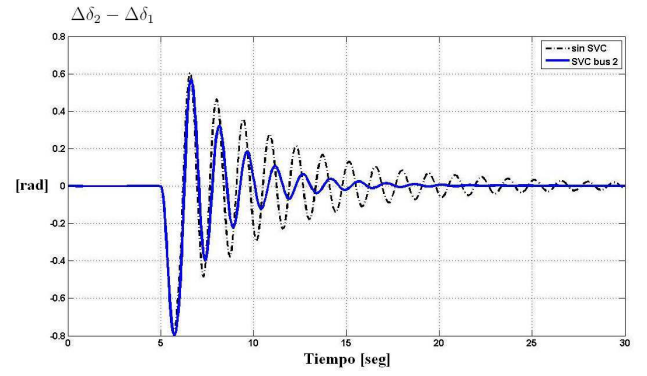


Figura 5. Variación de ángulo de rotor de máquina síncrona 2

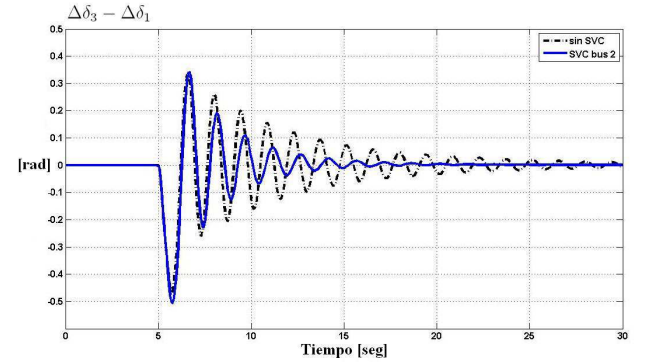


Figura 6. Variación de ángulo de rotor de máquina síncrona 3

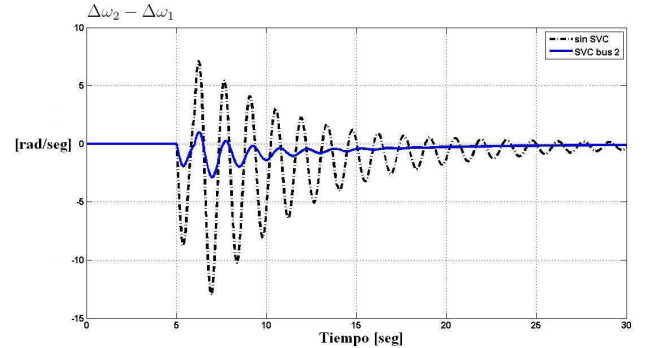


Figura 7. Variación de velocidad angular de la máquina síncrona 2

un máximo pico de 0.1 p.u. con lo cual se consigue el amortiguamiento de oscilaciones electromecánicas mejorando así el desempeño del SEP.

## V. CONCLUSIONES

Con la información que proporcionan los residuos es posible obtener tanto la ubicación de dispositivos compensadores como el diseño de sus parámetros. Se presentó una nueva metodología basada en el argumento de los residuos para el diseño de los parámetros de compensación. Los resultados numéricos y las simulaciones en el tiempo para un punto de operación demostraron la efectividad del método de los

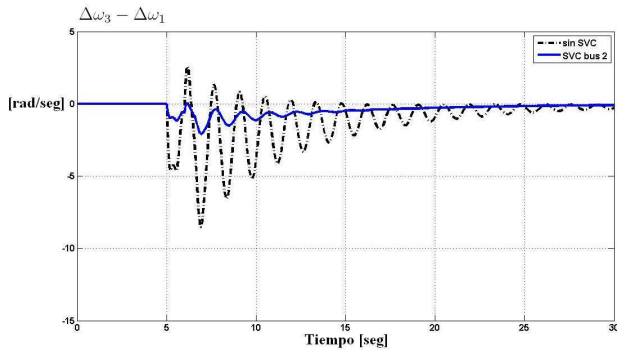


Figura 8. Variación de velocidad angular de la máquina síncrona 3

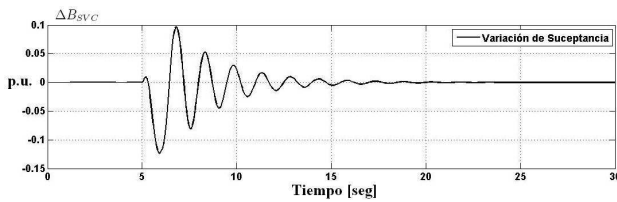


Figura 9. Variación de susceptancia del SVC en bus 2

residuos y de la nueva metodología para el diseño de los parámetros del compensador SVC.

#### REFERENCIAS

- P.W. Sauer and M.A. Pai (1988) *Power System Dynamics and Stability*. Prentice-Hall, USA.
- N.G. Hingorani and L. Gyugyi (2000) *Understanding FACTS*. IEEE Press, USA.
- S. Skogestad and I. Postlethwaite (2004) *Multivariable Feedback Control*. John Wiley and Sons, England.
- C.T. Chen (1984) *Linear System Theory and Design*. Holt, Rinehart and Winston, N.Y.
- A.R. Messina, and M. Nayebzadeh (1999) An Efficient Placement Algorithm of Multiple Controllers for Damping Power System Oscillations. *Power Engineering Society Summer Meeting, 1999. IEEE* 1280 -1285 vol.2.
- B. Kalyan Kulmar, S.N. Singh and S.C. Srivastava (2007) Placement of FACTS controllers using modal controllability indices to damp out power system oscillations. *IET Gener. Transm. Distrib.*
- Y. Yuan, L. Cheng, Y. Sung and G. Li (2007) Placement of SVCs and Selection of Stabilizing Signals Based on Observability and Controllability. *IEEE Trans. on power Systems*, Vol. 22, No. 3, August.
- N. Yang, Q.H. Liu, and J.D. McCalley (1998) TCSC Controller Design for Damping Interarea Oscillations. *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 13, May, pp. 1304-1310.
- M.E. Aboul-Ela, A.A. Salam, J.D. McCalley and A.A. Fouad (1996) Damping Controller Design for Power System Oscillations Using Global Signals. *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 11, No. 2, May, pp. 767-773
- Dejan R. and O. Stojic (1991) Stabilization of Multimodal Electromechanical Oscillations by Coordinated Application of Power System Stabilizers. *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 6, No. 4, Nov.
- J.A. Hernández (2011) *Ubicación de FACTS para Sistemas Eléctricos de Potencia usando Análisis Modal y Descomposición en Valores Singulares*. M.Eng. Thesis, UNAM, México.
- R. Sadiković (2006) *Use of FACTS Devices for Power Flow Control and Damping Oscillation in Power System*. Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.
- L. Cai (2004) *Robust Coordinated Control of FACTS Devices in Large Power Systems*. Thesis, Universität Duisburg-Essen.

- N. Martins and L. Lima (1989) Determination of Suitable location for Power Systems Stabilizers and Static VAR Compensators for Damping Electromechanical Oscillations in Large Power Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 5, No. 4.
- B. Pal and D. Chaudhuri (2005) *Robust Control in Power Systems*. Springer, London.
- X.P. Zhang, C. Rehtanz and B. Pal (2006) *Flexible AC Transmission Systems: Modeling and Control*. Springer, Germany.