

**ANÁLISIS DE OSCILACIONES DE UN SISTEMA SMIB MEDIANTE EL AJUSTE DEL  
COMPENSADOR (POD) DEL SVC**

**BIBIAN TATIANA ARIAS B  
MANUEL FERNANDO HERNANDEZ**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
PEREIRA  
2012**

**ANÁLISIS DE OSCILACIONES DE UN SISTEMA SMIB MEDIANTE EL AJUSTE DEL  
COMPENSADOR (POD) DEL SVC**

**BIBIAN TATIANA ARIAS B  
MANUEL FERNANDO HERNANDEZ**

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO  
ELECTRICISTA**

**DIRECTOR:  
M.Sc. ALFONSO ÁLZATE GÓMEZ**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
PEREIRA  
2012**

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

Director del programa

---

Director del proyecto

---

Jurado 1

---

Jurado 2

Pereira, 2012

## **AGRADECIMIENTOS**

# TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	10
CAPÍTULO 1 .....	12
CONCEPTOS GENERALES.....	12
1.1 MODELO DEL SISTEMA SMIB .....	12
1.1.1 Componentes del sistema.....	13
1.2 ESTABILIDAD DEL SISTEMA .....	14
1.2.1 Estabilidad de ángulo de rotor.....	15
1.2.2 Estabilidad de voltaje.....	15
1.2.3 Estabilidad de frecuencia .....	16
1.2.4 Análisis de pequeña señal.....	16
1.3 OSCILACIONES.....	17
1.4 CRITERIO DE CONTROLABILIDAD .....	17
1.4.1 Controlador PI.....	18
1.5 SISTEMAS DE TRANSMISIÓN FLEXIBLES DE CA (FACTS).....	18
1.5.1 Control suplementario para los FACTS: POD .....	19
1.5.2 Compensador de VAR estático (SVC).....	19
CAPÍTULO 2 .....	21
MODELOS DEL SISTEMA.....	21
2.1 MODELO LINEALIZADO DEL SISTEMA SMIB .....	21
2.1.1 Cálculo de las constantes del modelo linealizado del sistema sin SVC.....	22
2.1.2 Determinación de la estabilidad del sistema sin SVC .....	24
2.2 MODELO LINEALIZADO DEL SISTEMA SMIB CON SVC.....	24
2.2.1 Modelo de espacio de estados .....	26
2.2.2 Cálculo de las constantes del modelo linealizado del sistema con SVC .....	27
2.2.3 Determinación de la estabilidad del sistema con SVC.....	28
2.3 DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DEL CONTROLADOR PI ( $K_p$ Y $K_i$ ).....	29
2.3.1 Construcción de la matriz B .....	30
2.3.2 Construcción de la matriz C .....	30
2.4 MODELAMIENTO DE LAS CARGAS .....	31

2.4.1 Modelo de carga exponencial.....	32
2.4.2 Parámetros de $n_p$ y $n_q$ .....	33
2.5 PERTURBACIONES EN LAS ENTRADAS DEL SISTEMA .....	33
CAPÍTULO 3 .....	35
PROCEDIMIENTO.....	35
3.1 RECOLECCIÓN DE DATOS .....	35
3.1.1 Datos del sistema SMIB.....	35
3.1.2 Datos para el SVC .....	37
3.2 CONSTANTES DEL MODELO LINEALIZADO PARA EL PUNTO DE OPERACIÓN SELECCIONADO .....	37
3.2.1 Constantes del modelo linealizado sin SVC .....	37
3.2.2 Constantes del modelo linealizado con SVC .....	38
3.3 MODELO DE ESPACIO DE ESTADOS SIN SVC .....	39
3.4 MODELO DE ESPACIO DE ESTADOS DEL SISTEMA CON SVC .....	40
3.5 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL CONTROLADOR PI .....	41
3.5.1 Parámetros $K_p$ y $K_i$ .....	41
3.6 MODELAMIENTO DE LAS CARGAS .....	41
3.7 ENTORNO DE SIMULACIÓN.....	42
3.7.1 Valores iniciales en las entradas .....	43
3.7.2 Configuración del simulador .....	43
CAPÍTULO 4 .....	45
ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	45
4.1 PERTURBACIÓN EN EL TORQUE MECÁNICO ( $T_m$ ).....	45
4.1.1 Respuesta en el voltaje en terminales con variación en $T_m$ .....	47
4.1.2 Respuesta en la velocidad angular $\omega$ con variación en $T_m$ .....	48
4.1.3 Respuesta en el ángulo de par $\delta$ con variación en $T_m$ .....	49
4.2 PERTURBACIÓN EN EL VOLTAJE DE REFERENCIA ( $V_{ref}$ ).....	50
4.2.1 Respuesta en el voltaje en terminales con variación en $V_{ref}$ .....	52
4.2.2 Respuesta en la velocidad angular $\omega$ con variación en $V_{ref}$ .....	53
4.2.3 Respuesta en el ángulo de par $\delta$ con variación en $V_{ref}$ .....	55
4.3 RESPUESTA EN LAS SALIDAS CON MODELO DE CARGA CORRIENTE CONSTANTE .....	56
4.3.1 Respuesta en el voltaje en terminales $V_t$ con $I$ constante.....	57
4.3.2 Respuesta en el ángulo de par $\delta$ con $I$ constante .....	58

4.3.3 Respuesta en la velocidad angular $\omega$ con I constante .....	59
4.4 RESPUESTA EN LAS SALIDAS CON MODELO DE CARGA IMPEDANCIA CONSTANTE .....	60
4.4.1 Respuesta en el voltaje en terminales $V_t$ con Z constante .....	61
4.4.2 Respuesta en el ángulo de par $\delta$ con Z constante .....	62
4.4.3 Respuesta en la velocidad angular $\omega$ con Z constante .....	63
4.5 RESPUESTA EN LAS SALIDAS CON MODELO DE CARGA POTENCIA CONSTANTE.....	64
4.5.1 Respuesta en el voltaje en terminales $V_t$ con P constante.....	65
4.5.2 Respuesta en el ángulo de par $\delta$ con P constante .....	66
4.5.3 Respuesta en la velocidad angular $\omega$ con P constante .....	67
CONCLUSIONES.....	69
BIBLIOGRAFÍA.....	71

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo del sistema SMIB .....	12
Figura 2. Representación de una máquina síncrona.....	13
Figura 3. Modelamiento de una línea corta.....	13
Figura 4. Clasificación de la estabilidad .....	14
Figura 5. Control proporcional e integral.....	18
Figura 6. Controlador suplementario para los FACTS (POD) .....	19
Figura 7. Compensador de VAR estático (SVC) .....	20
Figura 8. Modelo de Heffron-Phillips de un sistema SMIB sin SVC.....	22
Figura 9. Modelo planteado del SVC.....	25
Figura 10. Esquema general del SVC conectado al sistema.....	25
Figura 11. Modelo linealizado del sistema SMIB con SVC .....	27
Figura 12. SIMULINK .....	42
Figura 13. Ajuste de parámetros de parada y método de solución.....	43
Figura 14. Ajuste de entradas y salidas.....	44
Figura 15. Parámetros del escalón $T_m$ .....	46
Figura 16. Características del tren de pulsos en $T_m$ .....	46
Figura 17. Tren de pulsos para $T_m$ .....	46
Figura 18. Respuesta en el voltaje en terminales con variación en $T_m$ .....	47
Figura 19. Respuesta del voltaje en terminales al introducir un tren de pulso en $T_m$ .....	47
Figura 20. Respuesta en la Velocidad angular con variación en $T_m$ .....	48
Figura 21. Respuesta de la velocidad angular al introducir un tren de pulso en $T_m$ .....	49
Figura 22. Respuesta del ángulo de par con variación en $T_m$ .....	49
Figura 23. Respuesta del ángulo de par al introducir un tren de pulso en $T_m$ .....	50
Figura 24. Parámetros del escalón $V_{ref}$ .....	51
Figura 25. Características del tren de pulsos en $V_{ref}$ .....	51
Figura 26. Tren de pulsos para $V_{ref}$ .....	52
Figura 27. Respuesta en el voltaje en terminales con variación en $V_{ref}$ .....	52
Figura 28. Respuesta del voltaje en terminales al introducir un tren de pulsos en $V_{ref}$ .....	53
Figura 29. Respuesta en la Velocidad angular con variación en $V_{ref}$ .....	53
Figura 30. Respuesta de la velocidad angular al introducir un tren de pulsos en $V_{ref}$ .....	54
Figura 31. Respuesta en el ángulo de par con variación en $V_{ref}$ .....	55
Figura 32. Respuesta del ángulo de par al introducir un tren de pulso en $V_{ref}$ .....	56
Figura 33. Respuesta en el voltaje en terminales a variación en $T_m$ con modelo de carga corriente constante.....	57
Figura 34. Respuesta en el voltaje en terminales a variación en $V_{ref}$ con modelo de carga corriente constante.....	57
Figura 35. Respuesta en el Ángulo de par a variación en $T_m$ con modelo de carga corriente constante .....	58

Figura 36. Respuesta en el ángulo de par a variación en $V_{ref}$ con modelo de carga corriente constante .....	59
Figura 37. Respuesta en la velocidad angular a variación en $T_m$ con modelo de carga corriente constante .....	59
Figura 38. Respuesta en la velocidad angular a variación en $V_{ref}$ con modelo de carga corriente constante .....	60
Figura 39. Respuesta en el voltaje en terminales a variación en $T_m$ con modelo de carga impedancia constante.....	61
Figura 40. Respuesta en el voltaje en terminales a variación en $V_{ref}$ con modelo de carga impedancia constante.....	61
Figura 41. Respuesta en el ángulo de par a variación en $T_m$ con modelo de carga impedancia constante .....	62
Figura 42. Respuesta en el ángulo de par a variación en $V_{ref}$ con modelo de carga impedancia constante .....	63
Figura 43. Respuesta en la velocidad angular a variación en $T_m$ con modelo de carga impedancia constante.....	63
Figura 44. Respuesta en la velocidad angular a variación en $V_{ref}$ con modelo de carga impedancia constante.....	64
Figura 45. Respuesta en el voltaje en terminales a variación en $T_m$ con modelo de carga potencia constante .....	65
Figura 46. Respuesta en el voltaje en terminales a variación en $V_{ref}$ con modelo de carga potencia constante .....	65
Figura 47. Respuesta en el ángulo de par a variación en $T_m$ con modelo de carga potencia constante .....	66
Figura 48. Respuesta en el ángulo de par a variación en $V_{ref}$ con modelo de carga potencia constante .....	66
Figura 49. Respuesta en la velocidad angular a variación en $T_m$ con modelo de carga potencia constante .....	67
Figura 50. Respuesta en la velocidad angular a variación en $V_{ref}$ con modelo de carga potencia constante .....	67

# INTRODUCCIÓN

Actualmente el sistema eléctrico de potencia (SEP) consta de numerosas interconexiones entre compañías prestadoras del servicio, que buscan mejorar la seguridad en la operación de la red y optimizar costos, obedeciendo a un acelerado cambio del mercado eléctrico. Se observa entonces como los sistemas eléctricos de potencia, encargados de satisfacer las progresivas necesidades energéticas de las últimas décadas han sido exigidos considerablemente, hasta el punto de alcanzar los límites operativos en horas de demanda pico, en los cuales, los problemas de estabilidad ocurren y las perturbaciones pueden ocasionar el colapso del sistema. Desde este punto de vista, las nuevas estructuras requieren de un sistema flexible a futuros cambios que las redes convencionales difícilmente pueden satisfacer, lo que conlleva a una serie de problemas como sobrecargas, oscilaciones de potencia y subutilización del potencial de transmisión, entre otros.

Las oscilaciones electromecánicas crecientes pueden ocasionar problemas que afecten directamente el sistema eléctrico provocando los siguientes efectos: pérdida de estabilidad dinámica, actuación de los sistemas de protección, aumento de la probabilidad de cortes de carga, deterioro de la calidad del servicio, disminución de la confiabilidad del sistema; y en ciertos casos, provocar que el sistema evolucione hacia el colapso.[1]

Históricamente se ha prestado mucha atención a las centrales de generación, los equipos de transmisión y distribución pero la representación de las cargas ha sido quien recibe menos atención y sigue siendo un área de gran incertidumbre. Muchos estudios han demostrado que la representación de la carga puede tener un impacto significativo en el resultado de los análisis. [2]

Como parte de éste proyecto se estudiará la dinámica del sistema SMIB sometido a diferentes perturbaciones cuando existe un SVC conectado a él, considerando los criterios de ajuste de su amortiguador de oscilaciones (POD). De acuerdo con lo anterior se procede a linealizar las ecuaciones del sistema resultante para obtener las constantes de linealización ( $K_1$  a  $K_6$ ) que serán tenidas en cuenta al momento de la simulación. También se analizarán los efectos en el sistema cuando el POD ha sido ajustado mediante técnicas de control clásico y se mostraran los resultados a través de simulaciones en MATLAB con el toolbox SIMULINK.

Los objetivos de este estudio serán realizar un análisis dinámico del sistema SMIB y del POD de un SVC, partiendo de su modelo de espacio de estados para ajustar los parámetros del controlador del SVC haciendo uso de métodos de control clásico. Esto se implementara en el software Matlab de forma tal que simplifique los cálculos para determinar los valores óptimos de las constantes  $K_p$  y  $K_i$  de acuerdo el método de asignación de polos. También se simulara el sistema SMIB con y sin SVC ante diferentes perturbaciones y la influencia de los tipos de carga.

En este punto se utilizara SIMULINK para apreciar el comportamiento en una interfaz gráfica de las salidas del sistema. Seguidamente se comparan las respuestas del SMIB ante diferentes perturbaciones y se consignan en el contenido de este proyecto.

Se propone el análisis de las oscilaciones en un sistema Máquina Síncrona-Barra Infinita (SMIB) y el comportamiento del compensador de oscilaciones (POD) del SVC cuando se conectan diferentes tipos de carga al sistema. Para la representación de las cargas se utiliza el “modelo de carga exponencial” que relaciona la potencia, la tensión y los parámetros  $n_p$  y  $n_q$  acorde a los cuales se diferencian tres modelos, corriente, potencia e impedancia constante. El efecto de los parámetros de carga tiene influencia en la potencia activa y la potencia reactiva del punto de operación seleccionado y es incluido en el código del editor de Matlab para calcular nuevamente las constantes de  $K_1$  a  $K_6$ , de esta forma se procederá al análisis de resultados y a generar las respectivas conclusiones.

# CAPÍTULO 1

## CONCEPTOS GENERALES

### 1.1 MODELO DEL SISTEMA SMIB

La tendencia actual es trabajar con un sistema eléctrico de transmisión y distribución que interconecte las diferentes centrales generadoras y los puntos de demanda, de modo que una sola central y más aún, una sola máquina representa un pequeño porcentaje de la potencia total del sistema. Evidentemente esta máquina no estará capacitada para alterar ni el voltaje ni la frecuencia del sistema eléctrico. En el límite se puede considerar que el sistema mantiene el voltaje y la frecuencia invariables, lo que se puede asimilar a una máquina que tiene cero impedancia interna e inercia rotacional infinita. [3]

El SMIB podría entenderse como un sistema de potencia que consta de un generador síncrono que está conectado a un barraje infinito por medio de una línea de transmisión.

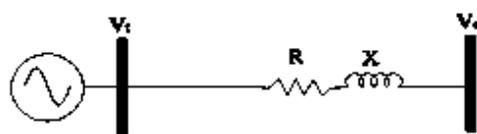


Figura 1. Modelo del sistema SMIB

Fuente: "Efecto De Un Compensador De VAR Estático En El Amortiguamiento De Las Oscilaciones"

### 1.1.1 Componentes del sistema

- Generador síncrono, se emplea en la generación de energía para convertir potencia mecánica en potencia eléctrica. Es una máquina cuya corriente de campo magnético la suministra una fuente de potencia CA externa. Este ópera siempre a velocidad síncrona ( $n_s=1$ ). [4]

Cuando un generador síncrono se conecta a un sistema de potencia, a menudo el sistema de potencia es tan grande que ninguna de las acciones del operador del generador tendrá gran efecto en el sistema.

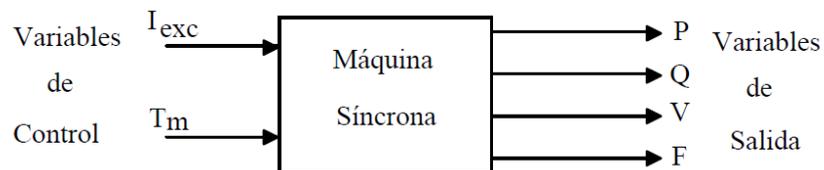


Figura 2. Representación de una máquina síncrona  
Fuente: "Sistemas Eléctricos de Potencia II"

- Línea de Transmisión, presentan diferentes modelos en función de su longitud, tensión y frecuencia, de acuerdo a su longitud se clasifican en cortas (voltaje menor a 115Kv y longitud menor a 80 Km), medias y largas.

La línea modelada como una línea corta es la que considera el efecto serie. Se desprecia el efecto piel (se desprecia la admitancia shunt). Se concentran los valores totales de la resistencia (R) y de la inductancia (L). [5]

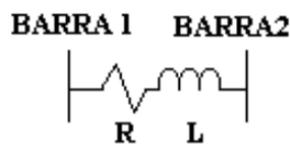


Figura 3. Modelamiento de una línea corta  
Fuente: "Modelamiento de Sistemas Eléctricos en Presencia de Armónicos"

- Barraje infinito, es una idealización de un sistema de potencia, el cual es tan grande que en él no varían ni el voltaje ni la frecuencia sin importar que tanta potencia activa y reactiva se le demande o se le suministre.[4]

Un gran SEP puede considerarse como una barra infinita para muchos fines prácticos. En este caso entonces, dado que el voltaje y la frecuencia se mantienen constantes, las variables de salida se reducen a las potencias activa P y reactiva Q donde la corriente de excitación ( $I_{exc}$ ) influye fundamentalmente en Q y el torque motriz ( $T_m$ ) influye básicamente en P; es decir, hay un acoplamiento débil entre  $I_{exc}$  y P y entre  $T_m$  y Q. [3]

## 1.2 ESTABILIDAD DEL SISTEMA

Se dice que un sistema de potencia está en una condición de operación de estado estable si todas las cantidades físicas que se miden (o se calculan) y que describen la condición de operación del sistema, se pueden considerar constantes para propósitos de análisis. Si, cuando se está en una condición de estado estable, ocurre un cambio repentino o una secuencia de cambios en uno o más parámetros del sistema o en una o más de sus cantidades de operación (variables), se dice que el sistema experimenta un disturbio o una perturbación de su condición de operación de estado estable. Las perturbaciones pueden ser grandes o pequeñas de acuerdo con su origen. Un sistema se mantiene estable en la medida que sus máquinas son capaces de mantenerse en sincronismo. [6]

Una perturbación grande es aquella para la cual las ecuaciones no lineales que describen la dinámica del sistema de potencia no se pueden linealizar de forma válida para propósitos de análisis. Las fallas en los sistemas de potencia, los cambios repentinos y grandes de carga, la pérdida de unidades generadoras y las maniobras en líneas son ejemplos de perturbaciones grandes y se estudian bajo el nombre de estabilidad transitoria. Los estudios de estabilidad transitoria, normalmente se hacen en base a la primera oscilación lo que significa considerar un tiempo de hasta un segundo. [6]

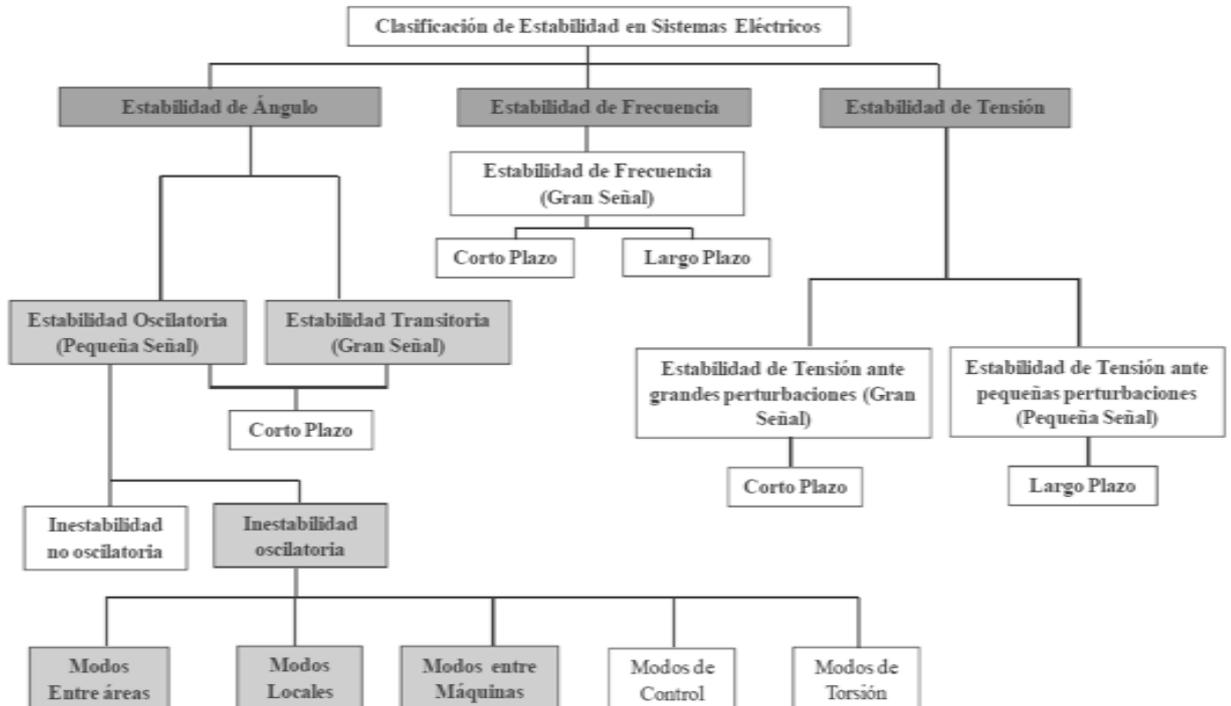


Figura 4. Clasificación de la estabilidad

Fuente: “Estabilidad y Amortiguamiento de Oscilaciones en Sistemas Eléctricos con Alta Penetración Eólica”

De forma general los estudios de estabilidad se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Estabilidad de ángulo de rotor.
- Estabilidad de voltaje.
- Estabilidad de frecuencia.

