

ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL POR MODO DESLIZANTE (SMC) PARA EL CONTROL DEL COMPENSADOR DE VAR ESTÁTICO CONTROLADO (SVC)

M.Vivas¹, M. Pozo², C. Gallardo³

¹Estudiante Maestría Redes Eléctrica Inteligentes-, ²Departamento de Automatización y Control Industrial-, ³Departamento de Energía Eléctrica-Escuela Politécnica Nacional

{marco.vivas, carlos.gallardo, marcelo.pozo@epn.edu.ec}

Resumen: Este artículo tiene el propósito de analizar e implementar el método de control por modo deslizante con banda de histéresis (SMC) para el control del SVC. Inicialmente el control del SVC se basa en el método de control por modo PI, el cual tiene una respuesta dinámica y desempeño aceptable. Con la implementación del nuevo modo de control paralelo al inicial, se espera mejorar la respuesta dinámica y desempeño del sistema de transmisión, tener un tiempo de establecimiento más rápido y que las pérdidas de potencia sean menores. En primera instancia se hace una definición de los conceptos fundamentales para entender el funcionamiento del control en modo deslizante. También se explica brevemente el algoritmo convencional del modo de control. Finalmente se realiza la comparación entre el controlador PI tradicional y el Controlador por modo deslizante (SMC) del control SVC, con el fin de analizar los resultados y establecer la mejor respuesta y desempeño del sistema de transmisión. Al igual que el artículo anterior se utilizara el mismo ejemplo preestablecido dentro de la librería MatlabR2018b/Simulink/Simscape™ Electrical™ Specialized Power Systems, denominado SVC (Detail Model) +300 Mvar/-100 Mvar Static Var Compensator (SVC); 1 TCR – 3 TSCs para la simulación.

Palabras clave: SVC, Control PI, Control SMC, Banda de Histéresis.

I. INTRODUCCIÓN.

El ejemplo descrito en este documento ilustra la aplicación del software Simscape™ Electrical™ Specialized Power Systems para estudiar el rendimiento dinámico y en estado estable de un compensador de VAR estático controlado (SVC) en un sistema de transmisión. El SVC es un dispositivo de derivación de la familia de sistemas de transmisión de CA flexibles (FACTS) que utiliza electrónica de potencia. Regula la tensión, generando o absorbiendo potencia reactiva. El controlador del SVC se basa en un lazo de control PI. Como se mencionó anteriormente se implementara un control por modo deslizante con banda de histéresis, paralelo al modo PI tradicional establecido, con el objetivo de mejorar la estabilidad, respuesta dinámica y desempeño del sistema.

En la actualidad, el controlador por modos deslizantes está incorporándose cada vez más en la industria para controlar sistemas lineales y no lineales debido a que es un controlador robusto frente a incertidumbres estructuradas y no estructuradas. Este controlador posee un fenómeno no deseado llamado chattering que disminuye el rendimiento del sistema, el cual consiste en vibraciones de alta frecuencia del controlador. Adicionalmente, para mejorar el rendimiento del controlador por modos deslizantes se busca

que la trayectoria de estados alcance más rápido a la superficie de deslizamiento, con lo cual se obtiene un menor tiempo de establecimiento del sistema.

La principal ventaja de este tipo de estrategia de control (en modo deslizante) es su insensibilidad ante la variación en los parámetros de la planta y ante las perturbaciones externas, siempre y cuando se cumplan ciertas condiciones. Además esta estrategia de control proporciona una rápida respuesta a la referencia y su implementación y diseño no son complejos.

El control en modo deslizante se ha utilizado en diferentes aplicaciones en máquinas eléctricas para controlar tanto velocidad como torque obteniéndose resultados satisfactorios debido al aseguramiento de la robustez que proporcionan estas técnicas.

De acuerdo a las razones expuestas arriba, se va a realizar el estudio del control de SVC en modos deslizantes con banda de histéresis (SMC) aplicado a un sistema de transmisión y se validara su desempeño y robustez por medio de simulaciones, comparando los resultados obtenidos con los del controlador clásico (PI) estableciendo las ventajas y desventajas comparativas entre ellos.

II. CONCEPTOS GENERALES

A. Compensador estático de potencia Reactiva Controlados por Tiristores (SVC)

Los compensadores estáticos de potencia (SVC) son dispositivos que controlan la tensión en el punto de conexión del sistema de potencia para compensar la deficiencia de potencia reactiva y de esta manera regular la tensión o mantener la tensión dentro de un perfil deseado.

El término “estático” se utiliza para indicar que los SVC a diferencia de los componentes síncronos, no tienen movimiento o componentes importantes rotatorios. En la Figura Nro. 1 se muestra un diagrama unifilar de un SVC. Los componentes básicos de un SVC controlado por tiristor son:

- Transformador reductor
- Reactor Shunt
- Capacitores Shunt
- Tiristores bidireccionales
- Sistema de Regulación y Control

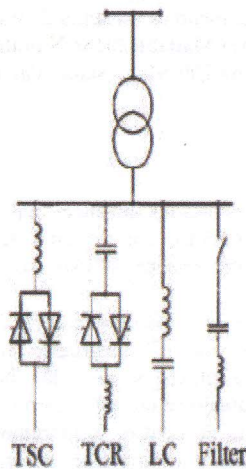


Figura Nro. 1: Diagrama unifilar de un SVC

➤ **Características de operación**

A continuación se observa las características básicas de operación de un compensador estático.

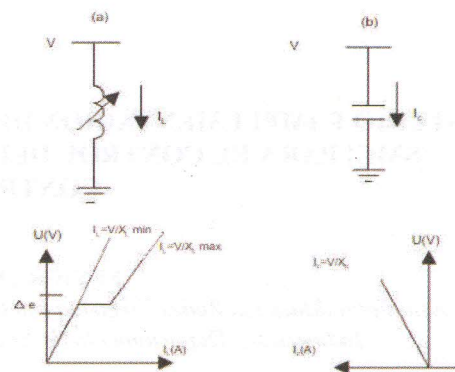


Figura Nro. 2: (a) Característica de operación de un capacitor, (b) Característica de operación de un reactor

En la figura Nro. 2 se muestra el diagrama fasorial de una inductancia y una capacitancia que finalmente se unen para formar la característica de operación de un SVC como se observa en la Figura Nro. 3.

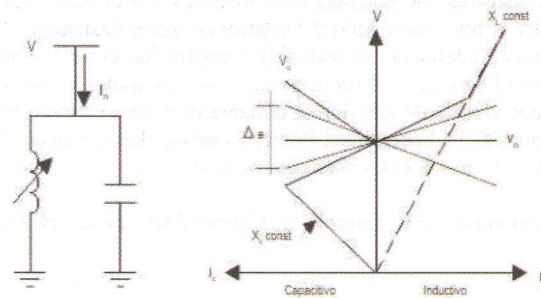


Figura Nro. 3: Principio básico de operación de un SVC

El principio de operación se basa en la inyección o absorción de potencia reactiva, si la tensión es elevada trabaja en la parte inductiva y si la tensión es baja trabaja en la parte capacitiva de esta manera se controla la tensión dentro del perfil de referencia de la tensión nominal (V_n).

