

Metodología de sintonización de un control PI para SVC

Methodology of tuning PI control for SVC

Alfonso Álzate G., Catalina González C., Christian Sepúlveda L.
Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia

alalzate@utp.edu.co
catalinagc@utp.edu.co
chrisdavid1205@utp.edu.co

Resumen—En este artículo se presenta una metodología de sintonización para un control PI de un Static Var Compensator (SVC) instalado en un sistema de potencia. Esta metodología permite calcular la ganancia proporcional e integral de acuerdo con el valor de impedancia de línea del sistema y las características de regulación de tensión del dispositivo SVC. El presente documento expone la aplicación de la metodología en varios sistemas de prueba usando el paquete PSCAD.

Palabras Claves— Compensación reactiva, control PI, regulación de tensión, SVC, TCR, TSC.

Abstract—This article presents a methodology for tuning PI control of a Static Var Compensator(SVC) installed in a power system. This process allows to calculate the proportional and integral gain, according to the line impedance value and system voltage regulation characteristics of the SVC device. This paper outlines the application of the methodology in several test systems using PSCAD package.

Keywords— Reactive compensation, PI control, voltage regulation, SVC, TCR, TSC. INTRODUCCIÓN.

I. INTRODUCCIÓN

A causa del aumento de cargas no lineales en los Sistemas de Potencia Eléctricos, se producen perturbaciones en la red, las cuales originan que la tensión y la frecuencia en los sistemas no sean constantes. Así mismo las fallas eléctricas pueden producir la conexión y desconexión de cargas en la red, estableciendo variación de tensión en los puntos de conexión del sistema eléctrico.

Existen dispositivos capaces de controlar estos tipos de problemas en la red como lo son los FACTS (Flexible AC transmission system); uno de estos dispositivos es el SVC, este último provee un control de tensión rápido para

soportar la transmisión de potencia eléctrica durante e inmediatamente después de una perturbación.

El SVC da una excelente compensación reactiva en derivación controlable para el control de voltaje dinámico a través de la utilización de dispositivos reactivos conmutables controlables como los tiristores a alta velocidad.

En este trabajo se presenta una metodología de sintonización para un control PI en la etapa de regulación de tensión del SVC. Realizando pruebas con el simulador PSCAD/EMTDC, el cual posee un paquete de desarrollo del SVC y a su vez se realizan pruebas con valores típicos de 2 Sistemas de Potencia eléctrica.

II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA SVC

El SVC está construido por los siguientes componentes observados en la Figura 1:

- Transformador acoplado.
- Válvulas de tiristores.
- Inductores
- Capacitores

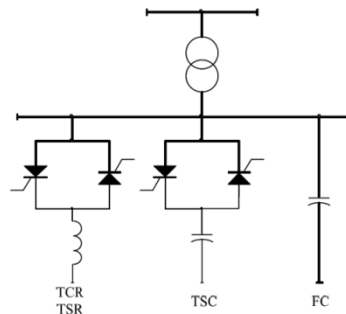


Figura 1. Diagrama del SVC

Las dos válvulas de tiristores controlables y conmutables, son el

inductor controlado por tiristor (TCR) el cual da una susceptancia continuamente variable y el capacitor conmutado por tiristor (TSC), este ultimo proporciona una respuesta escalonada. [1]

El compensador SVC maneja las siguientes etapas:

- **Sistema de medición:** mide el voltaje de secuencia positiva a ser controlado.
- **Regulador de tensión:** usa el error de tensión (la diferencia entre V_{svc} y la tensión de referencia V_{ref}), para determinar la susceptancia SVC B_{svc} necesaria para mantener la tensión del voltaje.
- **Unidad de distribución:** determina que TSC's deberá ser conmutado y calcula el ángulo de disparo de los TCR's. [2]

En el presente trabajo hará énfasis en las 2 primeras etapas, ya que la unidad de distribución se realiza a partir del ángulo de disparo hallado con la etapa de regulación de tensión.