### **1.2.1 Estabilidad de ángulo de rotor**

Es entendida como la capacidad de las máquinas síncronas de un sistema interconectado para mantener el sincronismo después de haber estado sometidas a una perturbación. La estabilidad del ángulo depende de la capacidad de restaurar el equilibrio entre el par electromagnético y el par mecánico de cada máquina en el sistema. En caso de ocurrir, la inestabilidad aparece como un incremento de las oscilaciones de ángulo de algunos generadores, que pierden su sincronismo con otros generadores.

En régimen permanente, el par de entrada mecánico y el par de salida electromagnético se encuentran equilibrados, y la velocidad permanece constante. En esta situación, una perturbación del equilibrio puede provocar una variación de velocidad en los rotores de las máquinas. La estabilidad de ángulo depende de la existencia de un par sincronizante (en fase con la variación del ángulo del rotor y cuyo defecto provoca una inestabilidad no oscilatoria) y un par amortiguador (en fase con la variación de velocidad, causando su falta una inestabilidad oscilatoria). [7]

### **1.2.2 Estabilidad de voltaje**

La estabilidad de tensión se refiere a la capacidad del sistema para mantener las tensiones constantes en todas las barras del sistema después de haber sido sometido a una perturbación partiendo de una condición inicial de operación dada. En este caso la estabilidad depende de la capacidad de restaurar el equilibrio entre la carga y la generación del sistema. La inestabilidad que podría ocurrir ocasionaría una progresiva disminución o incremento de tensión en algunos nodos, provocando pérdida de carga en un área o la actuación de protecciones que provocaría interrupciones en cascada. Estas interrupciones pueden causar la pérdida del sincronismo de algunos generadores, fenómeno que también puede producirse por condiciones de operación que excedan los límites de la corriente de campo.

El colapso de tensión es el proceso por el cual la secuencia de eventos posteriores a una inestabilidad de tensión desemboca en bajas tensiones en una parte significativa del sistema

eléctrico, o incluso en un apagón generalizado. Normalmente las cargas desempeñan un papel determinante en la inestabilidad de tensión. Después de una perturbación que origine una caída de tensión en una parte del sistema, la eventual corrección de la potencia consumida por las cargas puede incrementar el consumo de potencia reactiva y causar una reducción adicional de la tensión. Otra posible causa del colapso de tensión es la caída de tensión que ocurre cuando la potencia activa y reactiva fluye a través de las reactancias inductivas de la red de transmisión. Esto limita la capacidad de la red de transmisión para transferir potencia y suministrar tensión. El riesgo de inestabilidad se produce cuando las cargas dinámicas intentan restaurar el consumo de potencia excediendo la capacidad de la red y de la generación. [7]

### **1.2.3 Estabilidad de frecuencia**

La estabilidad de frecuencia se refiere a la capacidad de un sistema de potencia para mantener la frecuencia constante tras una severa perturbación, que resulta en un desequilibrio significativo entre la generación y la carga. Cuando el sistema se somete a perturbaciones severas puede aparecer una inestabilidad en forma de oscilaciones de frecuencia, provocando el disparo de unidades de generación y/o cargas. En sistemas interconectados muy grandes, los problemas de estabilidad de frecuencia se asocian con respuestas inadecuadas del equipo, deficiente coordinación del control y equipo de protección, o una reserva de generación insuficiente.

La estabilidad de frecuencia puede ser un fenómeno a corto plazo o a largo plazo, dependiendo de las características de los procesos y dispositivos que se activan, que van desde fracciones de segundos (esquema de alivio de carga debido a bajas frecuencias) hasta varios minutos (respuesta de dispositivos como una turbina y reguladores de tensión de carga). Las variaciones de frecuencia generan cambios significativos en las magnitudes de tensión, que a su vez afectan al desequilibrio carga) generación.

### **1.2.4 Análisis de pequeña señal**

La estabilidad de pequeña señal o estabilidad de ángulo del rotor de pequeñas perturbaciones se refiere a la habilidad del sistema de potencia de mantener sincronismo bajo perturbaciones pequeñas. Tales oscilaciones deben ser amortiguadas por los elementos de control del sistema, con el fin de evitar pérdida de sincronismo de las máquinas, la cual eventualmente puede conducir a inestabilidad transitoria.[8]

Si el sistema de potencia está operando en una condición estable y experimenta un cambio que puede ser analizado de manera apropiada a través de versiones linealizadas de sus ecuaciones dinámicas, se dice que ha ocurrido una perturbación pequeña. Como ejemplos, podemos mencionar, un cambio pequeño y gradual de carga, un cambio en la ganancia de un regulador automático de voltaje en el sistema de excitación de una gran unidad generadora. [6]

Los valores propios de la matriz de estado del sistema eléctrico poseen información directa sobre las frecuencias de oscilación. Con estas frecuencias se puede estudiar la estabilidad en pequeña señal (estabilidad a perturbaciones de pequeña magnitud) en un punto de operación. Este análisis se conoce como análisis modal de un modelo linealizado del sistema, en el cual se analizan los valores propios dominantes que influyen en la respuesta dinámica. [7]

### **1.3 OSCILACIONES**

Las perturbaciones inherentes en los sistemas de potencia provocan desequilibrios entre el torque mecánico y el torque electromagnético de cada máquina síncrona del sistema. Tal desequilibrio se manifiesta en forma de crecientes oscilaciones angulares de algunos generadores que puede llevar a pérdida de sincronismo con otros generadores. [8]

Las oscilaciones inestables pueden ser causadas por interacción entre varios generadores en una planta y tener primariamente efectos locales, o se pueden iniciar por interacción entre grupos de generadores y tener efectos en un área mucho más extensa del sistema. Estas últimas son generalmente difíciles de analizar y corregir. [9]

Los problemas de inestabilidad oscilatoria electromecánica permanente pueden superarse mediante la aplicación de estabilizadores de potencia en ciertos generadores del sistema de potencia. La función básica del estabilizador es extender los límites de estabilidad modulando la excitación del generador para amortiguar las oscilaciones de los rotores de las máquinas síncronas. Para proveer amortiguamiento, el estabilizador debe producir un componente del par eléctrico en el rotor en fase con las variaciones de velocidad. [7]

### **1.4 CRITERIO DE CONTROLABILIDAD**

La controlabilidad juega un papel importante en el diseño de sistemas de control en el espacio de estado. De hecho, las condiciones de controlabilidad, pueden gobernar la existencia de una solución completa, en el problema de diseño de sistemas de control. La solución a este

problema no puede existir si el sistema considerado no es controlable. Aunque la mayoría de los problemas físicos son controlables y observables, los modelos matemáticos correspondientes pueden no tener la propiedad de controlabilidad. Entonces se requiere conocer las condiciones bajo las cuales un sistema es controlable. La controlabilidad tiene que ver con la posibilidad de llevar al sistema de cualquier estado inicial a cualquier estado final en tiempo finito, no importando que trayectoria se siga, o que entrada se use. El factor de controlabilidad se define como una medida de la efectividad de la señal de entrada y la señal de retroalimentación. [7], [10], [11]

### 1.4.1 Controlador PI

Este tipo de control combina las características de los controladores proporcional e integral.  $K_p$  ayuda a corregir más rápidamente el error,  $K_i/s$  elimina totalmente el error. Con este tipo de controlador, las condiciones de estabilidad se mejoran con respecto al control integral puro.

Nótese que el controlador PI también puede ser interpretado como un controlador integrativo con un cero ubicado en  $s = -K_i/K_p$ , el cual mejora las condiciones de estabilidad. [12]

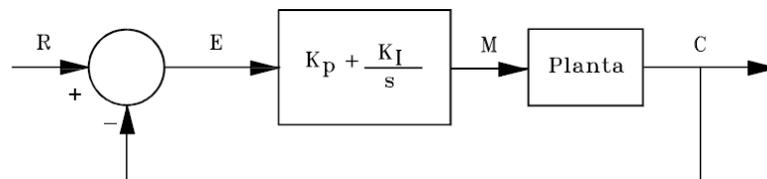


Figura 5. Control proporcional e integral  
Fuente: "Teoría de Control"

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_p(s + \frac{K_i}{K_p})}{s}$$

Función de transferencia del controlador PI

## 1.5 SISTEMAS DE TRANSMISIÓN FLEXIBLES DE CA (FACTS)

Los sistemas flexibles de transmisión de AC (FACTS) son una tecnología emergente que busca aumentar la capacidad de control y de transferencia de potencia en sistemas de AC usando la conmutación mediante dispositivos de electrónica de potencia para controlar el flujo a través del Sistema Eléctrico de potencia (SEP). [13]

### 1.5.1 Control suplementario para los FACTS: POD

El método para encontrar el lugar más apropiado para la señal de retroalimentación en el diseño de control, es una técnica práctica y sencilla para el diseño de controladores adicionales para los FACTS. Sin embargo en algunos casos los FACTS sin control suplementario pueden excitar a otros modos de oscilación, lo que lleva a la inestabilidad debido a las oscilaciones en aumento en el ángulo del rotor.

Es por eso que algunos controladores adicionales se aplican, como el POD (amortiguadores de oscilación de potencia), que consisten generalmente en un bloque de “washout”, uno o más bloques de adelanto-retraso y un bloque de ganancia, que se muestra en la figura 6. [7]

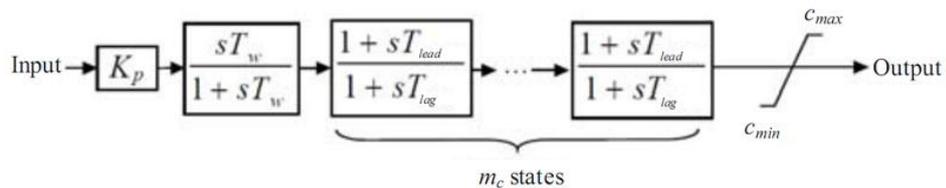


Figura 6. Controlador suplementario para los FACTS (POD)

Fuente: “Decentralized Control for FACTS (SVC and TCSC) using POD in Power Systems”

Donde,

$T_{lead}$  Constantes de tiempo de adelanto. Toman valores entre 0.1 y 0.9.

$T_{lag}$  Constantes de tiempo de retraso. Toma valor alrededor de 0.05.

$T_w$  Constante de tiempo de despeje, con valores típicos entre 1 y 10.

$K_p$  Ganancia del estabilizador, que puede fluctuar entre 0.1 y 100.

$s$  Variable de Laplace.

### 1.5.2 Compensador de VAR estático (SVC)

El término “estático” es usado para indicar que el SVC, a diferencia del compensador síncrono, no tiene componentes principales móviles o giratorias. Por lo tanto un SVC consiste en un generador de var estático (SVG), dispositivos que absorben y dispositivos de control. [14]

Un compensador de VAR estático (SVC) consiste en un TCR en paralelo con uno o más TSC. El arreglo general de un SVC se ve en la figura 7. Los elementos reactivos del compensador se conectan a la línea de transmisión a través de un transformador, para evitar que los elementos deban resistir todo el voltaje del sistema. Un sistema de control determina los instantes exactos de disparo de los reactores, de acuerdo con una estrategia predeterminada. Esta estrategia suele tratar de mantener el voltaje de línea en un valor fijo. [13]

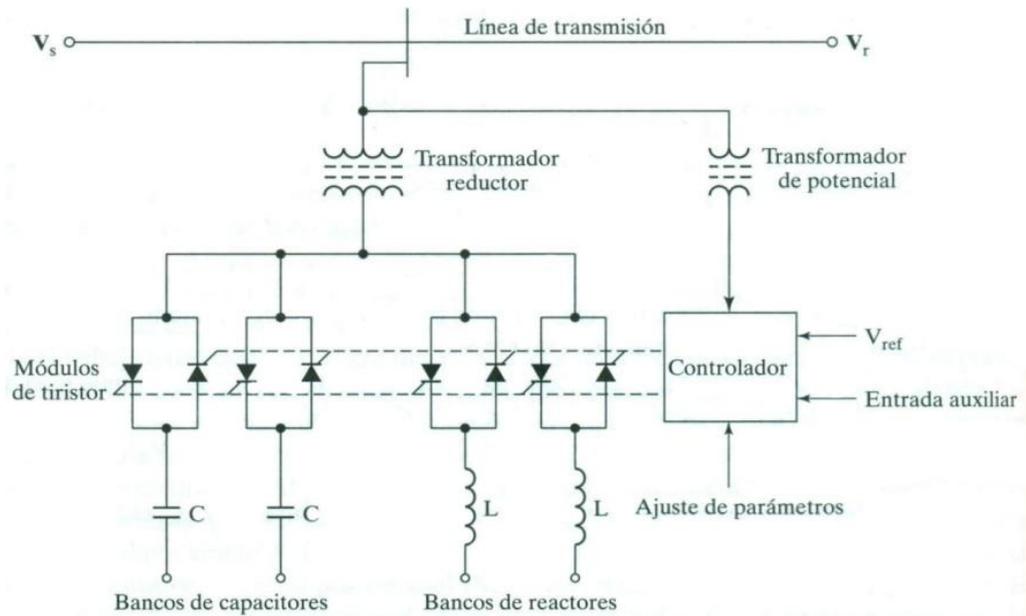


Figura 7. Compensador de VAR estático (SVC)

Fuente: "Electrónica de potencia. Circuitos, dispositivos y aplicaciones"

Los SVC's son instalados para la compensación de potencia reactiva controlada. Sin embargo, además de incrementar el flujo de potencia y la región de estabilidad transitoria, el SVC tiene otras funciones tales como:

- Control de estabilidad de tensión.
- Amortiguamiento y control de estabilidad.
- Amortiguamiento y control de oscilaciones subsíncronas.
- Mejoramiento en interconexiones con sistemas HVDC. [24]

El SVC está equipado con un regulador de tensión, el cual incrementa el torque sincronizador. En general, la contribución al torque amortiguador con sólo el regulador de tensión es pequeña. La acción de control suplementaria aplicada a los dispositivos SVC para incrementar el sistema de amortiguamiento es llamada POD, a fin de desplazar la componente real de  $\lambda_i$  hacia la izquierda. [15] [16][17]

## CAPÍTULO 2

### MODELOS DEL SISTEMA

#### 2.1 MODELO LINEALIZADO DEL SISTEMA SMIB

Las expresiones que describen el comportamiento del sistema son un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales, con coeficientes dependientes del tiempo ya que las inductancias propias y mutuas tanto del rotor como del estator de la máquina síncrona dependen de la posición angular del rotor. La complejidad del modelo se incrementa en la medida en que se consideren los efectos subtransitorios y transitorios, con sus reactancias correspondientes. [18] [19]

Definiendo el punto de operación como  $X_o$ ,  $Y_o$  y  $Z_o$ , se linealiza las ecuaciones diferenciales del modelo Heffron-Philips alrededor de éste. [18]

$$\Delta \dot{\delta} = \omega_0 \Delta v$$

$$\Delta \dot{v} = -\frac{1}{2H} [-\Delta P_e - D\omega_0 \Delta v]$$

$$\Delta \dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{do}} [-\Delta E_{fd} - \Delta E'_q]$$

$$\Delta \dot{E}_{fd} = -\frac{1}{T_A} [\Delta E_{fd} + K_A (K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q - \Delta V_{ref})]$$

Donde,

$P_e$  es la potencia de entrada.

$E_{fd}$  es el voltaje de excitación.

$E_q$  es el voltaje de eje de cuadratura.

$E'_q$  es el voltaje transitorio de eje en cuadratura (también conocida como  $E_q'$ ).

$V_{ref}$  es el voltaje de referencia (se asumió igual a cero).

$\delta$  es el ángulo del rotor.

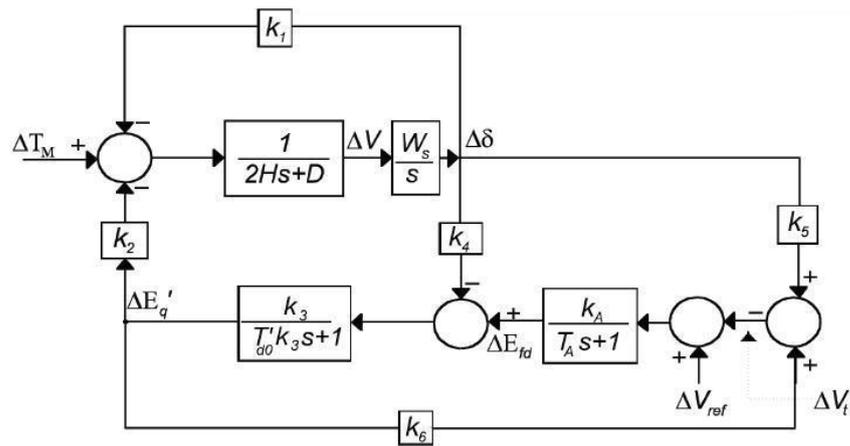


Figura 8. Modelo de Heffron-Phillips de un sistema SMIB sin SVC  
Fuente: "Diseño de los parámetros de un estabilizador de sistemas de potencia (PSS) basado en una técnica evolutiva"

### 2.1.1 Cálculo de las constantes del modelo linealizado del sistema sin SVC

Los cálculos previos para obtener las constantes  $K_1$  a  $K_6$  son los siguientes [19]

$$S = P + jQ$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{Q}{P} \right)$$

$$V_{t1} = V_{t0} (\cos \theta + j \operatorname{sen} \theta)$$

$$V_{\text{inf}1} = V_{\text{inf}} (\cos \beta + j \operatorname{sen} \beta)$$

$$I_g = \frac{V_{t1} - V_{\text{inf}1}}{jX_e}$$

$$E = V_{t1} + jX_q I_g$$

$$\delta = \tan^{-1} \left( \frac{X_q I_g}{Vt_1} \right)$$

$$I_{go} = I_g \left( \cos \left( \delta - \frac{\pi}{2} \right) - j \text{sen} \left( \delta - \frac{\pi}{2} \right) \right)$$

$$I_{do} = \text{real} (I_{go})$$

$$I_{qo} = \text{imag} (I_{go})$$

$$V = Vt_1 \left( \cos \left( \delta - \frac{\pi}{2} \right) - j \text{sen} \left( \delta - \frac{\pi}{2} \right) \right)$$

$$V_{do} = \text{real} (V)$$

$$V_{qo} = \text{imag} (V)$$

$$E'_q = V_{qo} + X'_d I_{do}$$

$$E_{fd} = E'_q + (X_d - X'_d) I_{do}$$

$$Det = (X_e + X_q)(X_e + X'_d)$$

Constantes K<sub>1</sub> a K<sub>6</sub>

$$K_1 = \frac{V_{\text{inf}}}{Det} \left( (X'_d + X_e)(E'_q - (X'_d - X_q)I_{do}) \cos \delta - I_{qo} \text{sen} \delta (X_e + X_q)(X'_d - X_q) \right)$$

$$K_2 = I_{qo} \left( 1 - \frac{(X_e + X_q)(X'_d - X_q)}{Det} \right)$$

$$K_3 = \frac{(X'_d + X_e)}{(X_d - X'_d) + (X'_d + X_e)}$$

$$K_4 = \frac{V_{\text{inf}}}{Det} \left( (X_e + X_q)(X_d - X'_d) \text{sen} \delta \right)$$

$$K_5 = \frac{V_{\text{inf}}}{Vt_o \cdot Det} \left( V_{do} X_q (X'_d + X_e) \cos \delta - V_{qo} X'_d (X_e + X_q) \text{sen} \delta \right)$$

$$K_6 = \frac{V_{qo}}{Vt_o} \left( 1 - \frac{X'_d (X_e + X_q)}{Det} \right)$$

Donde,

$V_{\text{inf}}$      $V_{\text{inf}}$  es el voltaje del barraje infinito.