➤ **Principios de control utilizado**

Los tipos de control más utilizados son:

- TCS: Capacitores conmutados por tiristores
- TCR: Reactores controlados por tiristores

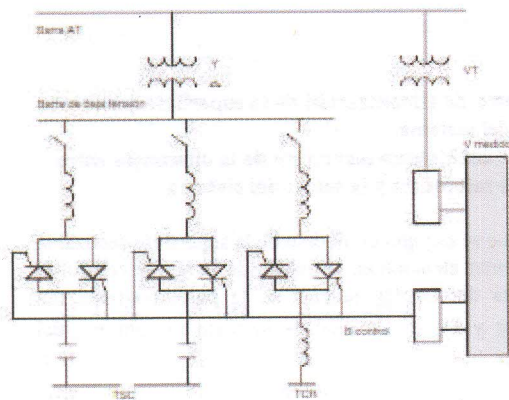


Figura Nro. 4: Esquema de un control TCS/TCR

TCR: Reactor controlado por tiristor
 FC: Capacitor Shunt fijo

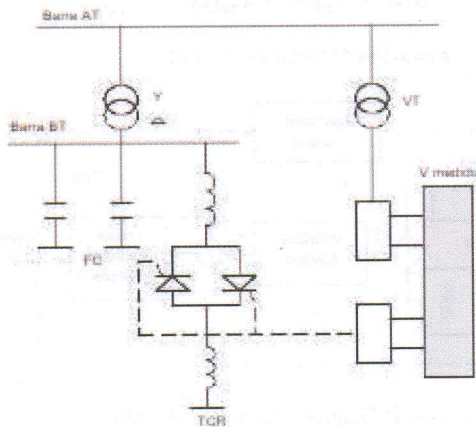


Figura Nro. 5: Esquema unifilar FC/TCR

➤ Principio de Funcionamiento

En el caso del TCR, una bobina de reactancia fija, habitualmente del tipo sin núcleo magnético, está conectada en serie a una válvula de tiristores bidireccional. La corriente de frecuencia fundamental es variada mediante el control de la fase de la válvula de tiristores. Un TSC comprende un condensador en serie con una válvula de tiristores bidireccional y una reactancia amortiguadora. La función del conmutador de tiristores es conectar o desconectar el condensador para un número entero de semiciclos de la tensión aplicada. El condensador no es de control por fase, sino que simplemente está conectado o desconectado. La reactancia del circuito del TSC sirve para limitar la corriente en condiciones anormales y para ajustar el circuito a la frecuencia deseada. Las impedancias de reactancias y condensadores y del transformador de potencia definen la gama de funcionamiento del SVC.

El esquema V-I correspondiente tiene dos regiones de funcionamiento diferentes (Figura Nro. 3). Dentro de la gama de control, la tensión es controlable con una precisión que viene dada por la pendiente. Fuera de la gama de control, la característica para bajas tensiones es la de una reactancia capacitiva y para tensiones altas la de una corriente constante. El rendimiento de baja tensión puede mejorarse fácilmente añadiendo una batería adicional de TSC (que se utiliza sólo en condiciones de baja tensión). El TSR es un TCR sin control de fase de la corriente, que se conecta o se desconecta como un TSC.

➤ Aplicaciones Típicas de los SVC

- Mantener el voltaje en un nivel constante frente a las variaciones de carga y las fluctuaciones causadas por el rechazo de la carga y las paradas.
- Reducir al mínimo los parpadeos de tensión causado por los cambios rápidos de carga tal como son los hornos de arco y variadores de velocidad.
- Mejorar la estabilidad del sistema de potencia
- Mejorar el perfil de tensión en el punto de entrega
- Minimizar las pérdidas de transmisión por el mejoramiento del factor de potencia
- Aliviar el desbalance de fases, mediante el controlador de fases [1],[2],[3].

B. Controlador de modo Deslizante

El controlador por modos deslizantes cuyas siglas en inglés son (Sliding Mode Control, SMC) es un tipo específico de control de estructura variable con siglas en inglés (Variable Structure Control, VSC). El control en modo deslizante, se puede definir como la aplicación de una señal de control que conmuta a alta frecuencia, en el orden de los kilohertzios (KHz) para electrónica de potencia, y consigue llevar el estado del sistema a un campo escalar S, denominado superficie de deslizamiento, la cual tendrá que cumplir las especificaciones deseadas. La principal ventaja de este control es su robustez ante perturbaciones, cuando éstas tienen cotas conocidas.

$$S(t) = f(R(t), X_m(t), e_m(t), h, n)$$

Ecuación 1: Superficie de deslizamiento

De donde se tiene:

- R(t): Es la señal de referencia
- $X_m(t)$: La salida del modelo
- $E_m(t)$: El error del modelado
- h: Es el parámetro de sintonización
- n: Es el orden del modelo

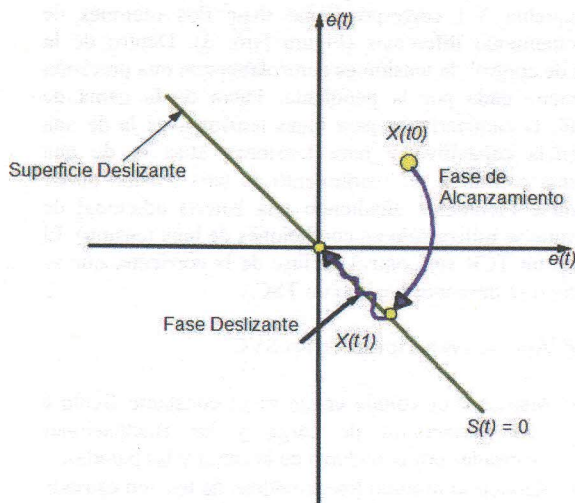


Figura Nro. 6: Interpretación gráfica del funcionamiento del SMC

En la Figura Nro. Nro. 6 se observa gráficamente el funcionamiento del SMC. En donde se tiene que: $e(t)$ es el error del sistema, $\dot{e}(t)$ la derivada del error del sistema, $X(t_0)$ el estado inicial del sistema, $X(t_1)$ el estado del sistema en el tiempo t_1 y $S(t)$ la superficie de deslizamiento. La ley de control del controlador SMC está dada por la Ecuación 1.9.

$$U(t) = U_C(t) + U_D(t)$$

Ecuación 2. Ley de control del controlador SMC

Donde:

- $U(t)$: Salida del controlador SMC.
- $U_C(t)$: Parte continua del controlador SMC, es la encargada de la fase de deslizamiento.
- $U_D(t)$: Parte discontinua del controlador SMC, es la encargada de la fase de alcanzabilidad.

La superficie de deslizamiento es muy importante dentro del controlador SMC debido a que da el comportamiento en lazo cerrado del sistema por el cual la trayectoria de estados del sistema se desliza hasta llegar al valor deseado.

Existen dos modelos para la superficie de deslizamiento, los cuales se indican en la Ecuación 3 y la Ecuación 4.

$$S(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^n \int_0^t e(t) dt$$

Ecuación 3: Modelo de superficie de deslizamiento tipo integral-diferencial

$$S(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} e(t)$$

Ecuación 4: Modelo de superficie de deslizamiento tipo diferencial

De donde:

λ : Parámetro de sintonización de la superficie deslizante
 n: Orden del sistema

$e(t)$: Error del sistema resultante de la diferencia entre el valor de referencia y la salida del sistema

Una vez que se escogió el modelo de la superficie deslizante hay que tomar atención en el diseño de la ley de control la cual consta de: $U_C(t)$, la cual es la parte continua del controlador y $U_D(t)$, la cual es la parte discontinua del controlador.