I. SISTEMA DE MEDICIÓN

El sistema de potencia es modelado por un generador representado por una fuente de tensión V_s y por una impedancia equivalente X_s . La característica V - I del sistema, se determinan obteniendo el equivalente de Thévenin del circuito desde los terminales de la barra, cuyo voltaje es regulado por el SVC. [3]

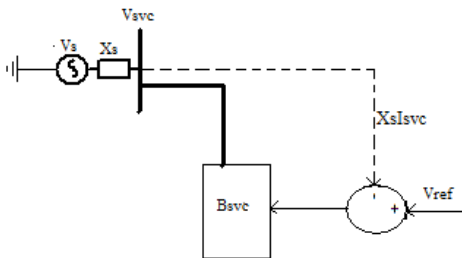


Figura 2 Circuito equivalente del sistema de potencia y del sistema de control SVC.

La característica del sistema se puede expresar mediante:

$$V_{svc} = V_s - X_s I_{SVC} \tag{1}$$

I_{SVC} es la corriente del bus del SVC.

X_{SL} es la relación de la pendiente o inclinación.

La medición del V_{svc} se realiza a partir de las características del SVS, dentro del rango de control definido por la pendiente de la reactancia X_{SL} como se muestra a continuación:

$$V_{svc} = V_{ref} + X_{SL} I_{SVC} \tag{2}$$

El sistema de carga de línea y las características de compensación del SVC están dados por la Figura 3

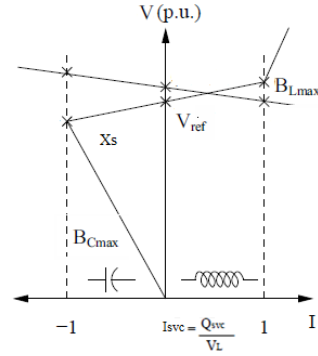


Figura 3. Características de regulación del SVC.

La pendiente de la característica V-I está definida como la relación del cambio de la magnitud de tensión al cambio de la magnitud de corriente sobre el rango de control lineal del compensador. [4]

I_{svc} se halla a partir de la medición de Q_{svc} y de la tensión en el bus SVC, V_{svc} .

$$I_{SVC} = \frac{Q_{SVC}}{V_{SVC}} \tag{3}$$

Donde Q_{SVC} es la potencia nominal en MVar del transformador del SVC.

II. REGULADOR DE TENSIÓN

El regulador de tensión es de tipo P-I. La ganancia del sistema es K_{Nmax} [3]. El controlador es determinado por [3], tal como lo indica la ecuación (4):

$$G_R(s) = K_p \left\{ 1 + \frac{1}{sT_y} \right\} = \frac{1}{2(K_{SL} + K_{Nmax})} \left\{ 1 + \frac{1}{sT_y} \right\} \tag{4}$$

$$K_{Nmax} = \frac{\Delta V}{B_{SVC}} \tag{5}$$

K_N es la ganancia del sistema, que relaciona la tensión del SVC con la susceptancia.

B_{SVC} Es las susceptancia del transformador del SVC.

T_y representa el máximo retraso cuando la referencia de B_{TCR} (susceptancia del TCR) cambia del máximo B_L a cero.

Si se asume que la tensión del sistema sobre la tensión nominal se acerca a la unidad, entonces la ganancia del sistema por unidad es expresado por:

$$K_N = \frac{Q_{SVC}}{S_c} \approx X_{TH} \tag{6}$$

Donde S_C es la potencia de corto circuito del sistema y X_{TH} es su impedancia de thevenin equivalente.

Se parte de los valores de la simulación svc_acsystems PSCAD para hallar los parámetros del regulador de tensión [5]. La tensión base línea a línea es de 130 kV y la tensión en el lado primario del transformador del SVC es de 120 kV. En la Figura 4 se observan los valores de la carga y de la impedancia del sistema de potencia.

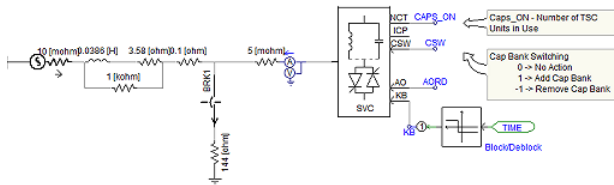


Figura 4. SVC conectado a un sistema a.c

La tensión del sistema es de 130 kV, la impedancia base, se halla con la tensión del transformador del lado primario, los datos bases de la línea son 120 kV y 100 MVA,

$$X_{base} = \frac{120^2}{100} = 144\Omega \quad (7)$$

El valor anterior es la impedancia de carga, la impedancia equivalente R L del sistema se muestra a continuación:

$$15.44\Omega \angle 75^\circ$$

El siguiente valor es la impedancia en p.u del sistema equivalente

$$X_s = \frac{15.44}{144} = 0.1 p.u \angle 75^\circ \quad (8)$$

Teniendo la impedancia equivalente del sistema y de acuerdo con la ecuación (6) $K_{Nmax}=0.1$ p.u.