$\delta$         delta es el ángulo del voltaje en terminales de la maquina síncrona.

$I_{qo}$        $I_{qo}$  es la corriente de armadura de eje en cuadratura.

$V_{do}$  Vdo es el voltaje de eje directo.

$V_{qo}$  Vqo es el voltaje de eje en cuadratura.

### 2.1.2 Determinación de la estabilidad del sistema sin SVC

Para determinar la estabilidad del sistema, se utiliza la matriz A de 4 x 4, que representa el conjunto de ecuaciones de la maquina síncrona y la línea de transmisión.

$$A = \begin{pmatrix} \frac{1}{T_{do} \cdot K_3} & -\frac{K_4}{T_{do}} & 0 & \frac{1}{T_{do}} \\ 0 & 0 & \omega & 0 \\ -\frac{K_2}{2 \cdot H} & -\frac{K_1}{2 \cdot H} & -\frac{D \cdot \omega}{2 \cdot H} & 0 \\ -\frac{K_A \cdot K_6}{T_A} & -\frac{K_A \cdot K_5}{T_A} & 0 & -\frac{1}{T_A} \end{pmatrix}$$

Para verificar la estabilidad del sistema con el punto de operación seleccionado, se usa el polinomio característico de la matriz A, con el cual se pueden obtener las raíces del sistema e indicar si el sistema es estable o no.

## 2.2 MODELO LINEALIZADO DEL SISTEMA SMIB CON SVC

El propósito del SVC es del mantener un perfil adecuado de tensión en el sistema eléctrico, proveer de un medio de generación o absorción de reactivos, y a la vez, ampliar los límites de estabilidad del sistema eléctrico. También se puede pensar en el SVC como una alternativa para mejorar el amortiguamiento del sistema y tener una buena regulación de la tensión. La señal auxiliar U es aplicada a la entrada del controlador del SVC y al sistema de excitación de la máquina para amortiguar las oscilaciones del sistema cuando aparecen perturbaciones.

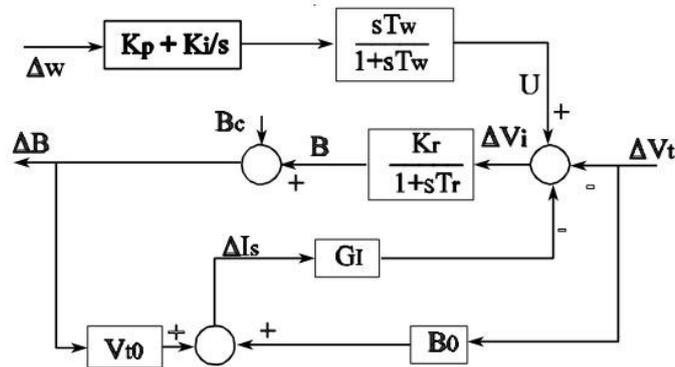


Figura 9. Modelo planteado del SVC

Fuente: "Efecto De Un Compensador De VAR Estático En El Amortiguamiento De Las Oscilaciones"

En la figura 10, se muestra la forma de conexión del SVC en el sistema conformado por una máquina síncrona conectada a un barraje infinito a través de una línea de transmisión. Se observa que el SVC se conecta en el barraje del generador.

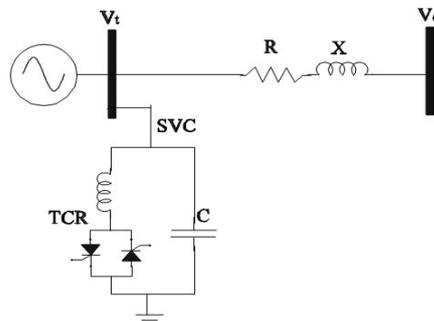


Figura 10. Esquema general del SVC conectado al sistema

Fuente: "Efecto De Un Compensador De VAR Estático En El Amortiguamiento De Las Oscilaciones"

La señal usada como entrada es la velocidad, pero puede usarse otras tales como la potencia eléctrica, la frecuencia o una combinación de varias señales. [16] [17]

Las expresiones que describen el comportamiento del sistema son el conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales utilizadas en el numeral 2.1 más la ecuación dada por la inclusión del SVC. [20]

$$\Delta \dot{B}_L = \frac{1}{T_\alpha} \left[ -\Delta B_L + K_\alpha (V_{ref} - V_t + \Delta V_s) \right]$$

### 2.2.1 Modelo de espacio de estados

El modelo de espacio de estados del sistema al incluir el SVC sería el siguiente

$$\Delta \dot{X} = A\Delta X + B\Delta U$$

$$Y = C\Delta X$$

Donde,

A es de dimensiones  $n \times n$  y se le conoce como matriz de realimentación.

B es de dimensiones  $n \times m$  y se le conoce como matriz de entrada. Si el sistema ha sido completamente descrito mediante variables de estado, siempre será posible expresar las salidas de interés en función de ellas.

C es de dimensiones  $p \times n$  y se le conoce como matriz de salida.

$$\begin{pmatrix} \dot{\Delta x}_1 \\ \dot{\Delta x}_2 \\ \vdots \\ \dot{\Delta x}_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} u(t)$$

$$y(t) = \begin{pmatrix} c_1 & c_2 & \cdots & c_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{pmatrix}$$

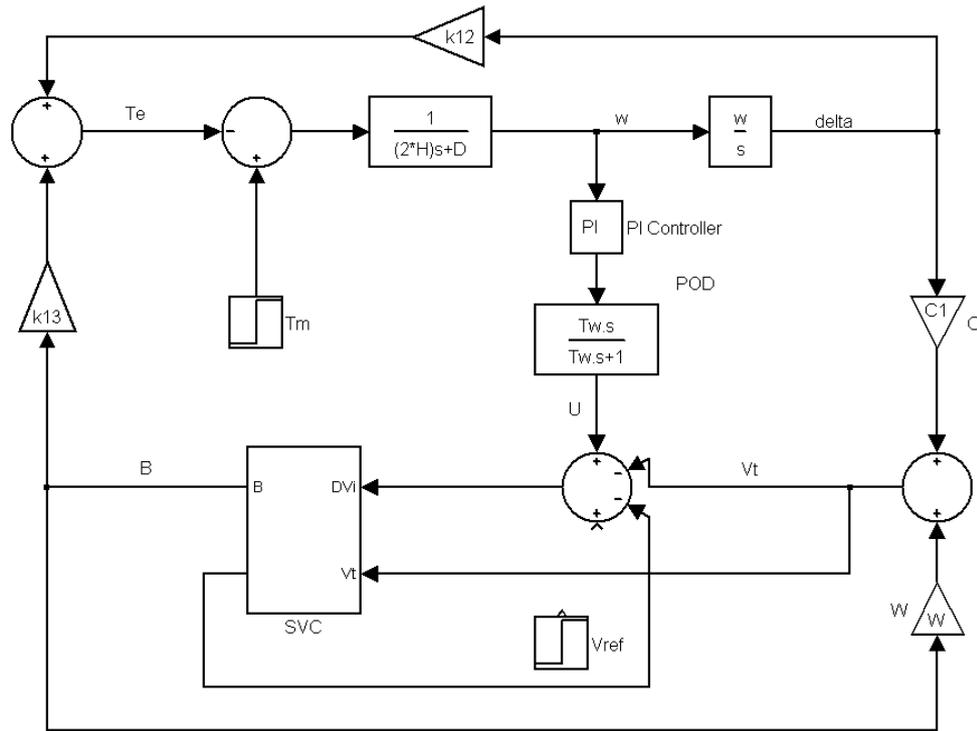


Figura 11. Modelo linealizado del sistema SMIB con SVC  
Fuente: "Simulador SIMULINK"

## 2.2.2 Cálculo de las constantes del modelo linealizado del sistema con SVC

El cálculo de las constantes  $K_{12}$ ,  $K_{13}$ ,  $C$  y  $W$  se realiza para simplificar el esquema de bloques del sistema al momento de las simulaciones cuando se incluye el SVC. [16]

$$K_d = K_5 - K_3 K_4 K_6$$

$$K_C = K_3 K_6 K_A$$

$$H_Q = \frac{K_d}{1 + K_C}$$

$$H_D = \frac{K_C}{1 + K_C}$$

$$K_8 = \frac{K_\alpha H_Q (1 + G_i B_o)}{1 + K_\alpha G_i V t_o}$$

$$K_9 = \frac{K_\alpha (1 - H_D (1 + G_i B_o))}{1 + K_\alpha G_i V t_o}$$

$$K_{10} = K_3 \left( -K_A H_Q - \frac{K_A K_8}{K_9} (H_D - 1) - K_4 \right)$$

$$K_{11} = \frac{K_3 K_A (1 - H_D)}{K_9}$$

$$K_{12} = K_1 + K_2 K_{10}$$

$$K_{13} = K_2 K_{11}$$

$$C = H_Q + \frac{K_8 H_D}{K_9}$$

$$W = \frac{H_D}{K_9}$$

### 2.2.3 Determinación de la estabilidad del sistema con SVC

Para determinar la estabilidad del sistema con SVC se utiliza una nueva matriz A 5 X 5 que incluye la ecuación del SVC (numeral 2.2) más las mencionadas en el ítem 2.1.

$$A = \begin{pmatrix} \frac{1}{T_{do} \cdot K_3} & -\frac{K_4}{T_{do}} & 0 & \frac{1}{T_{do}} & 0 \\ 0 & 0 & \omega & 0 & 0 \\ -\frac{K_2}{2 \cdot H} & -\frac{K_1}{2 \cdot H} & -\frac{D \cdot \omega}{2 \cdot H} & 0 & 0 \\ -\frac{K_A \cdot K_6}{T_A} & -\frac{K_A \cdot K_5}{T_A} & 0 & -\frac{1}{T_A} & 0 \\ -\frac{K_\alpha \cdot K_6}{T_\alpha} & -\frac{K_\alpha (K_5 - \frac{K_8}{K_9})}{T_\alpha} & 0 & 0 & \frac{\frac{K_\alpha}{K_9} - 1}{T_\alpha} \end{pmatrix}$$

Para verificar la estabilidad del sistema con el punto de operación seleccionado, se utiliza el polinomio característico de la matriz A, de este modo se puede obtener las raíces del sistema que a su vez indican si el sistema es estable.

## 2.3 DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES DEL CONTROLADOR PI (Kp Y Ki)

Para determinar los parámetros del compensador (POD) del SVC, se emplean métodos de control clásico, como el controlador PI. Éste tipo de control combina las características de los controladores proporcional e integral. Kp ayuda a corregir más rápidamente el error. Ki/s elimina totalmente el error. Con este tipo de controlador, las condiciones de estabilidad se mejoran con respecto al control integral puro. Nótese que el controlador PI también puede ser interpretado como un controlador integrativo con un cero ubicado en  $s = -Ki/Kp$ . [12]

El propósito es ajustar los valores Kp de la ganancia proporcional y Ki de la ganancia integral, ya que este se expresa como:

$$H(s) = \frac{sT_w}{1 + sT_w} \left[ K_p + \frac{Ki}{s} \right]$$

En el diseño del compensador tipo PI de ganancia fija, los ajustes Kp y Ki pueden calcularse asignando un par de valores propios especificados previamente,  $\lambda=\lambda_1$  y  $\lambda=\lambda_2$  para el modo electromecánico del generador. Este método es usualmente conocido como de asignación de polos. El procedimiento comienza con la linealización alrededor de un punto de operación, del conjunto de ecuaciones no lineales de los elementos que componen el sistema a estudiar, esto es, el generador y el regulador automático de voltaje. El procedimiento para obtener el modelo lineal es expresado en [21].

Finalmente se tiene la siguiente expresión para determinar los coeficientes Kp y Ki

$$H(\lambda) = \frac{1}{C(\lambda I - A)^{-1} B} = \frac{\lambda T_w}{1 + \lambda T_w} \left[ K_p + \frac{Ki}{\lambda} \right]$$

Entonces, sustituyendo un par de valores propios escogidos previamente  $\lambda=\lambda_1$  y  $\lambda=\lambda_2$  para el modo electromecánico en la ecuación anterior, se tienen un par de ecuaciones algebraicas con dos incógnitas, Kp y Ki.

Puesto que los elementos de la matriz A del sistema son dependientes de las condiciones de carga del generador, ellos cambian cuando se produce un cambio en las condiciones de operación del generador o cuando se presenta una perturbación mayor en el sistema tal como un fallo trifásico. Los valores propios del sistema se modifican como consecuencia de los cambios en la matriz A, si los ajustes del compensador,  $K_p$  y  $K_i$ , permanecen fijos. Por lo tanto para garantizar el amortiguamiento de las oscilaciones sobre un amplio rango de operación es deseable que los parámetros del compensador (POD) se adapten a las condiciones de operación de la máquina. [21]

### 2.3.1 Construcción de la matriz B

De acuerdo al modelo de espacio de estados planteado en el numeral 2.2.1, se obtienen dos vectores  $B_1$  y  $B_2$  con dimensiones  $5 \times 1$  que representan las entradas de voltaje de referencia y torque mecánico respectivamente del sistema que se verán afectadas por diversas perturbaciones en este estudio, respecto a las cuales se harán las respectivas simulaciones. Se tiene que:

$$B_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_e}{T_e} \\ \frac{K_\alpha}{T_\alpha} \end{pmatrix} \quad B_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{2 \cdot H} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Debido a que las perturbaciones se introducirán al sistema una por una, para efectos de cálculo se seleccionara el vector  $B_2$  el cual representa la entrada del torque.

### 2.3.2 Construcción de la matriz C

Basados en el numeral 2.2.1, se obtiene el vector C de dimensiones  $1 \times 5$ , el cual representa una de las salidas del sistema. La salida seleccionada fue la velocidad angular del rotor  $\omega$  para efectos de cálculo. El vector C es mostrado a continuación

$$C = (0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0)$$

## 2.4 MODELAMIENTO DE LAS CARGAS

Un modelo de carga es una representación matemática de la relación entre la tensión del barraje (magnitud y frecuencia) y la potencia (activa y reactiva) o corriente que circula por la carga del barraje. Dependiendo de la implementación computacional de estos modelos en un programa específico, la potencia de carga o corriente no se puede calcular de forma explícita, pero es útil pensar en el modelamiento de estos términos, se puede apreciar algunos de ellos como, modelo de carga polinomial, modelo de carga exponencial, modelo de carga dependiente de la frecuencia, modelo de carga estática EPRI LOADSYN y modelo de carga EPRI ETMSP. Para este estudio se utilizara el modelo de carga exponencial. [2]

El modelamiento de la carga depende del estilo de vida de los usuarios, el clima, el estado económico, ente otros factores. El modelo de la composición de carga no debe ser complejo y debe requerir de un proceso matemático con el cual se pueda obtener un manejo razonable del sistema.

Los efectos de las características de carga en la estabilidad son divididos en dos categorías generales, las cuales son característica estática y característica dinámica.

La característica estática representa las cargas por separado considerando la potencia activa y la potencia reactiva, y para representar ambas, se utilizan los modelos conocidos como impedancia constante, corriente constante y potencia constante. La combinación adecuada se selecciona a menudo sobre la base correspondiente de medidas o estimados de la carga con la tensión en torno a la tensión nominal, la variación con la frecuencia se considera por separado.

En cuanto a la dependencia de voltaje, se distingue para la potencia activa y la potencia reactiva. Los límites de estabilidad suelen disminuir cuando  $P(V)$  del modelo de impedancia constante cambia a un tipo de modelo como el de potencia constante, donde la carga es mayor especialmente en los centros remotos de generación.

La dependencia de la frecuencia es reconocida por su importante contribución al amortiguamiento del sistema. Adicional a la excitación de control, se tienen fuentes de amortiguamiento y las características son de carga-frecuencia y la fuerza motriz inherente a la velocidad de par. En algunos casos, para evaluar los beneficios de los estabilizadores en el sistema de potencia, es necesario contar con una buena representación de las fuentes (excitación del generador) de amortiguamiento. [22]

### 2.4.1 Modelo de carga exponencial

Un modelo de carga estática que representa la relación entre la potencia y la tensión como una ecuación exponencial, por lo general es de la siguiente forma:

$$P = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{np}$$

$$Q = Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^{nq}$$

Donde,

P y Q son la potencia reactiva y activa de la carga.

V es la tensión del barraje de la carga.

np y nq son los parámetros de la carga.

Po, Qo y Vo son los valores nominales de, potencia activa de la carga, potencia reactiva de la carga y la tensión del barraje antes de una perturbación. [17]

Los parámetros de este modelo son los exponentes np, nq y el factor de potencia de la carga. Teniendo en cuenta que mediante el establecimiento de los exponentes 0, 1 ó 2, la carga puede ser representada como modelos de “potencia constante”, “corriente constante”, o “impedancia constante”, respectivamente. Otros exponentes se pueden utilizar para representar el efecto agregado de los diferentes tipos de componentes de carga.

La representación de los diferentes tipos de carga son los siguientes:

- Modelo de carga de Impedancia constante, es un modelo de carga estática, donde la potencia es directamente proporcional al cuadrado de la magnitud del voltaje. También se puede llamar un modelo de admitancia de carga constante.
- Modelo de carga de Corriente constante, es un modelo de carga estática, donde la potencia varía directamente con la magnitud del voltaje.
- Modelo de carga de Potencia constante, es un modelo de carga estática, donde la potencia no varía con los cambios en la magnitud del voltaje. También puede ser llamado el modelo de carga constante MVA, debido a constantes dispositivos MVA, tales como motores y dispositivos electrónicos y no mantienen esta característica por debajo de un voltaje (típicamente 80% de 90%). [2]

## 2.4.2 Parámetros de $n_p$ y $n_q$

Los modelos clásicos de carga utilizados en las simulaciones de flujo de potencia se definen como funciones de carga de tensión del barraje y la frecuencia. Estos modelos estáticos se han utilizado en la producción de programas de calidad de flujo de carga por año. La importancia de los modelos de carga en estudios de dinámica ha llevado a la necesidad de modelos precisos durante los transitorios, en algunos estudios, varios minutos después de la perturbación. Por ejemplo, un colapso de voltaje por lo general es considerado como un fenómeno a largo plazo que requiere de modelos de carga que precise de largos períodos de tiempo a niveles de bajo voltaje. En este caso, los modelos estáticos de carga no describen el problema de colapso de tensión con precisión.

Para este estudio con cargas del tipo impedancia, corriente y potencia constante, los parámetros a considerar son los siguientes: [23]

Parámetros:

Residencial / Comercial

$$1.3 \leq n_p \leq 2.0$$

$$1.0 \leq n_q < 2.0$$

Industrial

$$0.2 \leq n_p \leq 0.5$$

$$0.4 \leq n_q \leq 0.9$$

Voltajes

$$0.8 < V < 1.2$$

## 2.5 PERTURBACIONES EN LAS ENTRADAS DEL SISTEMA

Para efectos prácticos de este estudio se tiene en consideración las entradas de Voltaje de referencia ( $V_{ref}$ ) y Torque mecánico ( $T_m$ ). Los valores iniciales para estas entradas deben ser calculados teniendo en cuenta el procedimiento del numeral 2.1.1, lo cual permite establecer ciertos límites de acuerdo a los porcentajes de perturbación ingresados a las señales de entrada. Para el voltaje el porcentaje es del 5% y para el torque es del 3%.

$$V_{ref} = V_{to} + \frac{E_{fd}}{K_A}$$

$$T_m = E'_q I_{qo} + (X_q - X'_d) I_{do} I_{qo}$$

De esta forma se analizara el efecto de las perturbaciones en las salidas de interés como Ángulo de par, Velocidad angular y Voltaje en terminales.