También se la puede denominar:

$U_C(t)$: Control Equivalente

$U_D(t)$: Control de conmutación

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_{sw}(t)$$

Ecuación 5: Señal de Control

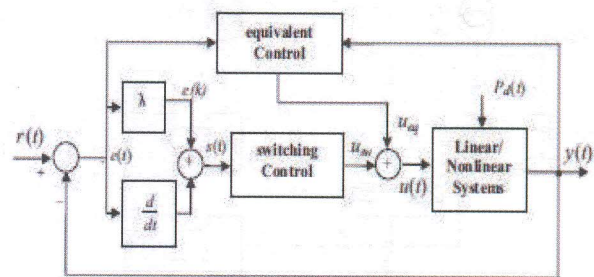


Figura Nro. 7: Diagrama de bloque del SMC

• **Parte continua del controlador SMC**

La parte continua del controlador viene dada por la Ecuación 6. Es la responsable de la fase de deslizamiento, en la cual el objetivo es que la trayectoria de estados se encuentre sobre el valor de referencia de manera tangencial a la superficie de deslizamiento escogida, por lo que se debe cumplir la Ecuación 7.

$$U_C(t) = f(X(t), R(t))$$

Ecuación 6: Parte continua del controlador SMC

$$\dot{S}(t) = 0$$

Ecuación 7: Condición de deslizamiento

• Parte discontinua del controlador SMC

La parte discontinua del controlador viene dada por la Ecuación 8. Es la responsable de la fase de alcanzamiento en la cual el objetivo es que la trayectoria de estados alcance a la superficie de deslizamiento; el seguimiento de la trayectoria de estados se debe encontrar dentro de un régimen deslizante sobre las fronteras de $S(t)$, con lo que al ser alcanzada la superficie deslizante, la salida debe estar localmente entorno de la misma, lo cual indica que es necesario que sin importar en que plano se encuentre el estado a controlar, debe siempre apuntar a la superficie deslizante como se indica en la Figura Nro. 8. Por lo que la Ecuación 9 debe ser cumplida.

$$U_D(t) = K_D \text{sign}(S(t))$$

Ecuación 8: Parte discontinua del controlador SMC

$$S(t)\dot{S}(t) < 0$$

Ecuación 9: Condición fase de alcanzamiento

Donde:

- K_D : Es el parámetro de sintonización responsable de la velocidad con la cual la superficie de deslizamiento es alcanzada. Representa la constante de ganancia discontinua.
- $\text{sign}(S(t))$: Es el responsable de las conmutaciones para que, sobre la superficie de deslizamiento, la trayectoria pueda evolucionar.

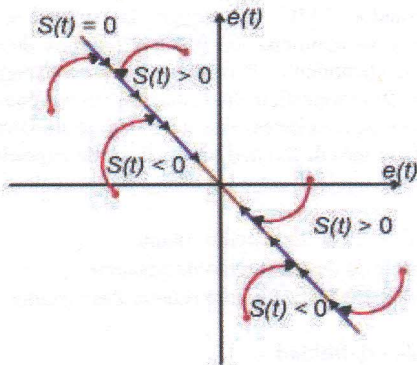


Figura Nro. 8: Representación gráfica de la fase de Alcanzamiento

C1. Fenómeno de Chattering (Banda de Histéresis) en controladores SMC

En el controlador SMC lo ideal sería que, al alcanzar la superficie deslizante, el estado a controlar se mueva tangencialmente a la superficie de deslizamiento, pero en la práctica esto no ocurre debido a que el controlador SMC

posee el fenómeno llamado “chattering” (Figura Nro.9), por el hecho de poseer un elemento no lineal en la parte discontinua del controlador (Ecuación 8).

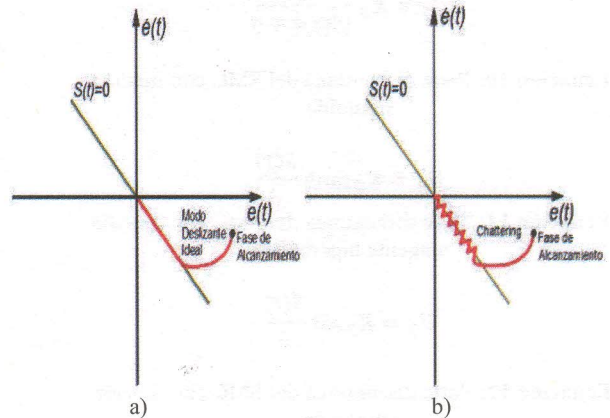


Figura Nro. 9: Alcanzamiento de la superficie de deslizamiento: a) ideal, b) con chattering

El fenómeno llamado chattering es un fenómeno de vibración de alta frecuencia alrededor de la superficie deslizante. Existen dos mecanismos que producen este movimiento:

- La ausencia de conmutaciones no ideales como retrasos. Es decir, el dispositivo de switcheo está conmutando idealmente a una frecuencia infinita, las presencias de dinámicas parásitas en serie con la planta provocan una oscilación de alta frecuencia, pero de pequeña magnitud en los alrededores de la superficie deslizante. Estas dinámicas parásitas son las que representan la dinámica rápida del actuador y del sensor.
- Las no idealidades de conmutación pueden ocasionar aquellas oscilaciones de alta frecuencia.

El fenómeno de chattering es una de las desventajas que tiene el controlador SMC ya que aumenta el esfuerzo de control sobre el actuador. Además, no permite estar sobre el valor de referencia, sino que la respuesta oscilará alrededor

C2. Reducción de chattering en controladores por modos deslizantes

Para reducir el efecto del chattering en controladores SMC se trabaja en la parte discontinua del controlador. Tradicionalmente, se reemplaza la función $\text{sign}(S(t))$ con: funciones de suavizamiento con capa límite (δ).

- Función de suavizamiento sigmoide: Es una pseudo función de deslizamiento como se muestra en la Ecuación 10.
- Función de suavizamiento tangente hiperbólica: Se utiliza la función tangente hiperbólica como se indica en la Ecuación 11.

- Función de suavizamiento saturación: Se utiliza la función de saturación como se observa en la Ecuación 12.

$$U_D = K_D \frac{S(t)}{|S(t)| + \delta}$$

Ecuación 10: Parte discontinua del SMC con función sigmoide

$$U_D = K_D \tanh \frac{S(t)}{\delta}$$

Ecuación 11: Parte discontinua del SMC con función tangente hiperbólica

$$U_D = K_D \text{sat} \frac{S(t)}{\delta}$$

Ecuación 12: Parte discontinua del SMC con función saturación

Estos 3 tipos de reducción de chattering (Figura Nro.10), utilizan aproximaciones continuas de la parte discontinua del control con una capa límite alrededor de la superficie de deslizamiento, en la cual (δ) es el grosor de la capa límite. Como se observa en la Figura Nro. 11.

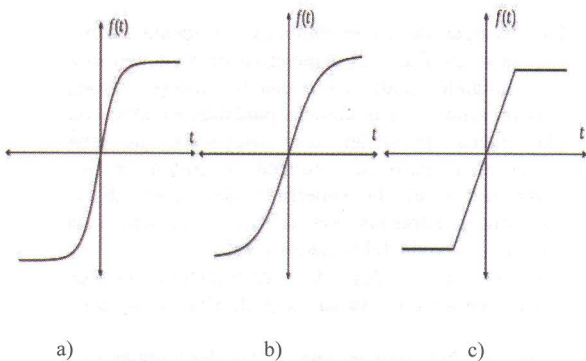


Figura Nro. 10: Funciones de suavizamiento: a) sigmoide, b) tangente hiperbólica, c) saturación

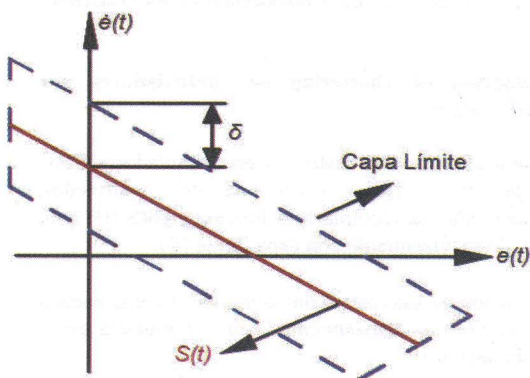


Figura Nro. 11: Representación gráfica de la capa límite alrededor de la superficie deslizante

C4. Alcanzabilidad de la superficie de deslizamiento

El controlador SMC cuenta con dos partes, la fase de acercamiento y la fase deslizamiento. En la fase de acercamiento se busca que la trayectoria de estados alcance a la superficie deslizante, esta es la parte discontinua del controlador SMC como se muestra en la Ecuación 8. Lo ideal sería acortar lo más posible la duración del modo de acercamiento para poder llegar a la superficie de deslizamiento de manera rápida y entrar en el modo de deslizamiento para tener un menor tiempo de establecimiento del sistema considerando que se debe cumplir la Ecuación 9.