Para calcular K_p , se utiliza la ecuación (5); con $k_{SL}= 0.03$

$$K_p = \frac{1}{2*(k_{SL}+K_N)} = \frac{1}{2*(0.03+0.1)} = 3.84 \quad (9)$$

Como la respuesta es más rápida cuando $K_N=K_{NMax}$ entonces se tiene la relación de $T_w=2T_y=8.33ms$; por ello se determina que $T_y=0.004s$. [2]

A partir de la siguiente ecuación, se obtiene la constante integral:

$$K_i = \frac{K_p}{T_y} = \frac{3.84}{0.004} = 960$$

$$(10)$$

$$T_i=0.001s$$

Cuando no se tiene los valores base del sistema, se puede utilizar el cálculo de la potencia de falla simétrica inicial del sistema, para el cálculo su ganancia en la base del transformador SVC.

$$jx_s = 15.44 \sin 75 = j14.91\Omega \quad (11)$$

$$S_c = \frac{V_b^2}{jx_s} = \frac{120^2}{14.91} = 965 MVA \quad (12)$$

Donde V_b es la tensión base del sistema.

El dispositivo SVC en la simulación maneja los siguientes valores: un total de reactivos de 100 MVA, un total de capacitivos de 167 MVA y una potencia nominal del transformador de 200 MVA.

$$K_{Nmax} = \frac{Q_{SVC}}{S_c} = \frac{200}{965} = 0.21 p.u \quad (13)$$

El sistema a.c tiene una potencia de corto circuito de 965 MVA, dando una impedancia de 0.21 p.u en la base del transformador del SVC. [5]

Con este valor de K_n se obtiene un $K_p=2.1$ utilizando la ecuación (9).

Tenemos $K_{nmax}=0.21$ y $K_{nmin}=0.1$.

Con la ecuación $T_w = 2 \left(\frac{K_{SL}+K_{Nmax}}{K_{SL}+K_N} \right) T_y$, y con $T_y=0.004s$, se determina $TW=0.014s$.

La respuesta es más rápida con $K_{nmax}=0.21$, por lo tanto, se tiene el siguiente tiempo de integración:

$$T_i = \frac{1}{K_i*(k_{SL}+K_{Nmax})} = \frac{1}{960*(0.03+0.21)} = 0.004s \quad (14)$$

El tiempo de respuesta del sistema es de $3T_w$ es decir de 0.04s.

Los valores para el control PI utilizados son $K_p=3.8$ p.u y $T_i=0.004s$; el tiempo de respuesta es de 0.04 [s], la respuesta del sistema se puede observar en la Figura 5.

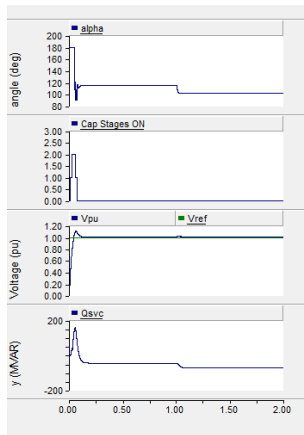


Figura 5. Respuesta del sistema, tensión en el SVC.

En la Figura 5 el eje de tiempo es en segundos, el tiempo de establecimiento es de 0.12s para la tensión en p.u del SVC, esta respuesta ocurre a partir de la conexión de la carga al sistema, con un máximo sobrepaso del 12% y un tiempo de establecimiento ante la desconexión de la carga igual a 0.06s, esta desconexión sucedió en el primer segundo de la simulación.

El punto de equilibrio del sistema al conectarse un SVC esta dado por las características del sistema y del SVC utilizando las ecuaciones (1) y (2) [6]. La solución de las ecuaciones citadas son: $V_{svc}=1.01p.u$ e $I_{svc}=0.33p.u$.