## CAPÍTULO 3

### PROCEDIMIENTO

Se procederá con un estudio del SMIB bajo condiciones normales de operación. Se comparan los resultados arrojados al incluir el SVC y se ajustara su compensador de oscilaciones (POD). Se efectuaran pruebas ante diversas perturbaciones y diferentes tipos de carga ubicadas a nivel local. Esto será analizado mediante el Software MATLAB y el ToolBox Simulink.

#### 3.1 RECOLECCIÓN DE DATOS

Inicialmente se seleccionara un modelo de trabajo tanto para el sistema SMIB como para el SVC y se realizaran las correspondientes simulaciones, tomando como base los datos encontrados en las diferentes referencias.

##### 3.1.1 Datos del sistema SMIB

- Punto de operación en pu

$$P_o + jQ_o = 0.6 + j0.2$$

$$V_{t_o} = 1.025 \text{ v}$$

Donde,

$P_o$  y  $Q_o$  son la potencia activa y reactiva.

$V_{t_o}$  es el voltaje en los terminales del barraje al que está conectado el generador síncrono.

- Máquina síncrona

$$X_d = 1.93$$

$$X_q = 1.77$$

$$X'_q = 0.5$$

$$X'_d = 0.23$$

$$H = 3.74$$

$$D = 1$$

$$\omega = 377 \text{ rad/s}$$

$$T_{do} = 5.2 \text{ s}$$

Donde,

$X_d$  es la reactancia síncrona de eje directo.

$X_q$  es la reactancia síncrona de eje en cuadratura.

$X'_q$  es la reactancia transitoria de eje directo.

$X'_d$  es la reactancia transitoria de eje en cuadratura.

H es una constante de inercia.

$\omega$  es la velocidad angular del rotor.

$T_{do}$  es la constante de tiempo de circuito abierto de eje directo.

- Excitación tipo I según la IEEE

$$K_A = 400$$

$$T_A = 0.05 \text{ s}$$

Donde,

$K_A$  es la ganancia del amplificador.

$T_A$  es constante de tiempo asociada con el regulador y el disparo de los tiristores.

- Línea de transmisión en pu

$$R_e = 0.0$$

$$X_e = 0.81$$

Donde,

$R_e$  y  $X_e$  son la resistencia y la reactancia de la línea.

### 3.1.2 Datos para el SVC

$$G_i = 0.5$$

$$K_\alpha = 10$$

$$T_\alpha = 0.15$$

$$B_o = 0.6$$

$$B_C = 1.326$$

$$T_W = 10 \text{ s}$$

Donde,

$T_\alpha$  y  $K_\alpha$  son la constante de tiempo de disparo y la constante de ganancia respectivamente.

$T_W$  es el tiempo de barrido constante.

## 3.2 CONSTANTES DEL MODELO LINEALIZADO PARA EL PUNTO DE OPERACIÓN SELECCIONADO

Estas constantes son necesarias al momento de implementar el modelo de Heffron-Phillips y al incluir el SVC como dispositivo de control para realizar las respectivas simulaciones de los diagramas de bloques en el punto de operación seleccionado.

### 3.2.1 Constantes del modelo linealizado sin SVC

Cálculos previos

$$S = 0.6 + j0.2$$

$$\theta = 0.3218$$

$$V_{t_1} = 0.9724 + j0.3241$$

$$V_{\text{inf } 1} = 1$$

$$I_g = 0.4002 + j0.0341$$

$$E = 0.9121 + j1.0324$$

$$\delta = 0.8472$$

$$I_{go} = 0.2773 + j0.2905$$

$$I_{do} = 0.2773$$

$$I_{qo} = 0.2905$$

$$V = 0.5141 + j0.8867$$

$$V_{do} = 0.5141$$

$$V_{qo} = 0.8867$$

$$E'_q = 0.9505$$

$$E_{fd} = 1.4220$$

$$K_1 = 0.6759$$

$$K_2 = 0.7206$$

$$K_3 = 0.3796$$

$$K_4 = 1.2250$$

$$K_5 = 0.0845$$

$$K_6 = 0.6738$$

### 3.2.2 Constantes del modelo linealizado con SVC

$$K_d = -0.2288$$

$$K_c = 102.2961$$

$$H_Q = -0.0022$$

$$H_D = 0.9903$$

$$K_8 = -0.0047$$

$$K_9 = -0.4692$$

$$K_{10} = -0.1139$$

$$K_{11} = -3.1322$$

$$K_{12} = 0.5938$$

$$K_{13} = -2.2571$$

$$C = 0.0077$$

$$W = -2.1104$$

### 3.3 MODELO DE ESPACIO DE ESTADOS SIN SVC

Se obtiene el modelo de espacio de estados de acuerdo al procedimiento mencionado en el numeral 2.2.1, reemplazando los datos del sistema SMIB para el punto de operación seleccionado.

$$\begin{pmatrix} \dot{\Delta E}'_q \\ \dot{\Delta \delta} \\ \dot{\Delta \omega} \\ \dot{\Delta E}'_{fd} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.5 & -0.2 & 0 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0 & 377.0 & 0 & 0 \\ -0.1 & -0.1 & -50.4 & 0 & 0 \\ -5390.2 & -675.7 & 0 & -20.0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta E'_q \\ \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E'_{fd} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 133.7 \\ 0 \end{pmatrix} \Delta T_m$$

$$Y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta E'_q \\ \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E'_{fd} \end{pmatrix}$$

Para analizar la estabilidad de este sistema se emplea la matriz A de dimensiones de 4 x 4 para obtener el polinomio característico y sus raíces.

Polinomio Característico de  $A = s^4 + 70s^3 + 2043s^2 + 52390s + 30076$

Una vez obtenido el polinomio, se procede a calcular sus raíces mediante Matlab

```
roots (poly(A))
```

$$\lambda_1 = -49.7518$$

$$\lambda_2 = -9.7777 + j 30.5578$$

$$\lambda_3 = -9.7777 - j 30.5578$$

$$\lambda_4 = -0.5873$$

Se observa que las raíces están ubicadas en el semiplano real izquierdo, lo cual indica que el sistema es estable.

### 3.4 MODELO DE ESPACIO DE ESTADOS DEL SISTEMA CON SVC

Se obtiene el modelo de espacio de estados de acuerdo al procedimiento mencionado en el numeral 2.2.1, reemplazando los datos del sistema SMIB y el SVC para el punto de operación seleccionado.

$$\begin{pmatrix} \dot{\Delta E}'_q \\ \dot{\Delta \delta} \\ \dot{\Delta \omega} \\ \dot{\Delta E}_{fd} \\ \dot{\Delta B}_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.5 & -0.2 & 0 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0 & 377.0 & 0 & 0 \\ -0.1 & -0.1 & -50.4 & 0 & 0 \\ -5390.2 & -675.7 & 0 & -20.0 & 0 \\ -44.9 & -5.0 & 0 & 0 & -148.7 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta E'_q \\ \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta B_L \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 133.7 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \Delta T_m$$

$$Y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta E'_q \\ \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta B_L \end{pmatrix}$$

Para analizar la estabilidad de este sistema se emplea la matriz A de dimensiones de 5 x 5 para obtener el polinomio característico y sus raíces.

Polinomio Característico de  $A = 200s^4 + 12400s^3 + 356300s^2 + 7822400s + 44734$

Una vez obtenido el polinomio, se calcula nuevamente sus raíces mediante Matlab.

```
roots(poly(A))
```

$$\lambda_1 = -148.74$$

$$\lambda_2 = -49.75$$

$$\lambda_3 = -9.78 + j30.56$$

$$\lambda_4 = -9.78 - j30.56$$

$$\lambda_5 = -0.59$$

Nuevamente se aprecia que las raíces están ubicadas en el semiplano real izquierdo, lo cual indica que el sistema no tiene problemas de estabilidad al incluir el SVC.

## 3.5 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL CONTROLADOR PI

Con base en el procedimiento descrito en el numeral 2.3 se calculan los valores de las constantes  $K_p$  y  $K_i$  del controlador del SVC. Para ello se utilizan la matriz B y C del numeral 3.4.

### 3.5.1 Parámetros $K_p$ y $K_i$

De acuerdo al procedimiento descrito en el numeral 2.3 se hallan los coeficientes  $K_p$  y  $K_i$ , teniendo en cuenta que se escogen dos de los valores propios del sistema calculados anteriormente en el numeral 3.4  $\lambda_2 = -49.75$  y  $\lambda_5 = -0.59$ . Estos valores se seleccionaron bajo el criterio del método estudiado.

El sistema de ecuaciones resultante para el cálculo de las constantes  $K_p$  y  $K_i$  es el siguiente

$$\frac{1}{C(\lambda_1 I - A)^{-1} B_2} = \frac{\lambda_1 T_w}{(1 + \lambda_1 T_w)} \left( K_p + \frac{K_i}{\lambda_1} \right)$$

$$\frac{1}{C(\lambda_2 I - A)^{-1} B_2} = \frac{\lambda_2 T_w}{(1 + \lambda_2 T_w)} \left( K_p + \frac{K_i}{\lambda_2} \right)$$

Después de solucionar el sistema encontramos los respectivos valores de  $K_p$  y  $K_i$

$$K_p = 16.3363$$

$$K_i = 0.3391$$

Estos son los valores que finalmente se implementan en el diseño del controlador PI del SVC.

## 3.6 MODELAMIENTO DE LAS CARGAS

Con base en el numeral 2.4.2 se trabajó con los diferentes modelos de carga de la siguiente forma:



### 3.7.1 Valores iniciales en las entradas

De acuerdo al punto de operación seleccionado se realizan los cálculos para determinar los valores iniciales tanto del Voltaje de referencia como del Torque mecánico necesarios para la simulación. Teniendo en cuenta los datos del numeral 3.2.1 y haciendo uso de las ecuaciones del numeral 2.5.

$$V_{ref} = 1.0286$$

$$T_m = 0.4002$$

### 3.7.2 Configuración del simulador

Para este estudio en específico se modificaron algunos parámetros del simulador que tiene por defecto, pues esos se ajustaban mejor a los requerimientos deseados.

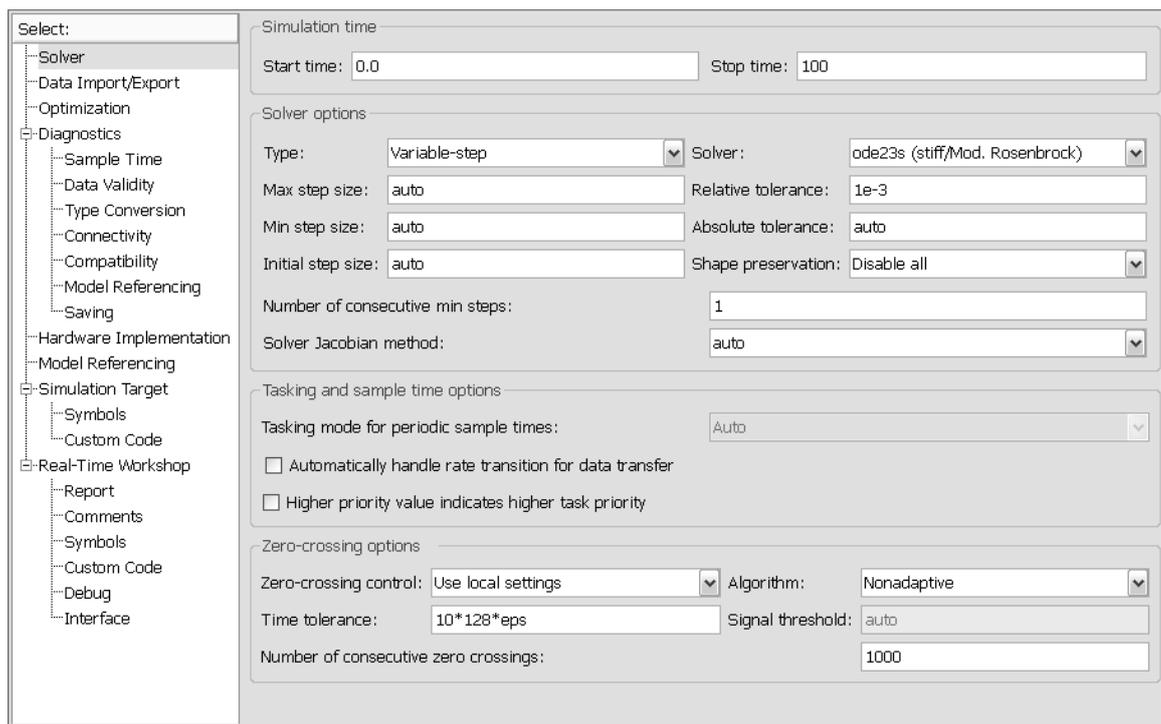


Figura 13. Ajuste de parámetros de parada y método de solución

Select:

- Solver
- Data Import/Export
- Optimization
- Diagnostics
  - Sample Time
  - Data Validity
  - Type Conversion
  - Connectivity
  - Compatibility
  - Model Referencing
  - Saving
- Hardware Implementation
- Model Referencing
- Simulation Target
  - Symbols
  - Custom Code
- Real-Time Workshop
  - Report
  - Comments
  - Symbols
  - Custom Code
  - Debug
  - Interface

Load from workspace

Input: [t, u]

Initial state: xInitial

Save to workspace

Time: t

States: xout

Output: vt

Final states: xFinal  Save complete SimState in final state

Signal logging: logout  Inspect signal logs when simulation is paused/stopped

Data stores: dsmout

Save options

Limit data points to last: 100000 Decimation: 1

Format: Array

Output options: Refine output Refine factor: 1

Return as single object: out

Figura 14. Ajuste de entradas y salidas

## **CAPÍTULO 4**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

En este capítulo se mencionan los resultados obtenidos mediante las correspondientes simulaciones que permiten ver el comportamiento del sistema ante diferentes perturbaciones y la inclusión de diferentes tipos de carga. De esta forma se observa como las salidas de Voltaje en terminales ( $V_t$ ), Ángulo del par ( $\delta$ ) y Velocidad angular ( $\omega$ ) son afectadas por las variaciones en las señales de entrada que para este caso son el Torque mecánico ( $T_m$ ) y el Voltaje de referencia ( $V_{ref}$ ).

Debido a que se ha linealizado las ecuaciones del sistema alrededor de un punto de operación específico (ver numeral 3.1.1), se puede observar que la amplitud inicial de las señales no es considerada y se muestran solo las variaciones respecto a dichos valores.

#### **4.1 PERTURBACIÓN EN EL TORQUE MECÁNICO ( $T_m$ )**

Luego de calcular los valores iniciales en numeral 3.7.1 de acuerdo con el punto de operación seleccionado, se introducen distintas perturbaciones en el torque de entrada para observar la respuesta en las diferentes salidas del sistema cuando utilizamos el dispositivo de control SVC.

Para observar las respuestas del sistema ante una perturbación en el torque se utiliza la función escalón unitario de la librería del Toolbox SIMULINK, con una amplitud inicial de 0.4 pu, amplitud final de 0.43 pu y un paso de tiempo de 60 segundos. Figura 15.

Otro caso que se observa es un tren de pulsos que permitirá variar el torque de entrada de forma escalonada con las siguientes características. Ver figura 16 y figura 17.

Step

Output a step.

Parameters

Step time:  
60

Initial value:  
.4

Final value:  
.43

Sample time:  
0

Interpret vector parameters as 1-D

Enable zero-crossing detection

Figura 15. Parámetros del escalón Tm

Repeating Sequence Stair (mask) (link)

Discrete time sequence is output, then repeated.

Main Signal Attributes

Vector of output values:  
[0 0 0 0 0 0.4 0.43 0.46 0.49 0.46 0.4 0.37].'

Sample time:  
10

Figura 16. Características del tren de pulsos en Tm

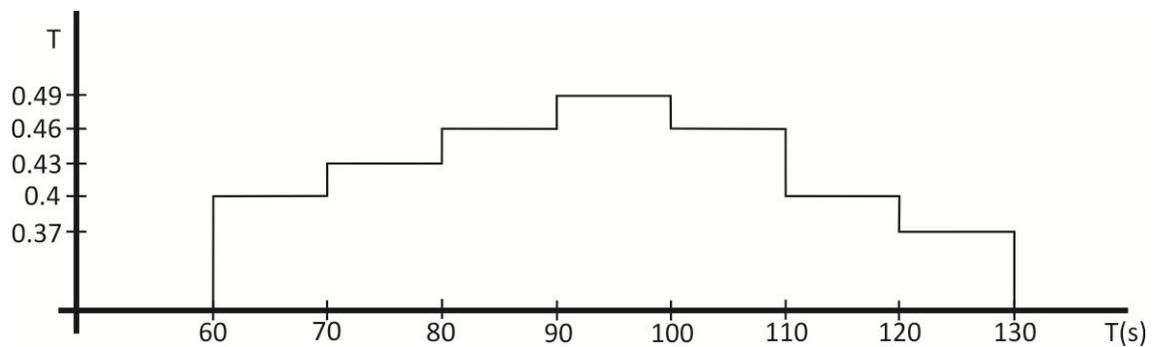


Figura 17. Tren de pulsos para Tm

### 4.1.1 Respuesta en el voltaje en terminales con variación en $T_m$

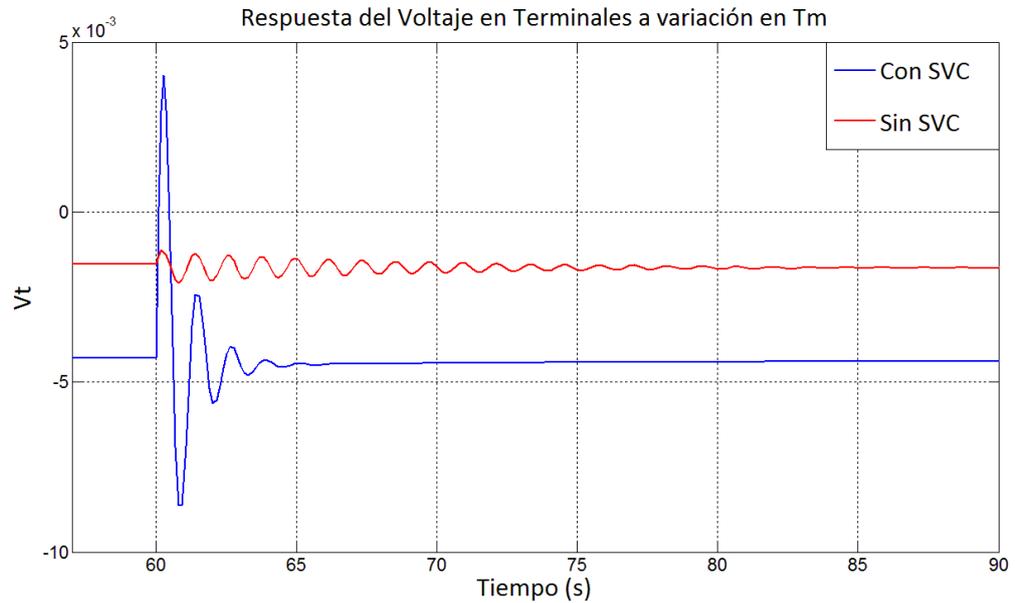


Figura 18. Respuesta en el voltaje en terminales con variación en  $T_m$

Al observar la respuesta del sistema sin dispositivos de control (línea roja), se tiene que esta es bastante oscilatoria y se estabiliza después de aproximadamente 30 segundos después de ingresar el escalón a la entrada. Por otra parte la respuesta del sistema utilizando el SVC (línea azul) se estabiliza mucho más rápido (cerca de los 10 segundos después de ingresar el escalón), lo que se traduce en un tiempo de establecimiento 33% menor y tiene un periodo de oscilación más corto aun que presenta cambios bruscos (picos) en el voltaje en terminales respecto a la otra señal, puesto que si se nota, la escala es del el orden de los  $5 \times 10^{-3}$  pu.