Uno de los métodos para alcanzar rápidamente a la superficie de deslizamiento consiste en aumentar el valor de la ganancia de switcheo (KD); pero al aumentar esta ganancia de switcheo que es la fuerza con la cual se alcanza a la superficie de deslizamiento, se produce una extrema sensibilidad del sistema a dinámicas no modeladas, por lo que aumenta el fenómeno de chattering (Figura Nro. 9). Además, si el valor es muy elevado puede hacer que el controlador se vuelva inestable.

Otro de los métodos para alcanzar más rápidamente a la superficie de deslizamiento, es el uso de superficies deslizantes móviles en vez de estáticas, las cuales varían en el tiempo de tal manera que se alcance más rápido a la superficie de deslizamiento. A estos controladores con superficies deslizantes móviles se los llama por sus siglas en inglés (Moving Sliding Mode Control, MSMC).

C5. Superficies deslizantes móviles

En el controlador SMC se escoge la superficie de deslizamiento y se mantiene los parámetros fijos de esta superficie de deslizamiento. Pero si se varía en el tiempo los parámetros de la superficie de deslizamiento teniendo en cuenta ciertas consideraciones, esta superficie se transforma en una superficie móvil. Existen varios tipos de superficies de deslizamiento móviles, entre las cuales se encuentran:

- Superficie de deslizamiento rotante
- Superficie de deslizamiento desplazante
- Superficie de deslizamiento rotante-desplazante

C6. Análisis de estabilidad

Para analizar la estabilidad del controlador se considera la siguiente función candidata de Lyapunov.

$$V(t) = \frac{1}{2} S^2(t)$$

Ecuación 13: Candidata de Lyapunov

Tomando la derivada de la función candidata de Lyapunov se obtiene:

$$\dot{V}(t) = S(t)\dot{S}(t)$$

Ecuación 14: Candidata de Lyapunov

Del teorema de estabilidad de Lyapunov se conoce que cualquier sistema lineal o no lineal es globalmente asintóticamente estable si $\dot{V}(t)$ es definida negativa, entonces para que el controlador sea estable se debe satisfacer la condición:

$$S(t)\dot{S}(t) < 0$$

Ecuación 15: Condición de estabilidad según Lyapunov [5]

III. COMPONENTES DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN Y DEL COMPENSADOR DE VAR ESTÁTICO CONTROLADO (SVC)

El sistema de transmisión de potencia en el modelo de simulación de SVC está representado por un equivalente inductivo (nivel de cortocircuito de 6000 MVA) – 735kV y una carga de 200 MW. La tensión interna del sistema se puede variar con la ayuda de una fuente programable trifásica. El SVC representa un valor de 300 Mvar conectado a un sistema de transmisión de 735 kV. (Figura Nro. 12).

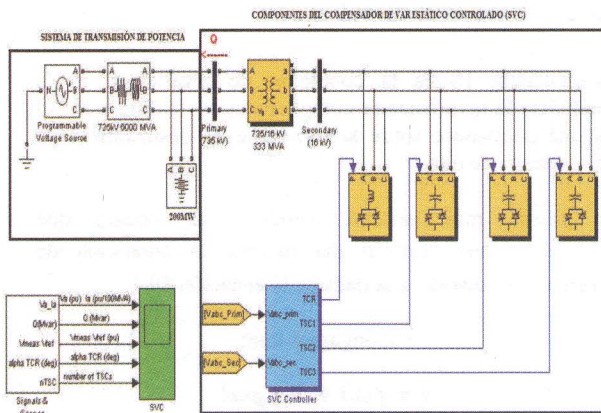


Figura Nro. 12: Composición del sistema de transmisión en el modelo de simulación del SVC

El compensador de VAR estático controlado de 300 Mvar tiene la función de regular el voltaje del sistema de 6000 MVA-735 kV. Consta de un transformador de acoplamiento de 735kV / 16 kV 333-MVA, un banco de reactores controlado por tiristores de 109 Mvar (TCR) y tres bancos de capacitores de 94 Mvar (TSC1, TSC2, TSC3) conectados en el lado secundario del transformador

IV. CONTROL DEL SISTEMA SVC

El controlador SVC controla el voltaje primario y envía los pulsos apropiados a los 24 tiristores (6 tiristores por banco trifásico) para obtener la sensibilidad requerida por el regulador de voltaje.

El sistema de control SVC consta de cuatro módulos principales:

- **El sistema de medición:** Mide la tensión primaria de secuencia positiva. La unidad de medición de voltaje es accionada por un bucle de bloqueo de fase (PLL) para tener en cuenta las variaciones de la frecuencia del sistema.
- **El regulador de voltaje:** Inicialmente se basa en el lazo de control PI para regular el voltaje primario en el voltaje de referencia (1.0 p.u. especificado en el menú de bloque del controlador SVC). Se incorpora una caída de voltaje en la regulación de voltaje para obtener la característica V-I con una pendiente (0.01 pu/100 MVA en este caso). Por lo tanto, cuando el punto de operación del SVC cambia de totalmente capacitivo (+300 Mvar) a totalmente inductivo (-100 Mvar), el voltaje del SVC varía entre $1 - 0.03 = 0.97$ p.u. y $1 + 0.01 = 1.01$ pu.
- **La unidad de distribución:** Usa la susceptancia primaria B_{svc} calculada por el regulador de voltaje para determinar el ángulo de disparo α del TCR y el estado (encendido/apagado) de las tres ramas de TSC. El ángulo de disparo α en función de la susceptancia B_{TCR} del componente TCR se implementa mediante la siguiente ecuación.

$$B_{TCR} = \frac{2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)}{\pi}$$

Ecuación 16: ángulo de disparo α en función de la susceptancia B_{TCR}

Donde B_{TCR} es la susceptancia TCR en p.u. de potencia reactiva TCR nominal (109 Mvar)

- **La unidad de encendido:** Consta de tres subsistemas independientes, uno para cada fase (AB, BC y CA). Cada subsistema consta de un PLL sincronizado en el voltaje secundario línea a línea y un generador de pulsos para cada una de las ramas TCR y TSC. El generador de pulsos utiliza el ángulo de disparo α y el estado TSC proveniente de la Unidad de Distribución para generar pulsos. La activación de las ramas de TSC se puede sincronizar (se envía un impulso a los tiristores positivos y negativos en cada ciclo) o continua. El modo de disparo sincronizado suele ser el método preferido porque reduce los armónicos más rápido.

V. ESTUDIO DEL CONTROL POR MODO DESLIZANTE PARA EL CONTROL DEL SVC

Como se menciona anteriormente el control del SVC se basa inicialmente en el lazo de control PI para la regulación de voltaje. A continuación se presenta el estudio del control de SVC en modos deslizantes con banda de histéresis aplicado al sistema de 6000 MVA-735 kV y se validara su desempeño y robustez por medio de simulaciones, comparando los resultados obtenidos con los del controlador clásico (PI) estableciendo las ventajas y desventajas comparativas entre ellos.