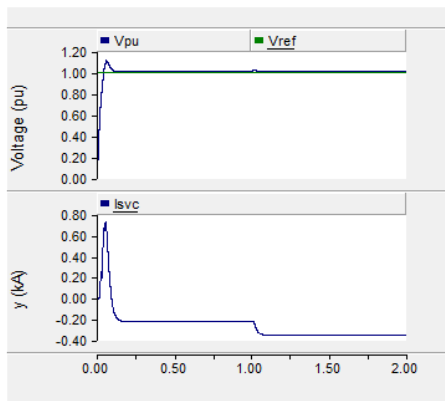


Figura 6. Punto de equilibrio al conectar el SVC

El sistema de potencia a.c utilizando el controlador propuesto, se establece en 0.05 [s] ante una desconexión de la carga en 1 seg y después de finalizada como se observa en la Figura 7.

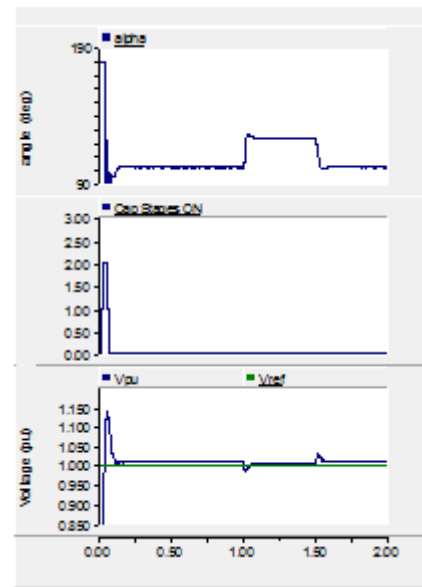


Figura 7. Sistema a.c en PSCAD con una falla

III. SISTEMAS DE PRUEBA UTILIZANDO EL MODELO DE SIMULACION PSCAD

Se presentan 2 sistemas de prueba, los cuales son representados por una impedancia equivalente y una carga como se ve en la Figura 8. Los datos del sistema se encuentran la Tabla 1. Se tiene $K_{SL}=3\%$. [7]

Datos del sistema		
AC		
	SISTEMA 1	SISTEMA 2
R1	0,6 Ω	0,3 Ω
R2	200 Ω	2000 Ω
R3	0,1 Ω	0,1 Ω
R4	300 Ω	300 Ω
L1	0,3 H	0,023 H
L2	0,2 H	0,2 H
V1	120 kV	120 kV
Datos del SVC (+167/-100)		
Total reactivos	100 MVA	
Total capacitivos	167 MVA	
Voltajes transformador	120kV/12.65kV	

MVA transformador	200 MVA
Xps Xpd Xsd	0,17 p.u 0,17 p.u
Resistencia Rcp	167 Ω

Tabla 1. Datos del sistema.

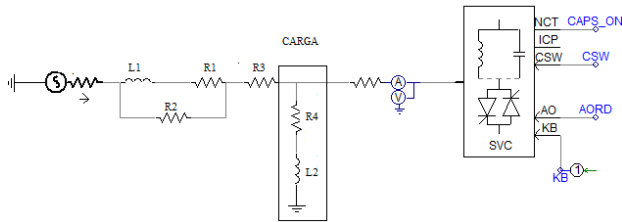


Figura 8. Configuración del sistema de prueba

A. Controlador del SVC para el Sistema 1

De acuerdo con los datos de la Tabla 1, se tiene la impedancia equivalente RL del sistema:

$$98.26 \Omega \angle 60.3^\circ$$

Con una reactancia de línea igual a $j85.3 \Omega$

Se halla la reactancia en p.u del sistema utilizando las ecuaciones (12) y (13)

$$S_{c \min} = \frac{V_b^2}{jx_s} = \frac{120^2}{85.3} = 169 MVA \quad (15)$$

$$K_{N \max} = \frac{Q_{SVC}}{S_c} = \frac{200}{169} = 1.2 p.u \quad (16)$$

$$K_p = \frac{1}{2*(k_{SL} + K_{N \max})} = \frac{1}{2*(0.03 + 1.2)} = 0.4 \quad (17)$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_y} = \frac{0.4}{0.004} = 100 \quad (18)$$

Ti=0.01s

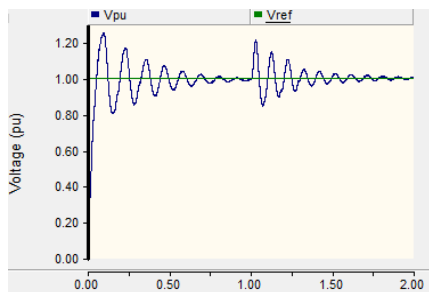


Figura 9. Tensión en p.u del SVC sintonizado con el método analítico (kp=0.4 Ti=0.01) para el Sistema 1