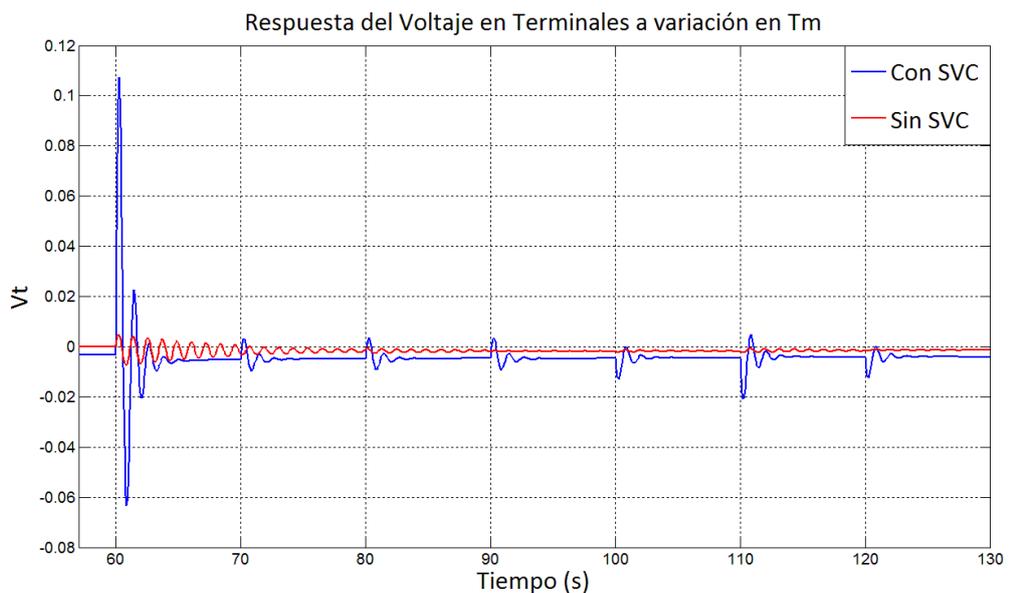


Figura 19. Respuesta del voltaje en terminales al introducir un tren de pulso en  $T_m$

Para este caso se cambia la función escalón por un tren de pulsos que representa una variación en el torque mecánico de entrada. Esta nueva función se introduce pasados 60s de operación del sistema con la intención de que el arranque no afecte la respuesta. Se aprecia que cada vez que se presenta un cambio en la amplitud del pulso, este genera una reacción en la amplitud de la señal de salida que se irá atenuando en aproximadamente 5 segundos o menos para el caso donde se utiliza el SVC. Se aprecia que en la respuesta con SVC, al momento de introducir el tren de pulsos al sistema se presenta un gran pico en el eje del voltaje en terminales en comparación con la señal sin SVC, la cual presenta un pico mucho más pequeño pero es muy oscilatoria y su tiempo de establecimiento no se puede apreciar con facilidad.

#### 4.1.2 Respuesta en la velocidad angular $\omega$ con variación en $T_m$

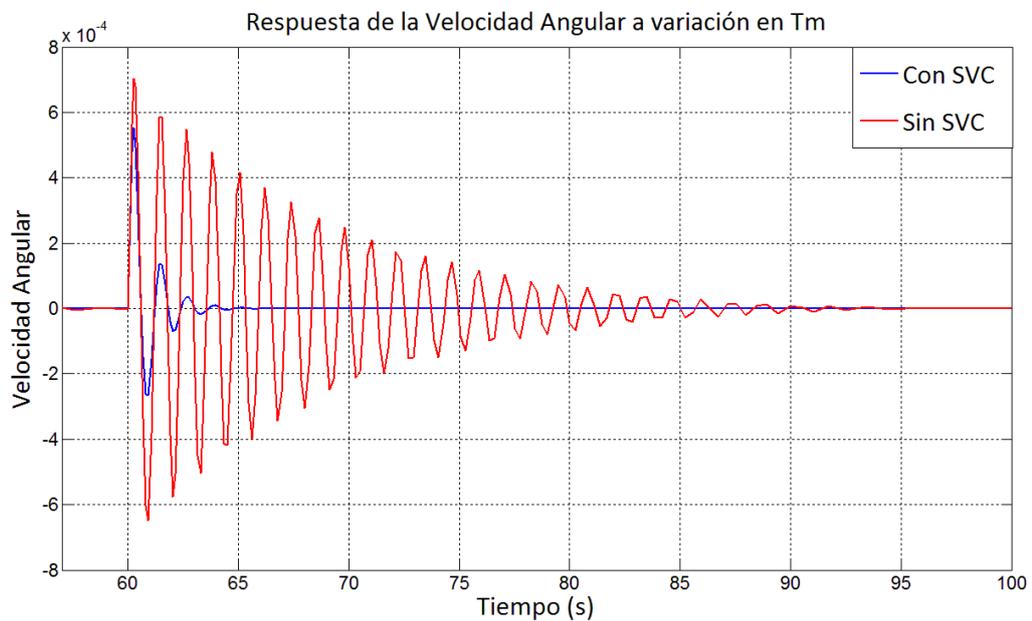


Figura 20. Respuesta en la Velocidad angular con variación en  $T_m$

Se aprecia que la respuesta del sistema sin dispositivo de control como en el caso anterior es muy oscilatoria y su tiempo de establecimiento es de aproximadamente 35 segundos. En caso contrario, la respuesta del sistema al usar el SVC mejora tanto en el tiempo de establecimiento (aproximadamente 7 segundos) como en los sobresaltos de amplitud en el eje de la velocidad. El tiempo de establecimiento es 20% menor cuando se tiene el SVC acoplado al sistema.

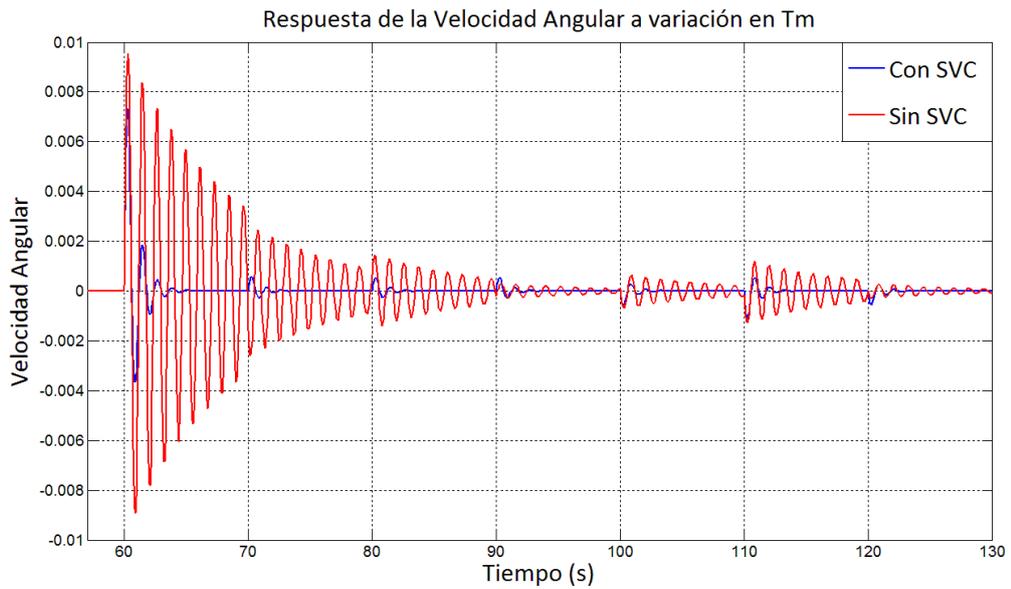


Figura 21. Respuesta de la velocidad angular al introducir un tren de pulso en  $T_m$

Se introduce el tren de pulsos pasados los 60s y se observa que la señal sin compensador adopta un comportamiento muy oscilatorio y con grandes variaciones en la amplitud, que pasados los 30s se empieza a atenuar pero sin llegar a estabilizarse por completo. Por otra parte, la respuesta con el compensador presenta un sobresalto de gran proporción solo al inicio del tren de pulsos y se estabiliza rápidamente (aproximadamente 5s) hasta que se introducen los pasos en el tren de pulsos donde se presentan picos muy pequeños.

#### 4.1.3 Respuesta en el ángulo de par $\delta$ con variación en $T_m$

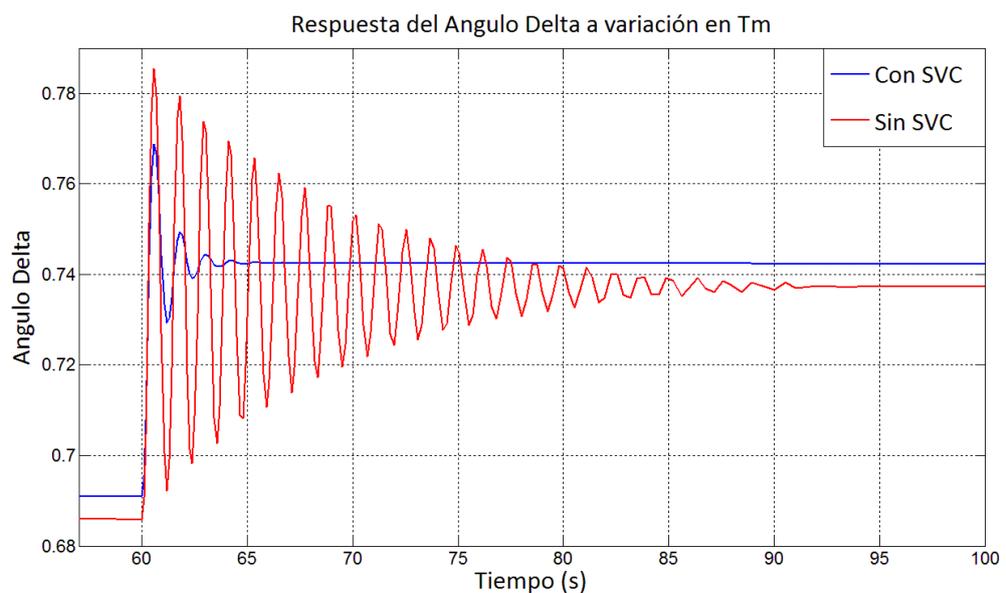


Figura 22. Respuesta del ángulo de par con variación en  $T_m$

Para este caso, se puede apreciar que la señal resultante al incluir el SVC se estabiliza en 10s aproximadamente después de incluir el escalón, su variación en amplitud en el eje del ángulo de par se atenúa y además presenta un “outset” de 0.01 pu que la hace ver por encima de la señal sin compensador, que a su vez se estabiliza aproximadamente en 35s, tomándole 29% más de tiempo que cuando se usa el SVC y la amplitud de la señal presenta variaciones muy grandes a lo largo de su periodo de establecimiento.

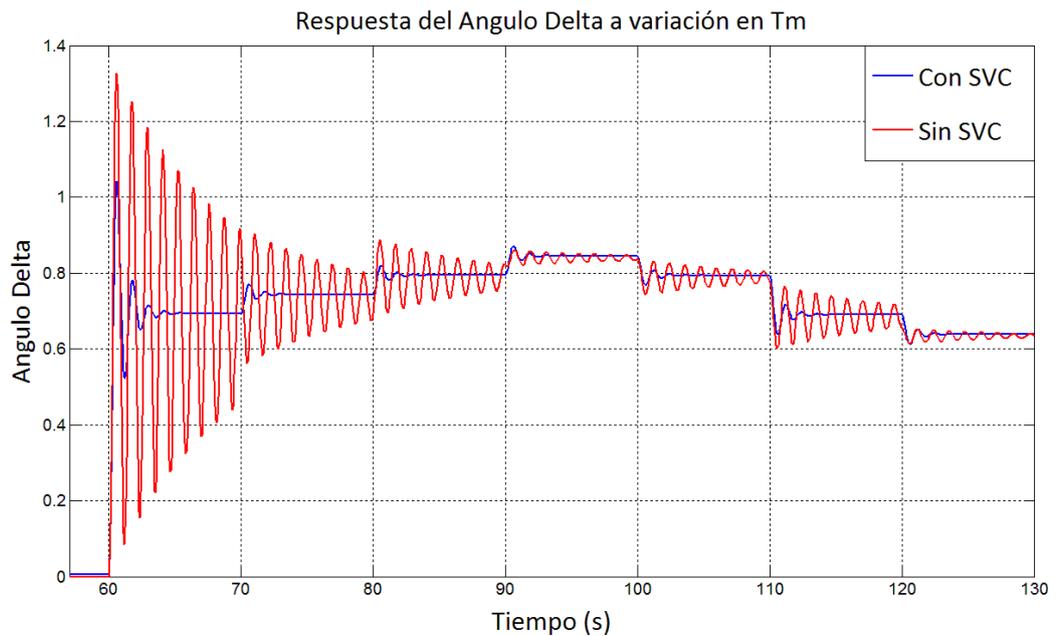


Figura 23. Respuesta del ángulo de par al introducir un tren de pulso en Tm

Se puede observar que las señales siguen un comportamiento escalonado, de acuerdo con las variaciones que se realizan en la entrada e igual que en la figura anterior, se nota que la señal sin SVC es muy inestable y que la señal con SVC se atenúa de forma rápida a medida que se introducen las perturbaciones.

## 4.2 PERTURBACIÓN EN EL VOLTAJE DE REFERENCIA (Vref)

Luego de calcular los valores iniciales en numeral 3.7.1 de acuerdo con el punto de operación seleccionado, se introducen distintas perturbaciones en el voltaje de entrada para observar la respuesta en las diferentes salidas del sistema cuando se utiliza el dispositivo de control SVC.

Para observar las respuestas del sistema ante una perturbación en el voltaje de referenciase hace uso la función escalón unitario de la librería del Toolbox SIMULINK, con una amplitud inicial de 1pu, amplitud final de 1.05pu y un paso de tiempo de 60 segundos.

Por otro lado se usara un tren de pulsos que permitirá variar el voltaje de referencia de forma escalonada con las siguientes características. Ver figura 25 y figura 26.

The image shows the parameter configuration for a 'Step' block. It is divided into two sections: 'Step' and 'Parameters'. The 'Step' section contains the text 'Output a step.'. The 'Parameters' section includes several input fields and two checked checkboxes. The 'Step time' field is set to 60. The 'Initial value' field is set to 1. The 'Final value' field is set to 1.05. The 'Sample time' field is set to 0. The two checkboxes are 'Interpret vector parameters as 1-D' and 'Enable zero-crossing detection', both of which are checked.

Figura 24. Parámetros del escalón Vref

The image shows the 'Signal Attributes' tab of a 'Repeating Sequence Stair' block. The block title is 'Repeating Sequence Stair (mask) (link)'. Below the title, it says 'Discrete time sequence is output, then repeated.'. There are two tabs: 'Main' and 'Signal Attributes', with 'Signal Attributes' being the active tab. The 'Vector of output values:' field contains the text '[0 0 0 0 0 0 1 1.05 1.1 1.15 1.2 1.15 1.05 1 0.95].'. The 'Sample time:' field is set to 10.

Figura 25. Características del tren de pulsos en Vref

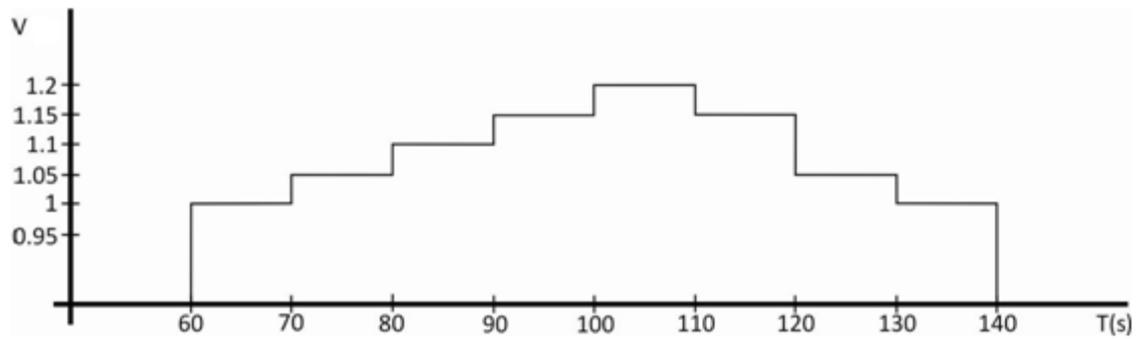


Figura 26. Tren de pulsos para Vref

#### 4.2.1 Respuesta en el voltaje en terminales con variación en Vref

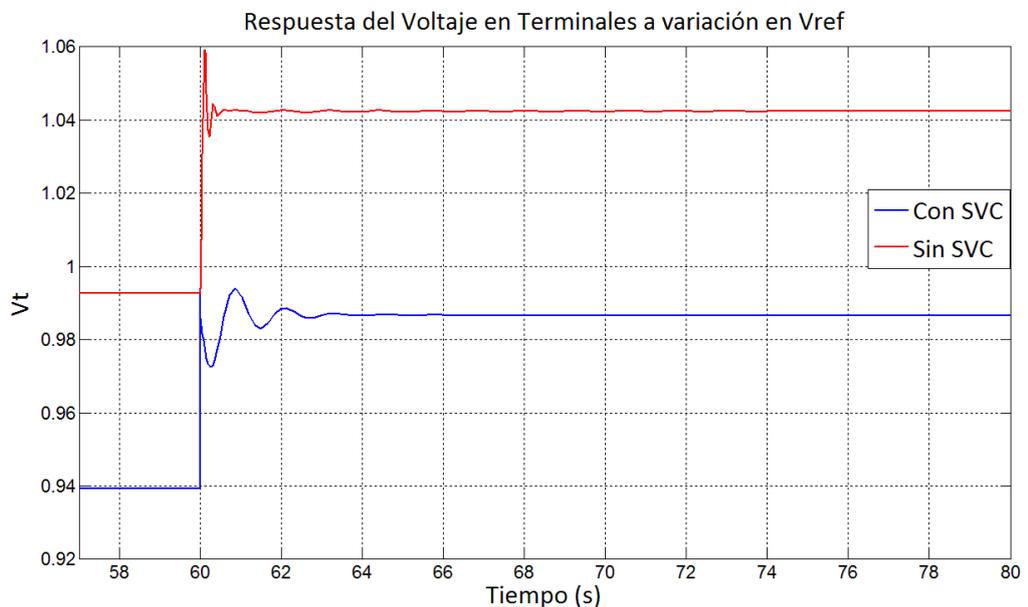


Figura 27. Respuesta en el voltaje en terminales con variación en Vref

Se aprecia que el sistema sin ninguna acción de control tiene un tiempo de establecimiento de 20s mientras que la respuesta al usar el SVC se estabiliza a los 5s de introducir el escalón en el voltaje de referencia, es decir, al utilizar el dispositivo de control la señal se estabiliza en un tiempo 25% menor. Ambas respuestas presentan un pico similar en la magnitud del voltaje en terminales con la diferencia que la respuesta con SVC tiene un segundo pico antes de empezar a estabilizarse. También se nota un “outset” que separa las dos señales en aproximadamente  $6 \times 10^{-3}$  pu.

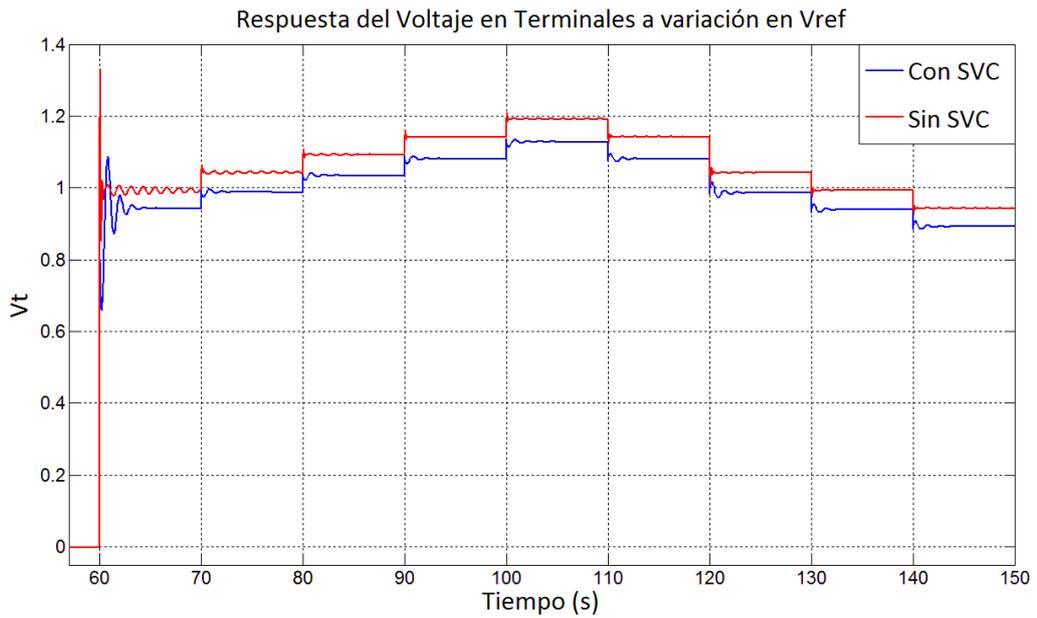


Figura 28. Respuesta del voltaje en terminales al introducir un tren de pulsos en Vref

Transcurridos 60s desde el arranque de la máquina se introduce el tren de pulsos en el voltaje de referencia y se observa que la magnitud del voltaje en terminales cuando es utilizado el SVC nuevamente se estabiliza más rápido en los primeros 30s desde que el tren de pulsos es considerado. Para los siguientes 30s, teniendo en cuenta que las variaciones en el tren de pulsos son más pequeñas, se observa que la respuesta sin SVC tiende a estabilizarse aún más rápido, lo cual solo cambia si se presenta un cambio brusco en el tren de pulsos.