A. Elección del control de conmutación (u_{sw})

La parte continua del controlador viene dada por la Ecuación 17. Es la responsable de la fase de deslizamiento, en la cual el objetivo es que la trayectoria de estados se encuentre sobre el valor de referencia de manera tangencial a la superficie de deslizamiento escogida, por lo que se debe cumplir la Ecuación 18.

$$U_c(t) = f(x(t)) \cdot R(t)$$

Ecuación 17: Parte continua del controlador SMC

$$\dot{S}(t) = 0$$

Ecuación 18: Condición de deslizamiento

Por lo tanto la Superficie de deslizamiento viene dada por:

$$S = \dot{e} + \lambda e$$

Donde:

$$e = V_{ref} - V_{mes}$$

$\lambda =$ *Coeficiente positivo en los numeros reales establecidos*

B. Elección del control equivalente (u_{eq})

B1. Dinámica de deslizamiento ideal (Condición de invarianza)

De la Figura Nro. 13 se puede observar que la trayectoria en modo deslizante se puede hacer todo lo próximo que se quiera a $S(x)=0$, escogiendo el valor del umbral lo suficientemente pequeño (Δ). La dinámica del sistema en modo deslizante cuando Δ tiende a cero se conoce como dinámica de deslizamiento ideal.

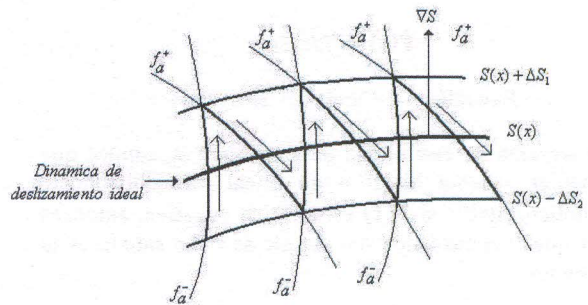


Figura Nro. 13: Trayectoria del sistema en las proximidades de una región deslizante

La dinámica promediada del sistema ó dinámica de deslizamiento ideal, está ligada a la ecuación de la superficie, por lo tanto la dinámica de deslizamiento ideal queda caracterizada por la ecuación 18.

$$\left. \begin{matrix} S(x) = 0 \\ \langle \nabla S, f_a(x, t, \mu_{eq}) \rangle \geq 0 \end{matrix} \right\}$$

Ecuación 19: Condición de invarianza

Donde: f_a es el campo vectorial cuando la dinámica del sistema se encuentra sobre la superficie de conmutación debido a la acción de control μ_{eq} .

La ecuación 18 es la condición de invarianza. Si la condición de invarianza se cumple entonces la dinámica del sistema permanece sobre la superficie de deslizamiento y no se escapa de ella.

En forma más general, teniendo en cuenta que $S(x, t)$ depende también del tiempo, la condición de invarianza es distinta a la dada en la ecuación 19.

Supongamos que:

$$\dot{x} = f(x) + U_{eq} g(x)$$

y que $\delta(t)$ es una trayectoria solución de $\dot{x}(t)$. En la superficie de deslizamiento se debe cumplir la primera condición de la ecuación 18, por lo tanto tenemos que

$$S(\delta(t_0)) = 0 \text{ y entonces } \forall t > t_0 \Rightarrow S(\delta(t)) = 0$$

Por lo tanto:

$$\frac{dS(\delta(t))}{dt} = \frac{\partial S}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \Big|_{x=\delta(t)} + \frac{\partial S}{\partial t} = 0$$

En estas condiciones la condición de invarianza es:

$$\left\{ \begin{array}{l} S(x) = 0 \\ \langle \nabla S, f_a(x, t, \mu_{eq}) \rangle = -\frac{\partial S}{\partial t} \end{array} \right\}$$

Ecuación 20: Condición de invarianza General

El control equivalente (μ_{eq}) es una ley de control que lleva al sistema a deslizarse sobre la superficie en forma ideal, y puede interpretarse como un valor continuo que representa un cierto valor promedio del control discontinuo.

La segunda condición, dada en las ecuaciones 18 y 19, se define el control equivalente μ_{eq} como el valor continuo que adapta $\mu(t)$ para que la dinamica del sistema permanezca sobre la superficie de deslizamiento.

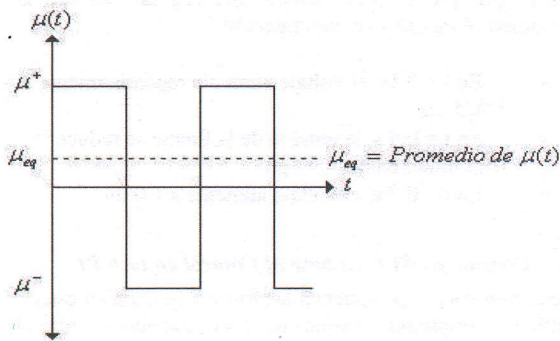


Figura Nro. 14: Control equivalente

Se recalcula que μ_{eq} es el control requerido para mantener el sistema en la región de deslizamiento ($S(x) = 0$), por lo tanto si tenemos nuestra ley de control igual a μ_{eq} estamos garantizando que el sistema se encuentra con certeza en el modo deslizante.

Por lo tanto, si la ley de control es μ_{eq} se debe cumplir lo siguiente:

$$\dot{f}_a(t, x, \mu_{eq}) = \dot{x} = f(x, t) + g(x, t)\mu_{eq}$$

Ecuación 21

Remplazando la ecuación 20 en la segunda condición de la ecuación (19), tenemos que:

$$\langle \nabla S, f(x) + \mu_{eq}g(x) \rangle = 0$$

$$\langle \nabla S, f(x) \rangle + \langle \nabla S, \mu_{eq}g(x) \rangle = 0$$

Ecuación 22

Despejamos μ_{eq} de la ecuación (22):

$$\mu_{eq} = -\frac{\langle \nabla S, f(x) \rangle}{\langle \nabla S, g(x) \rangle}$$

Cuando $S(x, t)$ depende también del tiempo, la ley de control μ_{eq} es:

$$\mu_{eq} = \frac{-\langle \nabla S, f(x) \rangle - \frac{\partial S}{\partial t}}{\langle \nabla S, g(x) \rangle}$$

Analogamente a lo anterior y para la elección del control equivalente (u_{eq}) se tiene:

$$S = \dot{e} + \lambda e$$

Ecuación 23

$$e = U_{ref} - U_{mes}$$

Ecuación 24

$$\dot{e} = U'_{ref} - U'_{mes}$$

Ecuación 25

Se deriva: **Ecuación 23**

Obteniendo:

$$\dot{S} = \ddot{e} + \lambda \dot{e}$$

Ecuación 26

Se aplica condición de deslizamiento en Ecuación 26

$$\dot{S}(t) = 0$$

Teniendo:

$$\ddot{e} + \lambda \dot{e} = 0$$

La \ddot{e} es igual a cero:

$$0 + \lambda \dot{e} = 0$$

Ecuación 27

Se sustituye Ecuación 25 en Ecuación 27:

$$0 + \lambda(U'_{ref} - U'_{mes}) = 0$$

Ecuación 28

Donde:

$$U'_{ref} = 0$$

$$U_{mes} = R * \dot{i} + L * \ddot{i}$$

Ecuación 29

Se despeja de ecuación 29: \dot{i}

$$\dot{i} = \frac{1}{L} * (U_{mes} - R * \dot{i})$$

Ecuación 30

Se deriva **Ecuación 29**

$$U_{msx}' = R * i' + L * i'$$

Ecuación 31

Se despeja de **ecuacion 30**: i'

$$i' = \frac{1}{L} * (U_{msx}' - R * i')$$

Ecuación 32

Se asume:

$$U_{msx}' = i'$$

$$U_{msx}' = i'$$

Finalmente se reemplaza **Ecuacion 32** en **Ecuación 28**

$$0 + \lambda(0 - \frac{1}{L} * (U_{msx}' - R * i)) = 0$$

Ecuación 33

Por lo tanto μ_{eq} :

$$U_{sq} = R * i$$

Donde:

R = Resistencia de la Linea de trasmisión [Ω]

$$U_{msx}' = i'$$

Obteniendo el siguiente diagrama de bloques del Control por modo deslizante.