De acuerdo con la Figura 9, para valores altos de X_{TH} ($K_n=1.2 p.u$) el sistema puede ser inestable [8]. Para estos casos es necesaria la reducción de la constante de

integración o la utilización de otros métodos de sintonización del controlador PI como Ziegler y Nichols [9]. Con este método se obtiene un valor crítico ($K_{cr}=7$), para este valor la respuesta muestra oscilaciones sostenidas; el periodo de estas oscilaciones es de $P_{cr}=0.05 s$. La constante proporcional se halla con $K_p=0.45*K_{cr}=3$ y el tiempo integral es $T_i=P_{cr}/1.2=0.04$.

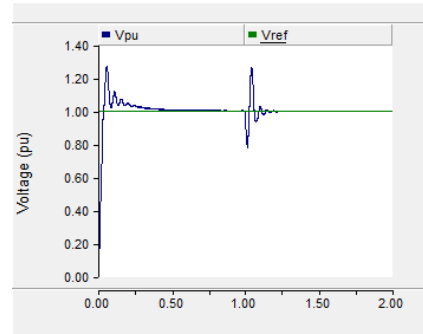


Figura 10. Tensión en p.u del SVC sintonizado con el método Ziegler y Nichols (kp=3 Ti=0.04) para el Sistema 1.

En la Figura 10, se observa que el tiempo de establecimiento del sistema es de 0.4s y se obtiene un sobrepaso máximo del 15%. Tanto para el establecimiento de la carga del SVC como para la desconexión de la carga en 1 segundo.

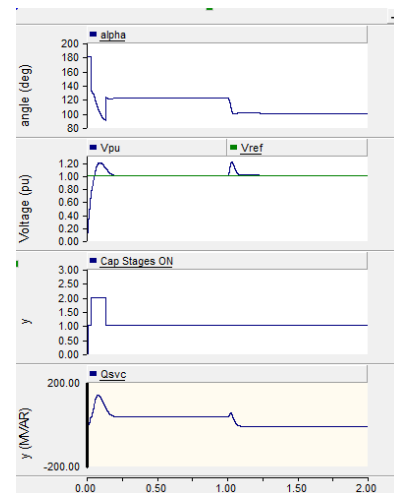


Figura 11. Respuesta del sistema 1 con kp=0.6 y Ti=0.04

De acuerdo con la Figura 11, el tiempo de establecimiento ante la desconexión de la carga es de 0.24s y el sobrepaso de la tensión con respecto a la referencia es del 21% cuando se desconecta la carga.

En la Figura 12, se presenta el punto de equilibrio del sistema al conectarse un SVC esta dado por la solución de las ecuaciones (1) y (2), la cual es $V_{svc}=1.002 p.u$ e $I_{svc}=0.065 p.u$.

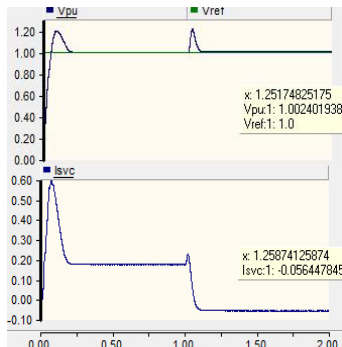


Figura 12. Punto de equilibrio al conectar el SVC

En la Figura 13, se muestra el sistema con una falla de 0.5s, se establece después de ocurrida la falla a los 0.14s y al finalizar la falla el tiempo de establecimiento del sistema es de 0.05s.

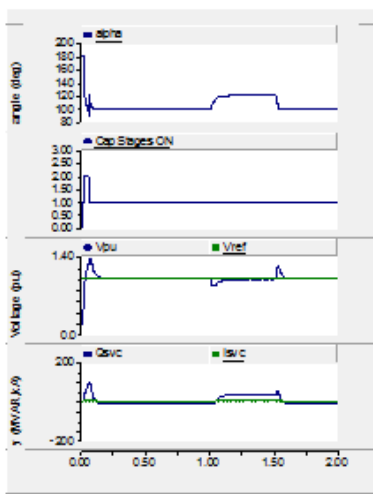


Figura 13. Sistema de prueba 1 con perturbación de 5 [s]

B. Controlador del SVC para el sistema 2

De acuerdo con la Tabla 1, se tiene la impedancia equivalente RL para el sistema 2:

$$8.66\Omega \angle 87.76^\circ$$

La reactancia de línea es $j8.65\Omega$.