#### 4.2.2 Respuesta en la velocidad angular $\omega$ con variación en Vref

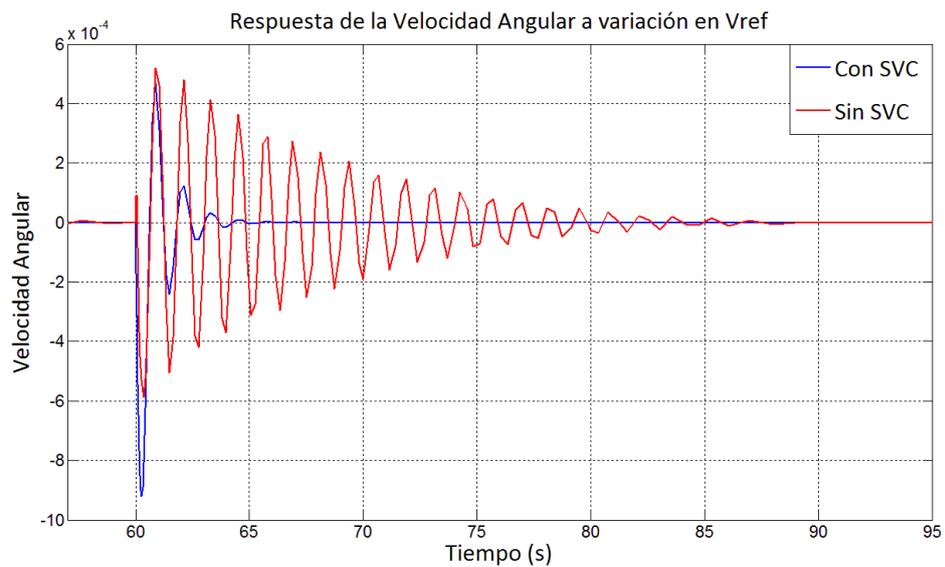


Figura 29. Respuesta en la Velocidad angular con variación en Vref

Para este caso se tiene que la respuesta de la velocidad angular sin SVC presenta un tiempo de establecimiento de aproximadamente 33s, además presenta oscilaciones muy grandes en comparación con la respuesta al usar el SVC, ya que esta solo presenta dos sobrepasos considerables al inicio del pulso y se estabiliza en aproximadamente en 10s, lo que representa una diferencia del 33% en cuanto al tiempo de establecimiento de la señal.

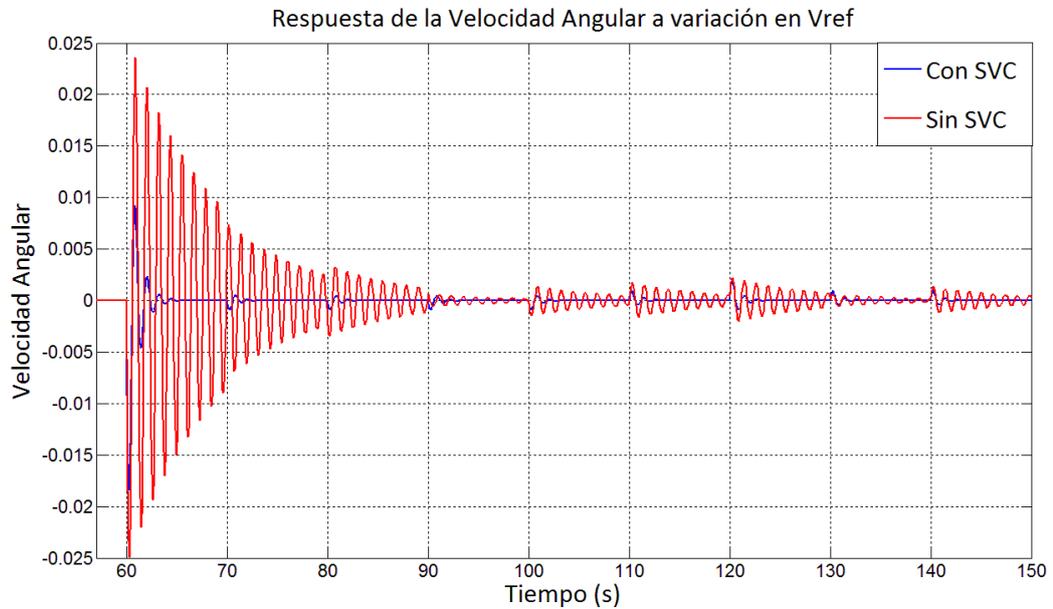


Figura 30. Respuesta de la velocidad angular al introducir un tren de pulsos en Vref

Se observa que al introducir el tren de pulsos, el sistema sin compensador es inestable y presenta oscilaciones muy grandes en la magnitud de la velocidad angular por alrededor de 30s, luego se sigue tornando oscilatoria pero con variaciones más pequeñas en la amplitud. Por otra parte la señal con SVC presenta un gran pico en la entrada del tren de pulsos pero se estabiliza rápidamente (aproximadamente 5s) y se nota una respuesta muy favorable a las pequeñas variaciones en el tren de pulsos.

### 4.2.3 Respuesta en el ángulo de par $\delta$ con variación en $V_{ref}$

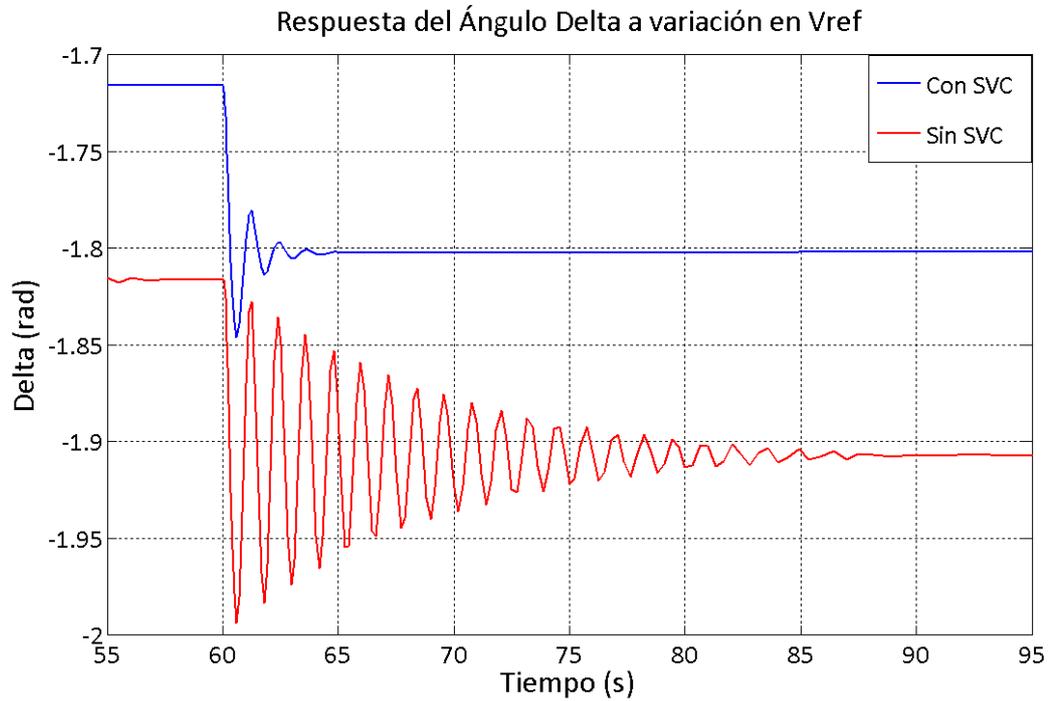


Figura 31. Respuesta en el ángulo de par con variación en  $V_{ref}$

De entrada se aprecia un “outset” de 1.1 pu entre las dos señales, producto del acople del SVC al sistema, lo cual coloca por encima a la respuesta con SVC que presenta sobrepasos mucho más pequeños en cuanto a la magnitud del ángulo y un tiempo de establecimiento de aproximadamente 7s que comparado con el tiempo que emplea la otra respuesta para estabilizarse (aproximadamente 30s) es 23% menor.

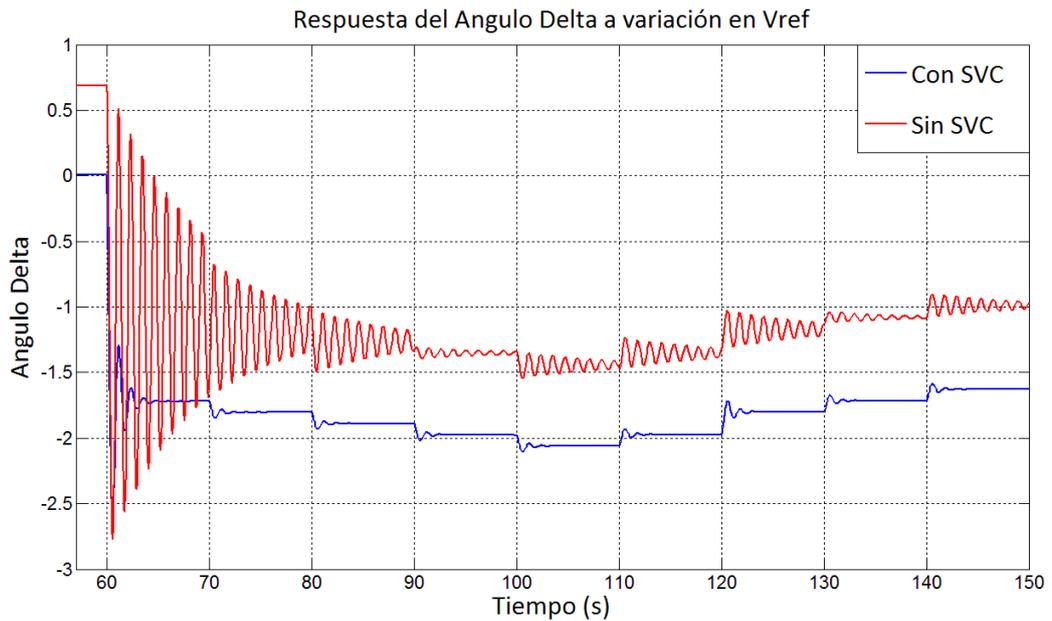


Figura 32. Respuesta del ángulo de par al introducir un tren de pulso en Vref

Se aprecia que la señal sin utilizar compensador se torna muy oscilatoria en los primeros 30s después de introducir el tren de pulsos y luego empieza a suavizarse un poco pero no llega a estabilizarse por completo en los rangos de tiempo manejados. Por otra parte, la respuesta cuando se implementa el compensador presenta sobrepasos de amplitud más pequeños en general y se estabiliza más rápido (aproximadamente 5s después de que varía el tren de pulsos).

### 4.3 RESPUESTA EN LAS SALIDAS CON MODELO DE CARGA CORRIENTE CONSTANTE

Si bien se ha estudiado el comportamiento del sistema con diversas perturbaciones en las entradas, ahora se busca introducir en el sistema cargas que puedan ser modeladas como corriente constante y apreciar las diferencias y similitudes respecto a los resultados obtenidos anteriormente.

### 4.3.1 Respuesta en el voltaje en terminales Vt con I constante

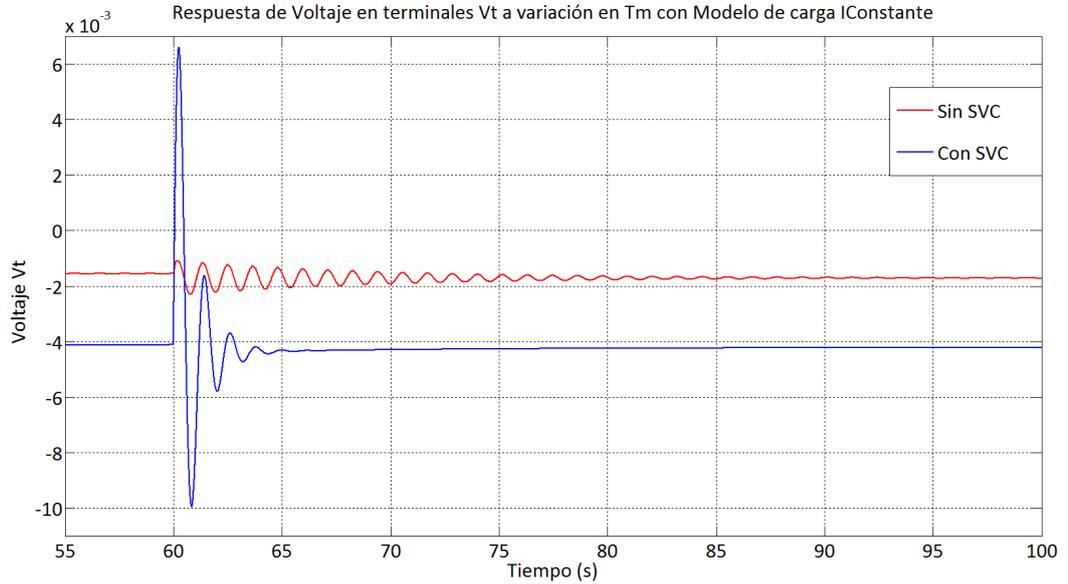


Figura 33. Respuesta en el voltaje en terminales a variación en  $T_m$  con modelo de carga corriente constante

Al comparar con el numeral 4.1.1 figura 18, se observa que al utilizar el modelo de carga se puede notar diferencias tanto en el tiempo de establecimiento como en la amplitud de la señal de voltaje, teniendo que la respuesta sin SVC se estabiliza 10s después y que al usar el SVC el tiempo de establecimiento permanece constante pero la amplitud del voltaje en terminales aumenta cerca de un 38%.

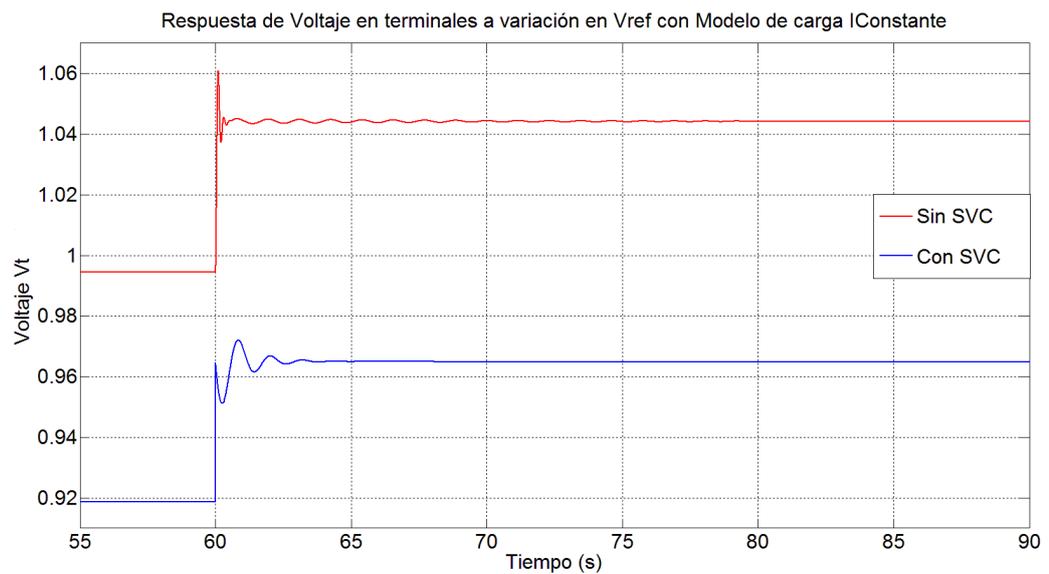


Figura 34. Respuesta en el voltaje en terminales a variación en  $V_{ref}$  con modelo de carga corriente constante

Por otro lado, al comparar con la figura 19, se observan diferencias mínimas en el tiempo de establecimiento y en la amplitud de las dos señales, pero cabe destacar la presencia de un “outset” de  $-2 \times 10^{-3}$  pu en la señal con SVC al emplear el modelo de carga.

### 4.3.2 Respuesta en el ángulo de par $\delta$ con I constante

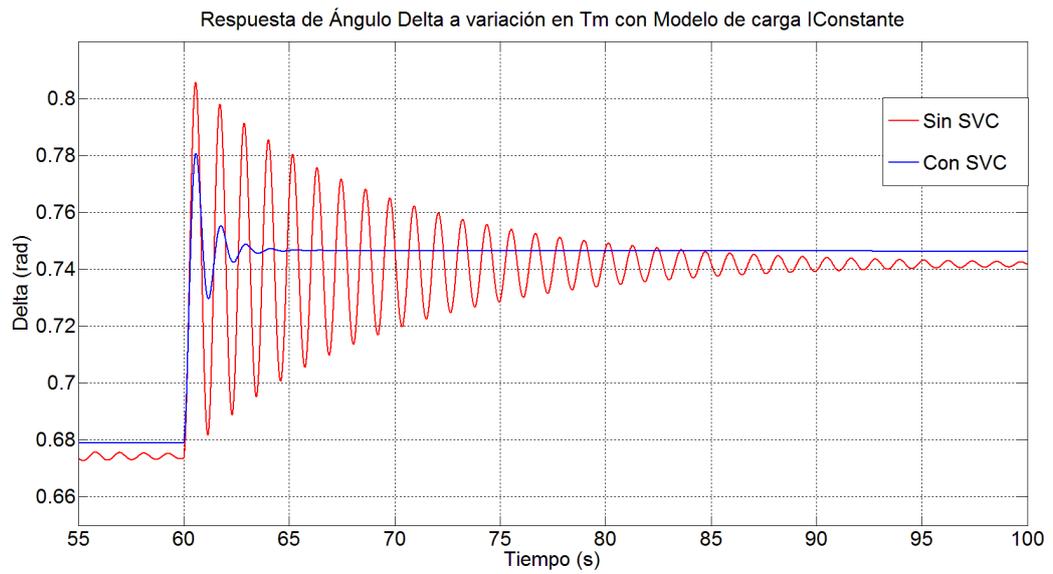


Figura 35. Respuesta en el Ángulo de par a variación en  $T_m$  con modelo de carga corriente constante

Se observa que respecto a la figura 20 del numeral 4.1.2 se presenta un “outset” de  $-1 \times 10^{-3}$  pu en las dos señales con modelo de carga y la amplitud de la respuesta del ángulo con y sin compensador muestra un aumento cerca del 3%. En cuanto al tiempo de establecimiento se puede apreciar que la señal con SVC permanece constante y para la señal sin este dispositivo se torna oscilatoria y no se alcanza a estabilizar con modelo de carga.