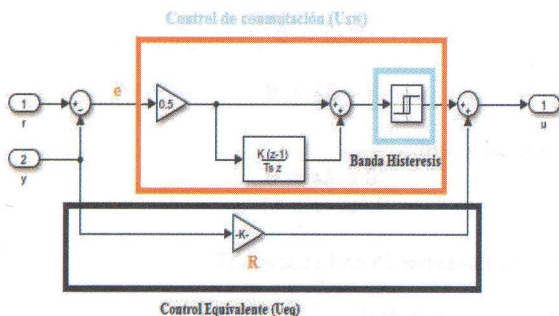


Figura Nro. 15: Diagrama de bloques del Control por modo Deslizante con banda de histéresis del control SVC

VI. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Inicialmente, el voltaje de la fuente se establece en 1.004 pu, lo que resulta en un voltaje de 1.0 pu en los terminales SVC cuando el SVC está fuera de servicio.

Se debe tener en cuenta la secuencia de voltajes programados en la fuente con sus tiempos (s) y que el modo de operación del SVC se encuentre en **regulación de voltaje**, con un voltaje de referencia de 1.0 pu. como se muestra en las Figuras Nro. 18 y 19.

Como el voltaje de referencia Vref se establece en 1.0 pu, el SVC inicialmente está flotando (corriente cero). Este punto de operación se obtiene con TSC1 en servicio y TCR casi a plena conducción (alfa = 96 grados).

La **caída de voltaje del regulador** es de 0.01 pu/100 VA (0.03 pu / 300MVA). Por lo tanto, cuando el punto de operación del SVC cambia de totalmente capacitivo (+300 Mvar) a totalmente inductivo (-100 Mvar), el voltaje del SVC varía entre $1 - 0.03 = 0.97$ pu y $1 + 0.01 = 1.01$ pu.

Los valores de secuencia de voltajes programados y tiempos (s) que el SVC tendrá que regular durante la simulación se muestran a continuación.

- En $t = 0.1s$, el voltaje aumenta repentinamente a 1.025 pu.
- En $t = 0,4 s$, la tensión de la fuente se reduce repentinamente a 0,93 pu.
- En $t = 0.7 s$, el voltaje aumenta a 1.0 pu

A. Control del SVC en base al Control en lazo PI

En esta simulación se obtienen las formas de onda en estado estable y la respuesta dinamica del SVC, cuando se varia el voltaje del sistema, considerando el Control en lazo PI.

Durante la simulación se realiza varios análisis en distintos escenarios, para observar el comportamiento del sistema y verificar la respuesta dinamica del SVC, cuando el voltaje varia a los valores anteriormente programados.

- Comportamiento del sistema de transmisión (Condiciones Normales) sin SVC.

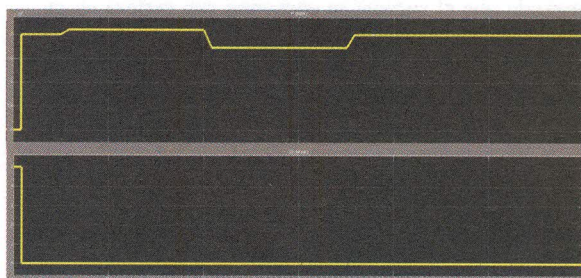


Figura Nro. 16: Formas de onda obtenidas en la simulación P (MW) y Q(Mvar) lado de la Carga

- Comportamiento del sistema de transmisión con TSC1-TSC2-TSC3-TCR (SVC)

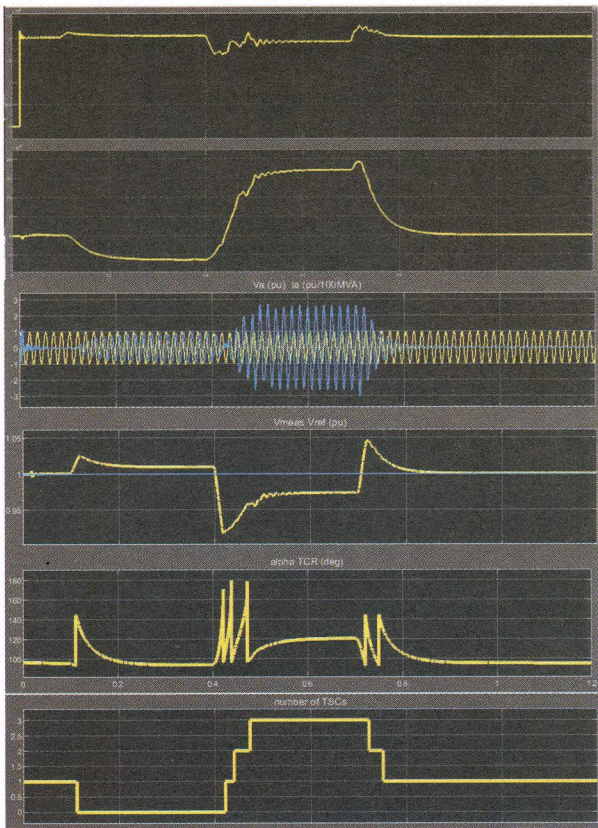


Figura Nro. 17: Formas de onda obtenidas en la simulación P (MW) y Q(Mvar) lado de la Carga

- Comportamiento del sistema de transmisión variando la carga en distintos intervalos de tiempo.

Se ubican varias cargas en distintos puntos de la línea de transmisión, con intervalos de tiempo cda una, se utilizan varios interruptores, los cuales permiten de forma automática que las cargas ingresen al sistema de transmisión en tiempos programados como se muestra en las figuras Nro. 20.

Carga 1: 200 MW; t = 0 s

Carga 2: 350 MW; t=0.3s

Carga 3: 500MW; t =0.6s

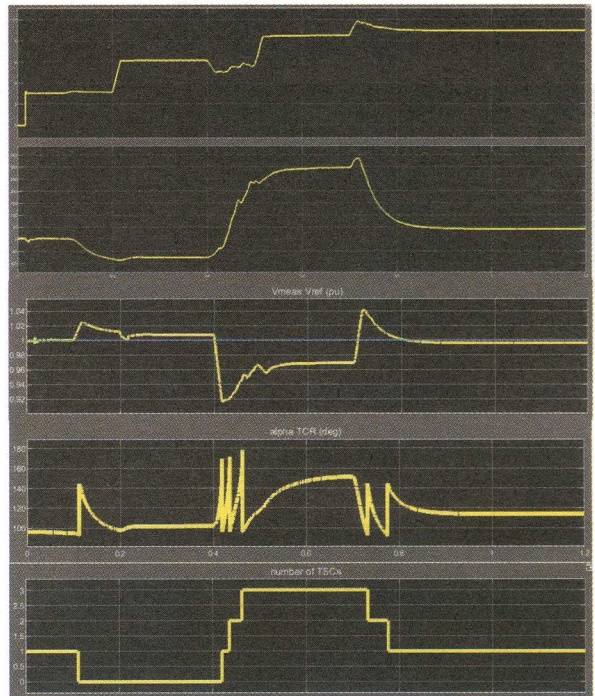


Figura Nro. 18: Formas de onda obtenidas en la simulación P (MW) y Q(Mvar) lado de la Carga

B. Control del SVC en modo de control deslizante con banda de histeresis

Para establecer un buen control por modo deslizante, se tuvo que sintonizar adecuadamente la banda de histéresis, el coeficiente positivo (λ), y los límites superior e inferior de acción de control del SMC, con el fin de tener una mejor respuesta en el control del SVC, durante la regulación de voltaje del sistema de transmisión.