La reactancia en p.u se halla con las ecuaciones (12) y (13).

$$S_{C \min} = \frac{V^2 b}{j x_s} = \frac{120^2}{8.65} = 1664.73 \text{ MVA}$$

$$K_{N \max} = \frac{Q_{SVC}}{S_c} = \frac{200}{1664.73} = 0.12 \text{ p.u} \quad (19)$$

$$K_{N \max} \approx X_{TH} = 0.12 \text{ p.u} \quad (20)$$

$$K_p = \frac{1}{2*(k_{SL} + K_{N \max})} = \frac{1}{2*(0.03 + 0.12)} = 3.3 \quad (21)$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_y} = \frac{3.3}{0.004} = 825 \quad (22)$$

$$(23)$$

$$T_i = 0.001 \text{ [s]}$$

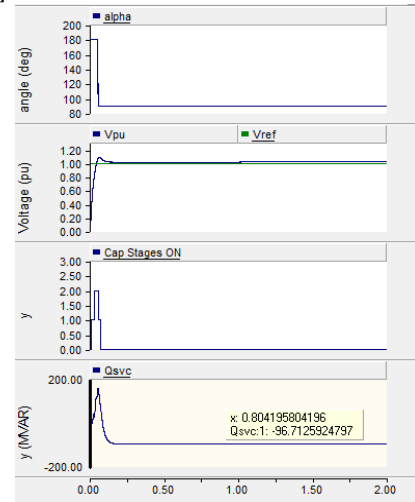


Figura 14. Tensión en p.u del SVC sintonizado con $k_p=3.3$ y $T_i=0.001$ para el Sistema 2.

Para este Sistema de potencia se puede observar que la metodología de sintonización se puede realizar sin necesidad de recurrir a otros métodos como Ziegler y Nichols, ya que no ocurre inestabilidad debido a que el valor de su impedancia equivalente es bajo.

IV. CONCLUSIONES

- En la metodología de sintonización del control PI al tener valores altos de X_{TH} del sistema a.c, el controlador puede ser inestable. Para estos casos es necesaria la reducción de la constante de integración, o utilizar otros métodos de sintonización del controlador PI como Ziegler y Nichols.
- Se demostró que el SVC, es un buen compensador durante y después de una falla en un sistema a.c, si se utiliza un buen método de sintonización de control PI. El tiempo de establecimiento del controlador del SVC ante la desconexión o fallas en la cargas es rápido.
- El compensador SVC absorbe o genera potencia reactiva de acuerdo a la referencia de tensión en la base de conexión del SVC. De esta forma, el compensador tiende a estabilizar la tensión hasta que llegue al punto de equilibrio entregado por el SVC.

REFERENCIAS

- [1]. Christian Alejandro Díaz Duarte, "Modelación de un Compensador Estático para el control de Generación distribuida con Energías Renovables", Universidad de Chile, 2009.

- [2]. Nang Sabai, Hnin Nandar Maung, and Thida Win, "Voltage Control and Dynamic Performance of Power Transmission System Using Static Var Compensator", World Academy of Science, Engineering and Technology 42 2008.
- [3]. Mathur, R, Mohan; Varma, Rajiv K, "Thyristor-Based FACTS Controllers and Electrical Transmission Systems", Wiley-IEEE Press, 2002
- [4]. Mohamed Izzeddine Izzeddeve, "Modelado y regulación de los compensadores estáticos de potencia reactiva en los flujos de cargas con armónicos", Universidad Politécnica de Madrid, 2009
- [5]. A.M. Gole, V.K Sood , "Development of a state variable-based static compensator model", Universidad de Manitoba", Power Electronics Specialists Conference, 1990.
- [6]. Pablo Ledesma, "Control de tensión", Universidad Carlos III de Madrid, 2008
- [7]. D.Jovcic, N.Pahalawaththa, M.Zavahir, H.Hassan, "SVC Dynamic Analytical Model", IEEE
- [8]. K.R.Padiyar, "Facts Controllers in Power Transmission and Distribution", Indian Institute of Science, 2009
- [9]. T. OGATA, Ingeniería de control moderna, 3ra Edición.