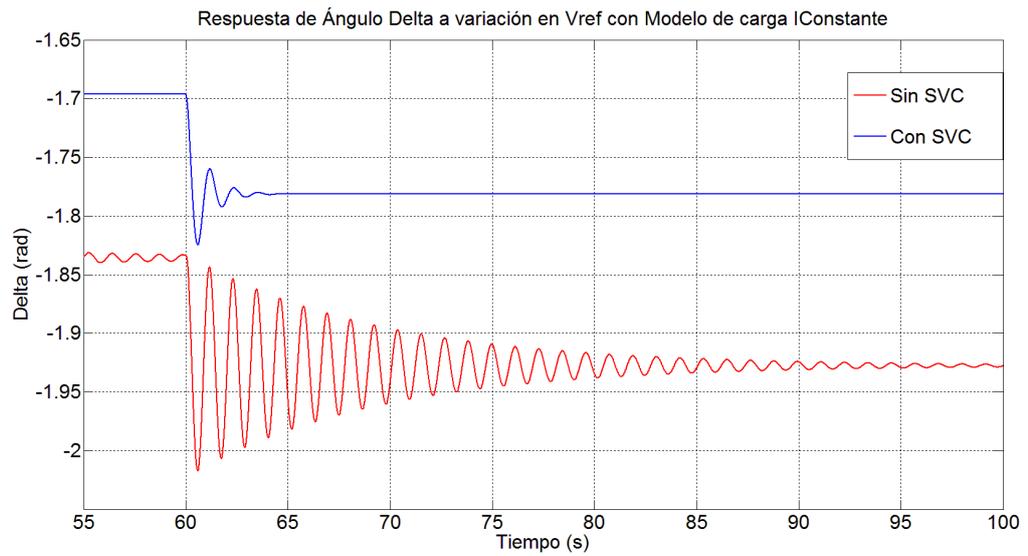


Figura 36. Respuesta en el ángulo de par a variación en Vref con modelo de carga corriente constante

La señal sin SVC al emplear el modelo de carga es evidentemente más oscilatoria y no se puede definir claramente un tiempo de establecimiento en comparación con la figura 21, también presenta un “outset” de -0.2 en pu y la amplitud se mantiene prácticamente constante. Ahora, la señal con SVC al implementar un modelo de carga también presenta un “outset” de 0.2 en pu, el tiempo de establecimiento no se ve afectado y la amplitud permanece constante.

### 4.3.3 Respuesta en la velocidad angular $\omega$ con I constante

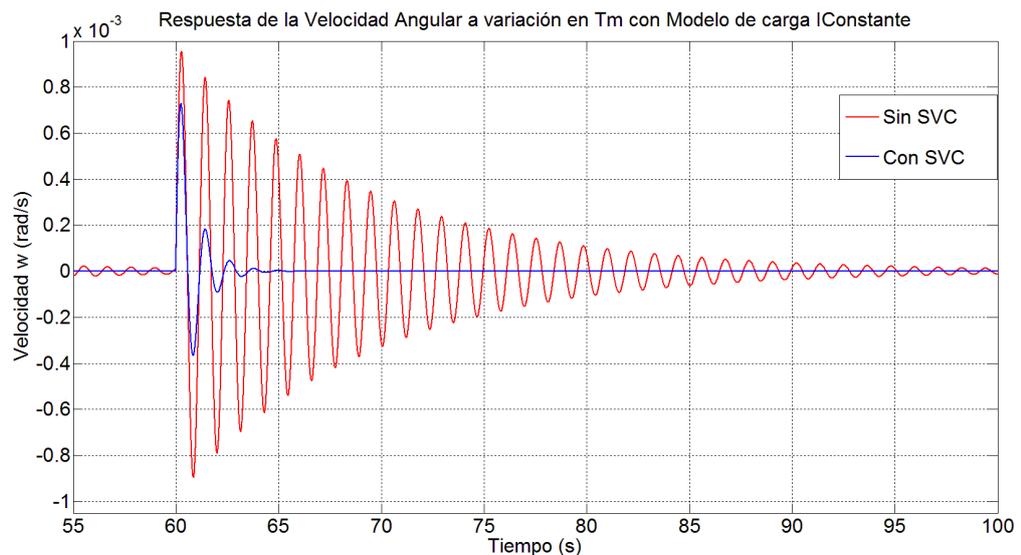


Figura 37. Respuesta en la velocidad angular a variación en Tm con modelo de carga corriente constante

Se muestra un comportamiento bastante oscilatorio por parte de la onda sin SVC al igual que en la figura 22 pero para este caso, la señal no alcanza a estabilizarse por completo en el tiempo previsto. La señal cuando es usado el SVC permanece con pocas variaciones y se puede notar un leve cambio en la amplitud, cerca del 29% en ambas respuestas cuando es implementado el modelo de carga.

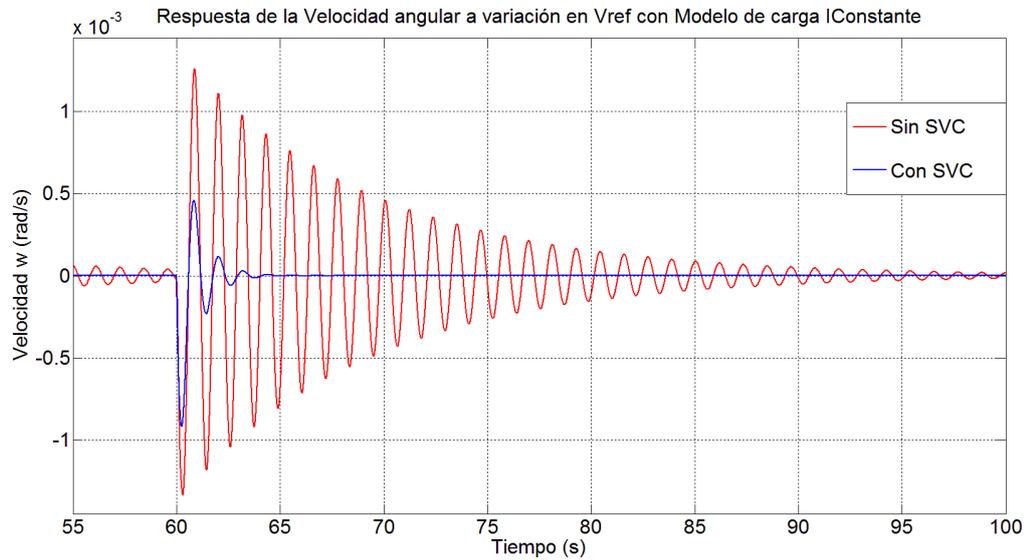


Figura 38. Respuesta en la velocidad angular a variación en Vref con modelo de carga corriente constante

Se puede visualizar un comportamiento muy similar al de la figura 23 en cuanto a la amplitud, grado de oscilación y solo se percibe un cambio en el tiempo de establecimiento de la señal sin SVC al implementar el modelo de carga, pues esta no alcanza a estabilizarse en el tiempo de trabajo utilizado.

#### 4.4 RESPUESTA EN LAS SALIDAS CON MODELO DE CARGA IMPEDANCIA CONSTANTE

Otro de los modelos a utilizar será el de impedancia constante, con el cual se observa el comportamiento del sistema ante las diferentes perturbaciones en el voltaje de referencia t el torque mecánico. De este modo se realizara el respectivo análisis para determinar el efecto de este tipo de carga cuando se conecta al sistema.

#### 4.4.1 Respuesta en el voltaje en terminales Vt con Z constante

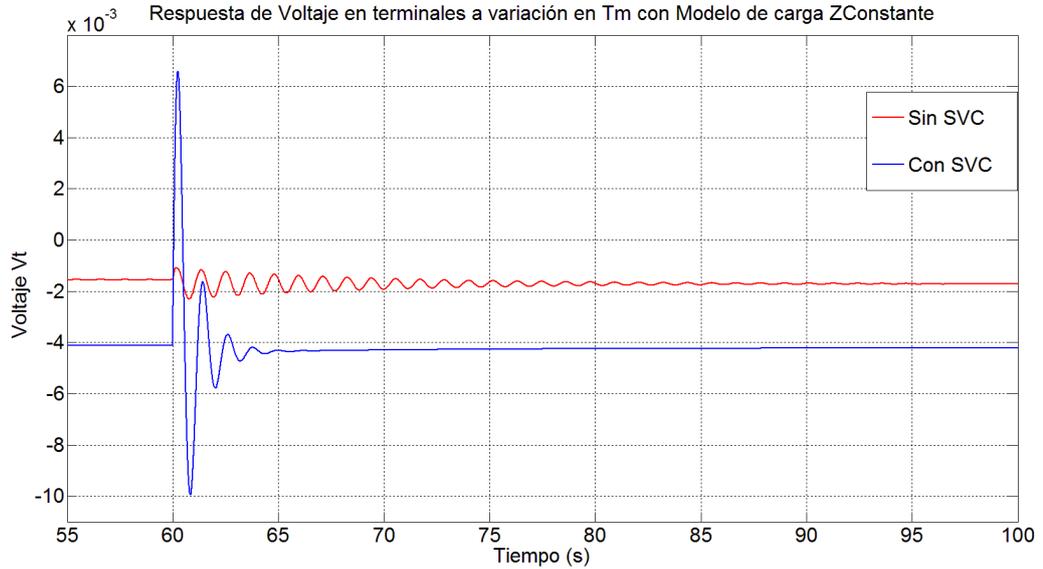


Figura 39. Respuesta en el voltaje en terminales a variación en  $T_m$  con modelo de carga impedancia constante

Al momento de introducir el escalón se aprecia en comparación con la figura 18 que la magnitud y el modo de oscilación permanecen prácticamente constantes y la única variación apreciable está en el tiempo de establecimiento de la señal sin SVC ya que cuando se implementa el modelo de carga, esta se amortigua 5 segundos después.

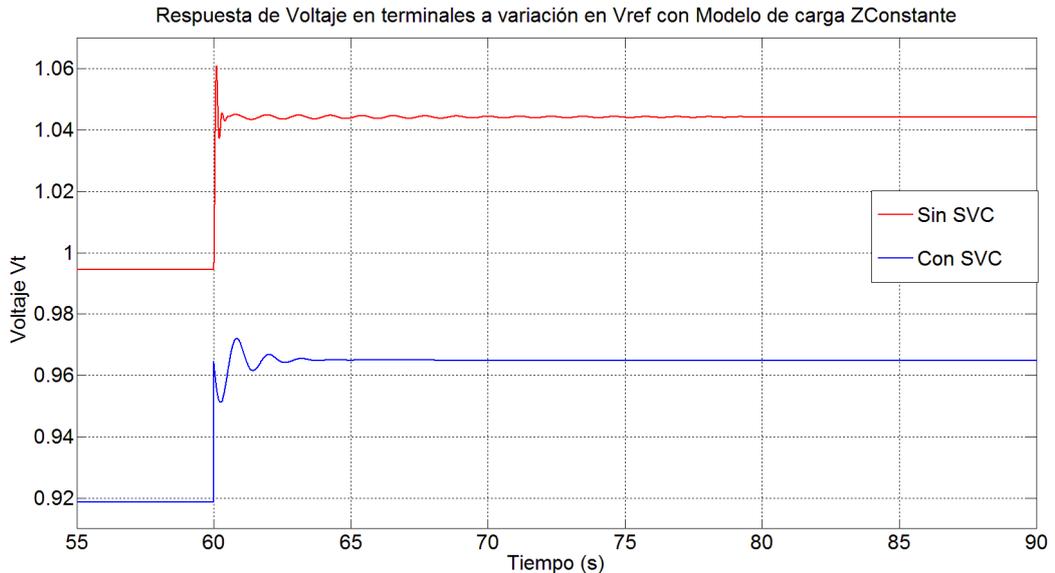


Figura 40. Respuesta en el voltaje en terminales a variación en  $V_{ref}$  con modelo de carga impedancia constante

En comparación con la figura 18, se puede apreciar que las respuestas en magnitud, tiempo de establecimiento y grado de oscilación son constantes y solo se nota un “outset” de  $-2 \times 10^{-3}$  pu en la señal con SVC que resulta de aplicar el modelo de carga.

#### 4.4.2 Respuesta en el ángulo de par $\delta$ con Z constante

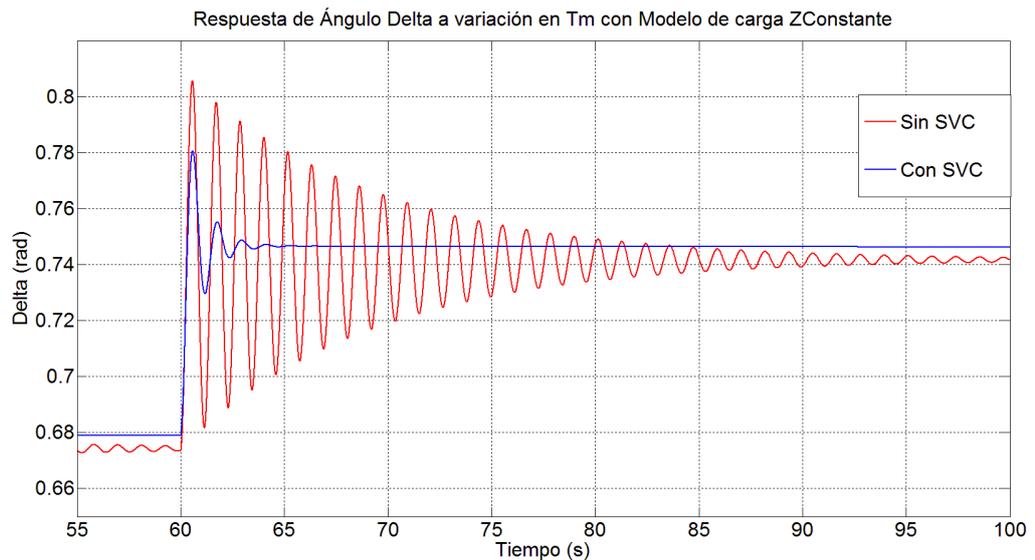


Figura 41. Respuesta en el ángulo de par a variación en Tm con modelo de carga impedancia constante

Se observa que en comparación con la figura 20, se encuentran diferencias solo en el tiempo de establecimiento de la señal sin SVC y en un “outset” de 0.01 pu que se evidencia cuando se trabaja con el modelo de carga en la señal con SVC, de esta forma las magnitudes y el comportamiento oscilatorio no presentan variaciones.

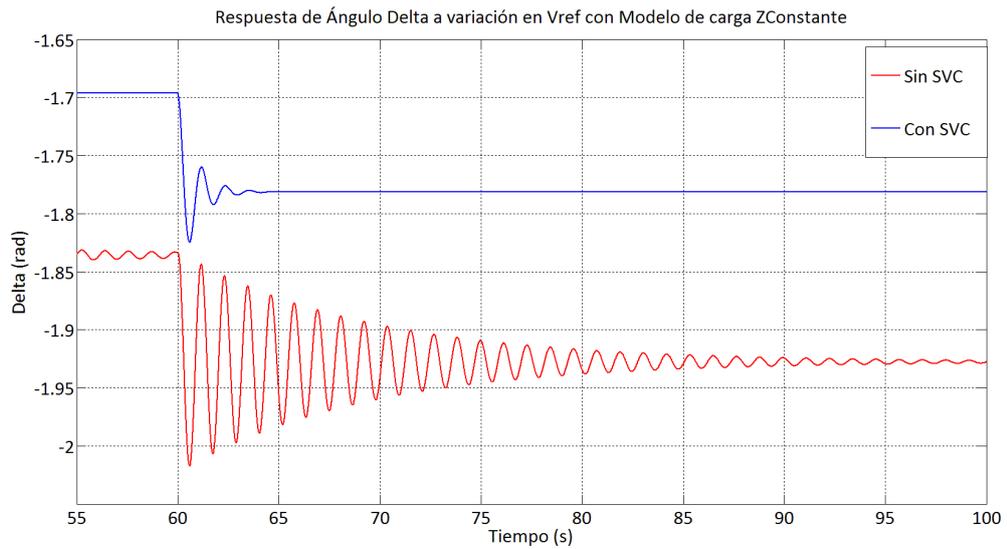


Figura 42. Respuesta en el ángulo de par a variación en Vref con modelo de carga impedancia constante

Por otro lado, se tiene que la respuesta del ángulo delta al implementar el modelo de carga respecto a la figura 21, presenta ciertas variaciones como un “outset” de  $2 \times 10^{-3}$  pu para la señal sin SVC y un “outset” de  $-1.5 \times 10^{-3}$  pu. En cuanto al tiempo de establecimiento, cabe notar que cuando se emplea el modelo de carga, la señal sin SVC toma más tiempo para amortiguarse por completo y no se puede apreciar en la escala de tiempo.

#### 4.4.3 Respuesta en la velocidad angular $\omega$ con Z constante

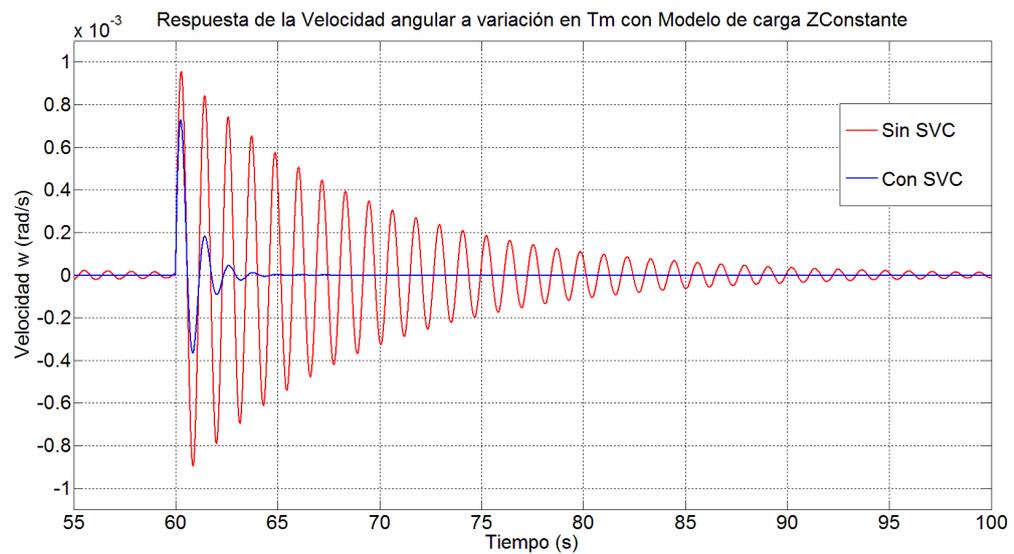


Figura 43. Respuesta en la velocidad angular a variación en Tm con modelo de carga impedancia constante

Se tiene para este caso que en comparación con las respuestas obtenidas en la figura 22, es evidente notar que las amplitudes en los picos más altos aumentan en un 29% aproximadamente y que la señal sin SVC se torna menos amortiguada y su tiempo de establecimiento no se alcanza a observar. También cabe destacar que la señal con SVC permanece con muy poca variación.

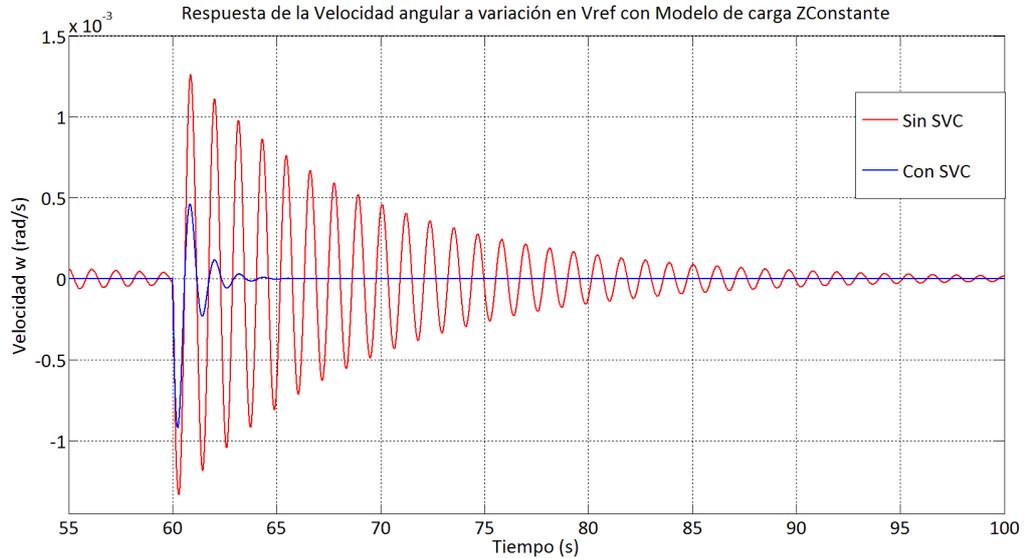


Figura 44. Respuesta en la velocidad angular a variación en Vref con modelo de carga impedancia constante

Al comparar los gráficos de las respuestas con el modelo de carga y la figura 23, se observa una gran similitud en la amplitud, el comportamiento oscilatorio y en cuanto al tiempo de establecimiento, solo la respuesta sin SVC se demora más en acentuarse.

#### 4.5 RESPUESTA EN LAS SALIDAS CON MODELO DE CARGA POTENCIA CONSTANTE

Por último se implementara en el sistema el modelo de carga de potencia constante, de igual forma se introducirán las distintas perturbaciones en las entradas como voltaje de referencia y torque mecánico y se analizara la capacidad de respuesta del sistema ante estas diferentes situaciones.