Despues de simular varias veces con distintos valores de banda de histéresis, coeficeinte positivo, y limites superiores e inferiores, se estableció un valor final de sintonización sobre el control del SMC, las cuales mejoraron notablemente la respuesta dinámica, el tiempo de establecimiento y disminución de pérdidas, en lo que respecta a Potencia Activa y Reactiva del sistema de transmisión.

Al igual que en la simulación anterior se obtienen las formas de onda en estado estable y la respuesta dinamica del SVC, cuando se varia el voltaje del sistema, considerando el Control en modo Deslizante con banda de histéresis.

Durante la simulación se realiza varios análisis en distintos escenarios, para observar el comportamiento del sistema y verificar la respuesta dinamica del SVC, cuando el voltaje varia a los valores anteriormente programados, con el nuevo modo de control Deslizante con banda de histéresis.

- Comportamiento del sistema de transmisión (Condiciones Normales) sin SVC.

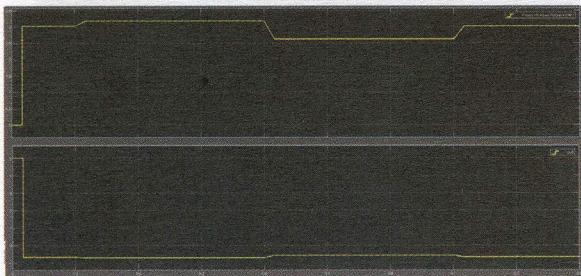


Figura Nro. 19: Formas de onda obtenidas en la simulación P (MW) y Q(Mvar) lado de la Carga

- Comportamiento del sistema de transmisión con TSC1-TSC2-TSC3-TCR (SVC)

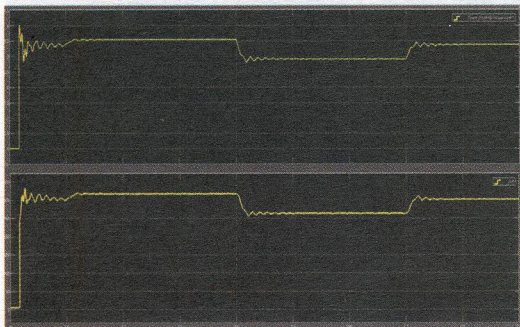


Figura Nro. 20: Formas de onda obtenidas en la simulación: P (MW) y Q(Mvar) lado de la Carga

- Comportamiento del sistema de transmisión variando la carga en distintos intervalos de tiempo.

Al igual que en caso anterior se ingresan cargas en distintos puntos de la línea de transmisión con intervalos de tiempo cada una, se utilizan varios interruptores, los cuales permiten de forma automática que las cargas ingresen al sistema de transmisión en tiempos programados.

- Carga 1: 200 MW; $t = 0$ s
- Carga 2: 350 MW; $t = 0.3$ s
- Carga 3: 500MW; $t = 0.6$ s

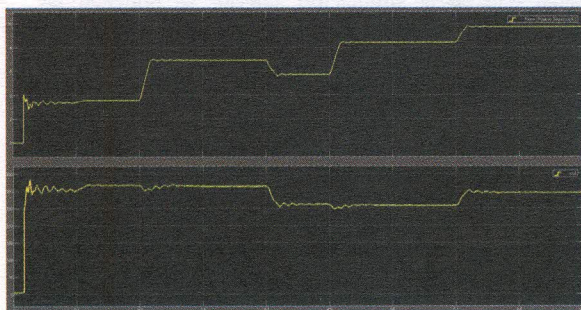


Figura Nro. 21: Formas de onda obtenidas en la simulación P (MW) y Q(Mvar) lado de la Carga

VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En $t = 0.1$ s, el voltaje aumenta repentinamente a 1.025 pu.

El SVC reacciona absorbiendo la potencia reactiva ($Q = -95$ Mvar) para llevar el voltaje nuevamente a 1.01 pu. El tiempo de asentamiento del 95% es de aproximadamente 135 ms.

En este punto, todos los TSC están fuera de servicio y el TCR está casi en plena conducción ($\alpha = 94$ grados).

En $t = 0.4$ s, la tensión de la fuente se reduce repentinamente a 0,93 pu.

El SVC reacciona generando 256 Mvar de potencia reactiva, aumentando así el voltaje a 0.974 pu. En este punto, los tres TSC están en servicio y el TCR absorbe aproximadamente el 40% de su potencia reactiva nominal ($\alpha = 120$ grados). Se observe en la última traza del alcance cómo se encienden y apagan los TSC de forma secuencial.

Cada vez que se enciende un TSC, el ángulo α del TCR cambia repentinamente de 180 grados (sin conducción) a 90. grados (conducción completa).

En $t = 0.7$ s, el voltaje aumenta a 1.0 pu

La potencia reactiva del SVC se reduce a cero.

A. Comparación de resultados sobre el control del SVC en base a los controladores PI y modo deslizando

A continuación se muestra una comparación de las formas de onda de P[MW] y Q[Mvar] de la línea de transmisión, con varias cargas, utilizando un controlador PI y un controlador por modo Deslizando para el control del SVC.

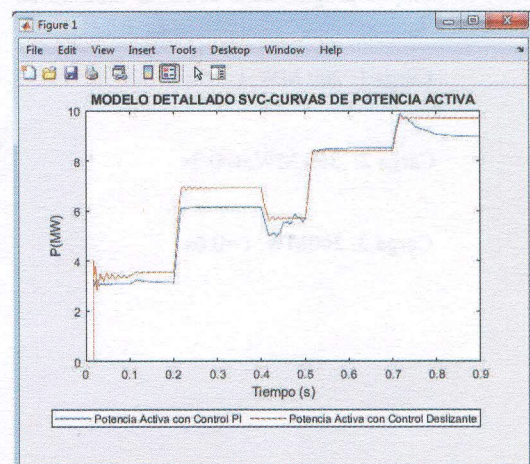


Figura Nro. 22: Potencia Activa-Controlador PI y Controlador por modo Deslizando

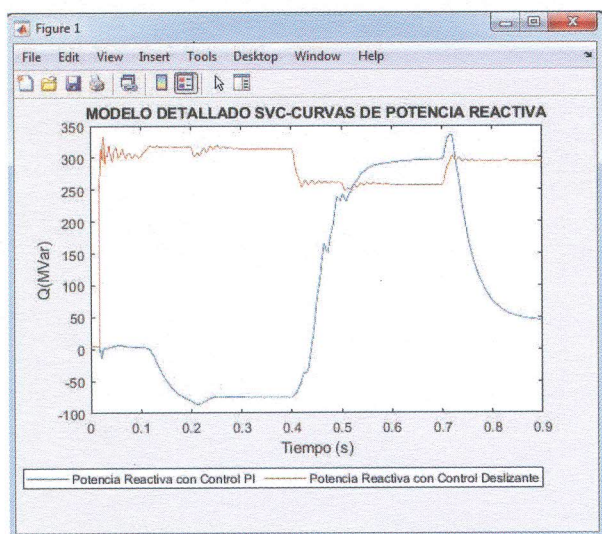


Figura Nro. 23: Potencia Reactiva-Controlador PI y Controlador por modo Deslizante