### 4.5.1 Respuesta en el voltaje en terminales $V_t$ con $P$ constante

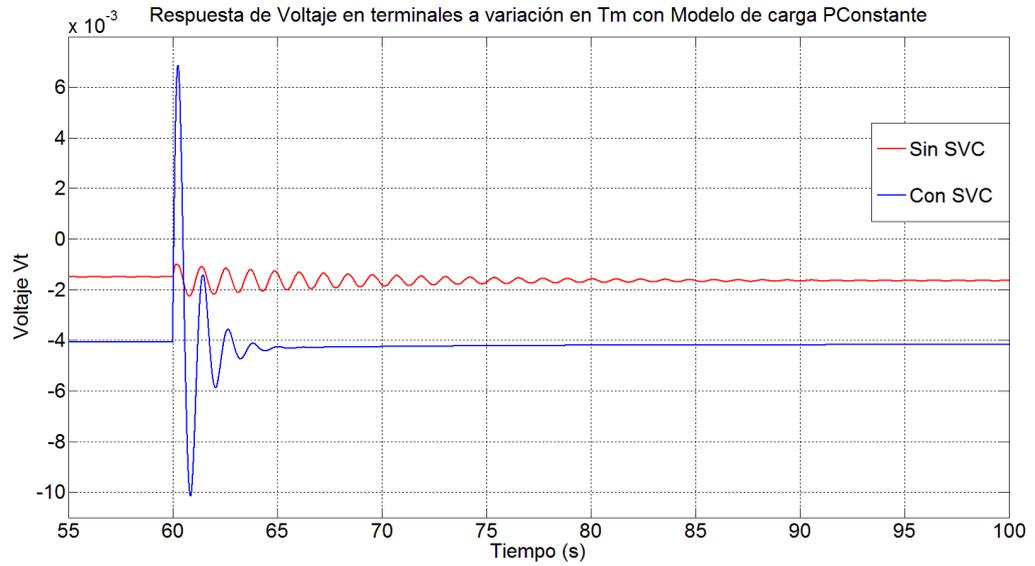


Figura 45. Respuesta en el voltaje en terminales a variación en  $T_m$  con modelo de carga potencia constante

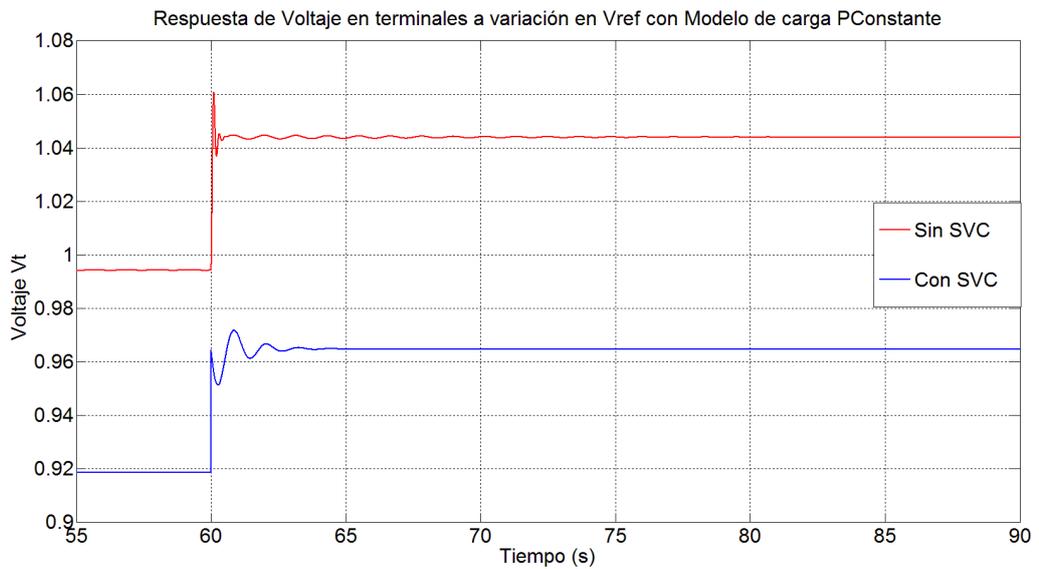


Figura 46. Respuesta en el voltaje en terminales a variación en  $V_{ref}$  con modelo de carga potencia constante

#### 4.5.2 Respuesta en el ángulo de par $\delta$ con P constante

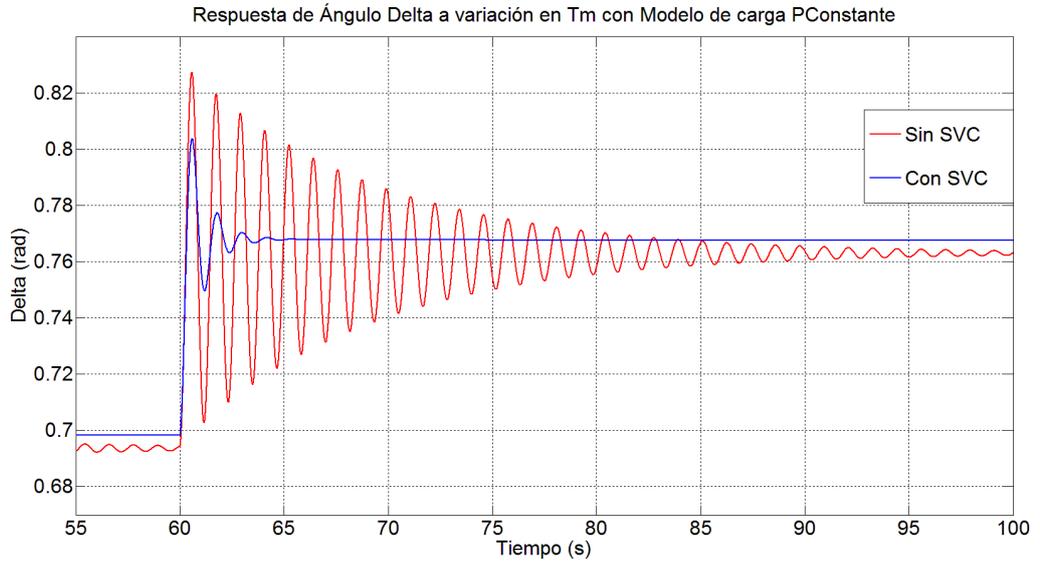


Figura 47. Respuesta en el ángulo de par a variación en  $T_m$  con modelo de carga potencia constante

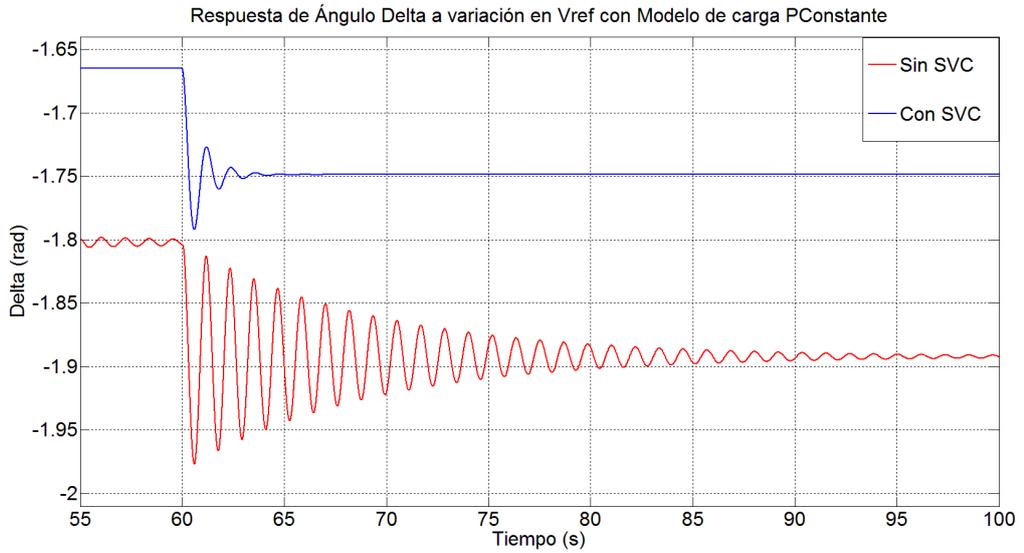


Figura 48. Respuesta en el ángulo de par a variación en  $V_{ref}$  con modelo de carga potencia constante

### 4.5.3 Respuesta en la velocidad angular $\omega$ con P constante

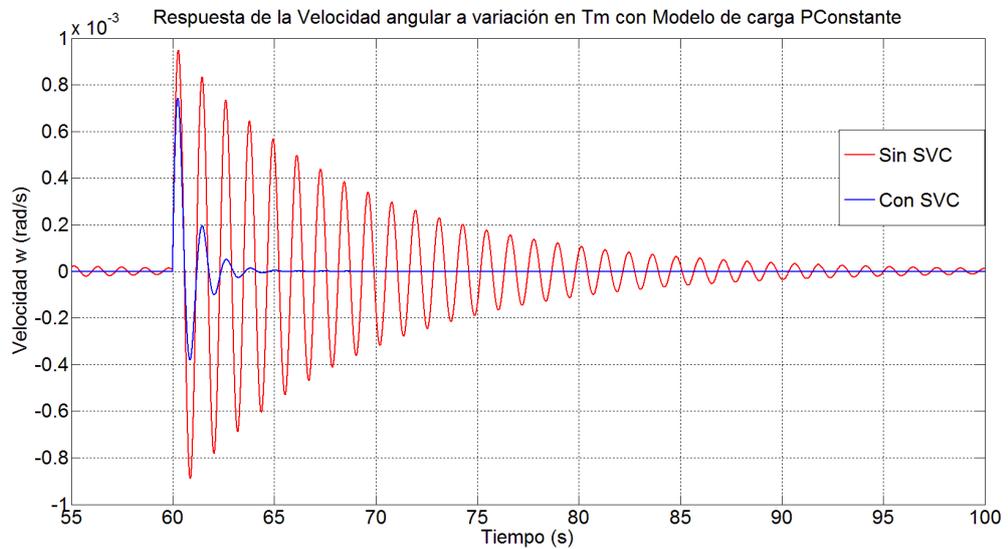


Figura 49. Respuesta en la velocidad angular a variación en  $T_m$  con modelo de carga potencia constante

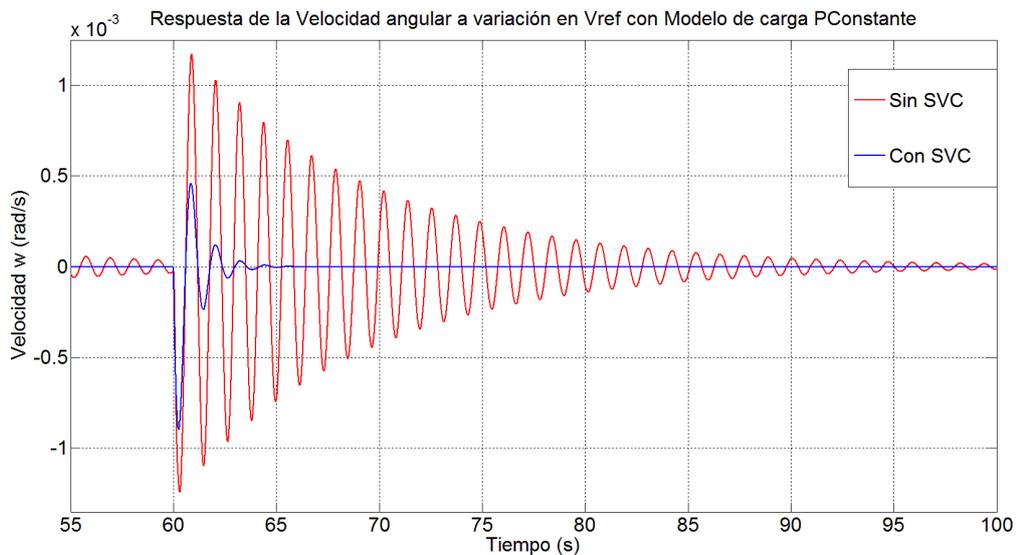


Figura 50. Respuesta en la velocidad angular a variación en  $V_{ref}$  con modelo de carga potencia constante

En general, se encontró que las respuestas arrojadas para el modelo de carga "Potencia Constante" son prácticamente idénticas a las obtenidas cuando se realizaron las simulaciones sin tener en cuenta el modelamiento de carga, de esta forma se nota como el comportamiento oscilatorio, las amplitudes y los tiempos de establecimiento permanecen con muy pocas variaciones.

Teniendo en cuenta que con los diferentes modelos de carga se obtienen respuestas similares, vale la pena resaltar que el modelo de “potencia constante” arroja resultados mucho más parecidos a los de los numerales 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3, 4.2.1 4.2.2 y 4.2.3, puesto que para este modelo se emplea el parámetro  $n$  alrededor de cero y volviendo a la ecuación del numeral 2.4.1, se puede explicar dicho comportamiento.

De esta forma se puede pensar que el punto de operación seleccionado de acuerdo a las especificaciones de la referencia tal, obedece a un patrón similar al empleado en el modelo de “potencia constante”.

## CONCLUSIONES

- Es posible representar y realizar un análisis la dinámica de un sistema SMIB mediante el conjunto de ecuaciones diferenciales de cada uno de sus componentes cuando es sometido a diferentes perturbaciones en sus entradas y determinar la estabilidad del mismo de acuerdo a su modelo de espacio de estados.
- Se estudió la dinámica del amortiguador de oscilaciones (POD) del SVC y se determinaron los criterios de ajuste para los parámetros del controlador mediante técnicas de control clásico. Se observó que al calcular estos coeficientes, el sistema de compensación mejoró notablemente el comportamiento de las salidas al atenuar las oscilaciones y reducir en algunos casos la amplitud de las señales de voltaje en terminales, velocidad angular y ángulo de par.
- El SVC aparte de ser un dispositivo de control de reactivos, puede ser ajustado como un amortiguador de oscilaciones con excelentes características. Cuando se acopla el SVC al sistema se observó que en general las respuestas se estabilizan por completo de una forma más rápida pero en algunas ocasiones aumenta la amplitud de las señales y se presenta señal con “outset”, lo cual puede significar problemas en las máquinas y otros elementos del SMIB.
- Las cargas que se conectan al sistema pueden ser modeladas como potencia, corriente e impedancia constante y ser acopladas al modelo del SMIB para observar su comportamiento teniendo en cuenta los parámetros  $n_p$  y  $n_q$ . Sin importar el modelo implementado, el SVC como dispositivo de control y con los parámetros ajustados, presenta una respuesta similar para los tres casos, debido a que al utilizar los modelos de carga se relaciona el voltaje con la potencia activa, reactiva y los parámetros correspondientes (ver numeral 2.4.1), los cambios presentados en el punto de operación son proporcionales, por lo tanto no se evidencia una gran variación en el factor de potencia.
- La respuesta en la señal de voltaje en terminales cuando se realizan cambios en la entrada del torque mecánico para el esquema con SVC presenta picos de gran magnitud (cerca del 40%) respecto a la señal sin SVC y se estabiliza en tiempos más cortos. Además la señal sin SVC, si bien es oscilatoria, no presenta variaciones significantes en la amplitud. Para perturbaciones en el voltaje de referencia, el voltaje en terminales presenta señales con un “outset” pero los picos en la magnitud son similares para la respuesta con y sin SVC.

- La respuesta en la señal del ángulo de par cuando se realizan cambios en la entrada del torque mecánico para el esquema sin SVC presenta oscilaciones de gran magnitud respecto a la señal con SVC, la cual además se estabiliza en tiempos más cortos. Respecto a la señal sin SVC se puede decir que si bien las oscilaciones se atenúan, no se alcanza a notar su tiempo de establecimiento. Para perturbaciones en el voltaje de referencia, la única variación en el ángulo de par se presenta con una señal de “outset” (aproximadamente 0.15 en pu).
- La respuesta en la señal de velocidad angular cuando se realizan cambios en la entrada del torque mecánico para el esquema sin SVC presenta un comportamiento más oscilatorio que cuando se tiene acoplado el SVC. La gran diferencia respecto a las otras salidas, es que para perturbaciones en el voltaje de referencia, la velocidad angular presenta cambios relevantes si la comparamos con la perturbación en el torque mecánico.
- El toolbox SIMULINK de Matlab representa una herramienta de gran ayuda para realizar las simulaciones y cálculos necesarios para el estudio de estabilidad propuesto. Se observó como las operaciones matriciales y algebraicas se simplifican en gran proporción y como la herramienta de simulación brinda un entorno gráfico que facilita la representación del sistema considerado.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. Argüello, H. Flores, "Estudio de Estabilidad de Pequeña Señal en el Sistema Nacional Interconectado Aplicando el Método de Análisis Modal", XIX Jornada de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, 2005.
- [2] W. Price, "Load Representation for Dynamic Performance Analysis", IEEE Task Force, Transactions on Power Systems, Vol. 8, 1993.
- [3] M. Villarroel, "Sistemas Eléctricos de Potencia II", Universidad de la Frontera, Cap. 1, Chile, 2003.
- [4] S. J. Chapman, "Máquinas Eléctricas", Cap. 5, 4ª Edición, Mc Graw Hill, 2005.
- [5] C. A. Ríos, M. Aristizábal, A. Escobar, "Modelamiento de Sistemas Eléctricos en Presencia de Armónicos", SCIENTIA ET TECHNICA N° 22, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 2003.
- [6] M. Villarroel, "Análisis Moderno de Sistemas de Potencia", Universidad de la Frontera, Cap. 6, 2008.
- [7] C. F. Gallardo, "Estabilidad y Amortiguamiento de Oscilaciones en Sistemas Eléctricos con Alta Penetración Eólica", Tesis doctoral Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática de la Universidad Carlos III de Madrid, 2009.
- [8] J. Játiva, R. Aguilar, "Análisis de Pequeña Señal de un Sistema Máquina - Barra Infinita", JIEE, Vol. 19, 2005.
- [9] F. Sánchez, "Oscilaciones Electromecánicas en Sistemas de Potencia", Tesis de maestría: Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, 1988.
- [10] K. Ogata, "Ingeniería de control moderna", Cap. 9, 2ª Edición, Prentice Hall Hispanoamericana SA, 1993.
- [11] O. A. Esquivel, "Análisis de observabilidad y controlabilidad para sistemas diferencialmente planos", Tesis de grado: Universidad Autónoma Metropolitana, México, 2007.
- [12] D. Giraldo, I. Tabares, "Teoría de Control", Cap.4, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 1997.
- [13] M. H. Rashid, "Electrónica de Potencia. Circuitos, dispositivos y aplicaciones", Cap. 13, 3ª Edición, Prentice Hall, 2004.

- [14] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, Cap. 11, 1994.
- [15] M.W. Mustafa, N. Magaji, "Design of Power Oscillation Damping Controller for SVC Device", IEEE, International Conference on Power and Energy (PECon 08), 2008.
- [16] A. Álzate, J. A. Herrera, O. E. Castro, "Efecto de un Compensador De VAR Estático En El Amortiguamiento de las Oscilaciones", SCIENTIA ET TECHNICA Nº 21, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 2003.
- [17] K. Ellithy, "Tuning of SVC stabilizers over a wide range of load parameters using pole-placement technique", International Conference on Communication, Computer & Power, IEEE, 2007.
- [18] A. Álzate, C. A. Torres, C. Restrepo, "Diseño de un Estabilizador de Sistemas de Potencia Difuso Basado en la Técnica LMI", SCIENTIA ET TECHNICA Nº 40, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 2008.
- [19] P. W. Sauer, M. A. Pai, "Power System Dynamics and stability", Cap. 8, Prentice Hall, 1998.
- [20] K. Ellithy, K. El-Metwally, "A Self Organizing Fuzzy Controller for SVC Stabilizer Design in the Presence of Load Characteristics Uncertainty", IRANIAN JOURNAL OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING, VOL. 7, 2008.
- [21] A. Álzate, "Dinámica de sistemas eléctricos: Estabilidad y control", Cap. 6, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 2000.
- [22] C. Concordia, S. Ihara, "Load Representation in Power System Stability Studies", IEEE, 1982.
- [23] "Bibliography on Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation", IEEE, 1995.
- [24] "Diseño del módulo POD del SVC", Centro de investigaciones eléctricas - electrónicas del Perú CIEEP, Lima, 2010.