VIII. CONCLUSIONES

- El crecimiento de generación y demanda en nuestro sistema, implica el incremento del flujo por las líneas, haciendo necesaria la implementación de tecnologías nuevas, como los FACTS, que optimizan las redes de transmisión ó aumentando su capacidad de transporte.
- A partir de los resultados observados, se puede ver que el perfil de voltaje se mantiene bien durante un período de tiempo dado y cambios rápidos de cargas. Esto resulta en el propósito de un sistema de energía confiable, que los voltajes finales de recepción no deberían cambiar a pesar de los cambios de carga. Aunque hay algún desequilibrio en el sistema durante la conmutación, pero eso no afecta demasiado al sistema. El sistema se monitorea continuamente para detectar cambios de voltaje y frecuencia. De acuerdo con los cambios en el sistema, el control se logra para mantener constante el perfil de voltaje y proporcionar una mejor calidad de energía a los consumidores e industrias. La ventaja de este sistema es que es un sistema que actúa de hecho, cambia rápidamente los voltajes. También se usa TSC porque no inyecta ningún tipo de armónicos en el sistema, por lo que se mantiene la calidad de la energía.
- Al comparar el control del SVC en base al controlador PI y al controlador por modo deslizante, se puede ver claramente las diferencias entre ellos en las curvas de formas de onda de P y Q de la línea de transmisión (Figura Nro. 23,24), las cuales afirman lo siguiente:
 - Las respuestas dadas por el controlador por modo deslizante son mas rápidas que el del controlador PI tradicional por lo cual se tiene un tiempo de establecimiento más bajo.

-El controlador SMC es mas robusto que el control PI tradicional frente a la aparición de perturbaciones en el sistema.

- También comparando el desempeño de los dos controladores por modos deslizantes y PI, se puede decir que el controlador por modo deslizante tiene un mejor seguimiento de la señal de referencia y es insensible ante perturbaciones que se presentan.
- Para analizar la estabilidad se tiene algunas opciones siendo el método directo Lyapunov una muy recomendable, para este análisis.
- El control en modo deslizante es continuo, visto desde la perspectiva de las conmutaciones esto es posible a frecuencia infinita, para este caso y según la simulación estaría alrededor de los trescientos kilohertzios (300[KHz]). La desventaja se encuentra en los dispositivos electrónico de potencia debido a las limitaciones de fabricación. Por lo tanto, el control trabajará a frecuencia finita, esto da lugar a la existencia de una banda de Histéresis que se encuentra alrededor de la superficie de deslizamiento de tal forma que brinda un efecto de rizado sobre los valores de las variables de estado.
- Como se menciono anteriormente se verifica la ventaja del control por modo deslizante, su robustez ante perturbaciones que pueden localizarse en la carga y/o en la fuente, ya ue al variar ligeramente la carga y/o el voltaje, el control se mantiene.

IX. BIBLIOGRAFIA

- [1] Walter Dadas, Sistemas Eléctricos de Potencia, Líneas Aéreas de Transmisión y Transformadores, Control de potencia reactiva y tensión, p.p. 1-19.
- [2] file:///C:/Users/Usuario/Downloads/4.2. Líneas_Aer_eas_de_Transmision_y_Tran%20(1).pdf
Diego Gallardo, Aplicación de FACTS en el sistema Eléctrico, Chile, 23 de mayo 2007, p.p. 1-10.
<http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno07/FACTS/FACTS.htm>.
- [3] Ismael Valdiviezo, Estudio y Aplicación de FACTS en el Sistema Eléctrico Ecuatoriano, EPN, p.p. 1-8
- [4] Ercan Kose, Turkist Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, Control of SVC based on the sliding mode control method, Mersin University, Turkey, p.p. 1-15
- [5] Diego Jáuregui, Diseño y simulación de controladores SMC con superficies deslizantes móviles empleando técnicas de lógica difusa para mejorar la alcanzabilidad y el desempeño del sistema, EPN, Quito-Ecuador, p.p. 19-47

X. BIOGRAFÍAS



Marco Vivas, nació en Latacunga-Ecuador, el 24 de Agosto de 1990. Realizó sus estudios secundarios en la Unidad Educativa FAE N° 5. Se graduó en la Escuela Politécnica del Ejército Extensión Latacunga “ESPEL” como Ingeniero Electromecánico en 2015. Es estudiante del programa de Maestría en Electricidad Mención Redes Eléctricas Inteligentes en la Escuela Politécnica Nacional. Actualmente trabaja en el

diseño y construcción de líneas de transmisión y subestaciones 230kV y 500kV para diferentes empresas eléctricas del país. Áreas de interés: Control industrial, redes eléctricas inteligentes, automatización y control industrial.

(marco.vivas@epn.edu.ec)



Marcelo Pozo, nació en Quito-Ecuador. Se graduó en la Escuela Politécnica Nacional como Ingeniero en Electrónica y Control en 1999. Gracias a una beca del Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD), estudió su Masterado en la Universidad Técnica de Dresden-Alemania obteniendo el título de Master en Ingeniería Eléctrica (M.Sc.E.E) en Septiembre

del 2002. Entre el 2003 y 2009 se dedicó al trabajo en la industria. A partir de Septiembre del 2009 se desempeña en el cargo de Profesor Principal a tiempo completo en el Departamento de Automatización y Control Industrial (DACI) de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional-Quito, Ecuador. Entre finales del 2010 y principios del 2015 realizó su proyecto de Doctorado en Ingeniería en la Universidad de Siegen-Alemania, especializándose en Electrónica de Potencia y Control Electrónico de Máquinas Eléctricas. Actualmente es Jefe del Laboratorio de Electrónica de Potencia, Control de Máquinas y Smart Grids en el DACI de la Escuela Politécnica Nacional. Además, es presidente 2019 del Joint Chapter Industrial Electronics-IES & Control Systems-CSS del IEEE-Ecuador.

Sus áreas de interés son: Electrónica de Potencia, Control Electrónico Industrial, Control Electrónico de Máquinas Eléctricas, Calidad y Uso Eficiente de la Energía, Control y Conversión Estática a partir de Fuentes de Energía Alternativas, Regenerativas y Renovables, Redes Eléctricas Inteligentes-Smart Grids, Sistemas de Transporte y Movilidad Eléctricos.

(marcelo.pozo@epn.edu.ec)

Carlos Gallardo se graduó en la Escuela Politécnica Nacional como Ingeniero Eléctrico en 1999. Estudió su Masterado en Sistemas Eléctricos de Potencia en la Universidad de Aachen-Alemania obteniendo el título de Master en Ingeniería Eléctrica (M.Sc.E.E) en Septiembre del 2003. Tiene una maestría en Energías Renovables en la Universidad Carlos III de Madrid-España en el 2005 y Doctorado en Ingeniería Eléctrica y Electrónica en la misma universidad en el 2009. Es Profesor Principal a tiempo completo en el Departamento de Energía Eléctrica-DEE de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional-Quito, Ecuador.

Sus áreas de interés son: Electrónica de Potencia aplicada a Sistemas Eléctricos de Potencia, Operación de Sistemas Eléctricos de Potencia, Integración de Energías Renovables a Sistemas Eléctricos de Potencia, Redes Eléctricas Inteligentes-Smart Grids.

(carlos.gallardo@epn.edu.ec)