



# ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA



## Diseño y Simulación del control de un Compensador Sincrónico Estático (STATCOM)

Daniel Aguilar<sup>(1)</sup>, Luis Gavilanes<sup>(2)</sup>, Síxifo Falcones<sup>(3)</sup>  
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación<sup>(1)(2)(3)</sup>  
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)<sup>(1)(2)(3)</sup>  
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 Vía Perimetral  
Apartado 09-01-5863. Guayaquil, Ecuador  
andres\_aguilar88@hotmail.com<sup>(1)</sup>, langavilanes@hotmail.com<sup>(2)</sup>, sixifo@espol.edu.ec<sup>(3)</sup>

### Resumen

*En el presente proyecto se realiza el diseño del control y simulación de un compensador síncrono estático (STATCOM) aplicado al punto medio de una línea de transmisión. Se empieza diseñando el sistema de tan manera que cumpla con especificaciones dadas para luego encontrar el modelo usando la teoría de la Transformación dq. Estas funciones de transferencia corresponden al lazo interno, el cual se controla la corriente que entrega el dispositivo, y al lazo externo, que controla el voltaje de punto medio de la línea de transmisión. Se utiliza el método del K-Factor para diseñar los respectivos controladores. Por último, se realizan las pruebas del sistema bajo diferentes escenarios.*

**Palabras Claves:** dispositivos FACTS, STATCOM, convertidor multinivel, SPWM, Transformación dq.

### Abstract

*In the present project, the control design and simulation of a static synchronous compensator (STATCOM) applied to the midpoint of a transmission line are realized. This work starts by designing the system so as to meet given specifications, and then find the model using the dq transformation theory. These transfer functions correspond to the inner loop, which controls the current delivered by the device, and to the outer loop, which controls the midpoint voltage of the transmission line. The K-factor method is used to design the corresponding controllers. Finally, the system is tested under different scenarios.*

**Keywords:** FACTS devices, STATCOM, multilevel converter, SPWM, dq Transformation.

## 1. Introducción

Por varios años, la compensación de potencia reactiva ha tenido la atención tanto en parte académica como en la parte industrial. Especialmente, en los últimos años se ha prestado considerable importancia a las configuraciones de compensadores basados en electrónica de potencia. Este tipo de compensadores aplicado a sistemas de transmisión son llamados FACTS en los que se tienen algunos tipos pero uno de los más importantes es el compensador estático síncrono STATCOM [1].

La evolución del STATCOM, que se basa en el principio de que un inversor de voltaje genera un voltaje AC controlable atrás de la reactancia de acoplamiento, de modo que la diferencia de voltaje a través de dicha reactancia produce intercambio de potencia activa y reactiva entre el STATCOM y la red de transmisión[1].

## 2. Proyecto Propuesto

De manera general el proyecto consiste en desarrollar un modelo de simulación usando el programa Simulink en donde se va a diseñar un Controlador Síncrono Estático STATCOM con una capacidad de 50 MVAR conectado en paralelo al punto medio de una línea de transmisión de 138000 voltios.

Para niveles de voltaje en sistemas de transmisión se escogió una topología multinivel en cascada donde se puede llegar a controlar niveles de voltaje y corriente elevados.

Luego se dimensiona los elementos del convertidor de tal manera que el sistema responda de la mejor manera, elementos como bancos de baterías, filtros inductivo y capacitivo y capacidad de transformador de acoplamiento.

Luego de eso se diseña el controlador del sistema para que el mismo opere en estado estable en lazo cerrado y responda de manera adecuada ante condiciones normales y de disturbios.

Una vez diseñado los controladores, se procede a probar el sistema y a verificar a través de simulaciones que el STATCOM diseñado y la estrategia de control utilizada resuelve los problemas comunes en líneas de transmisión como son el de posibilitar el aumento de transferencia de potencia por una línea y responder ante un disturbio como son depresiones de voltaje en una de las barras de la línea y también cambios de ángulo de transferencia.

## 3. Principio de operación del STATCOM

Hoy en día una aplicación de los FACTS en los sistemas de transmisión es el que se emplea en los llamados compensadores síncronos estáticos (STATCOM). Este dispositivo puede absorber y entregar potencia reactiva al sistema en función de las variaciones de tensión del sistema [2].

El funcionamiento básico de un STATCOM es similar al del compensador síncrono. Si el voltaje generado por el convertidor es menor al voltaje del sistema de transmisión, el dispositivo STATCOM actúa como una carga inductiva, absorbiendo potencia reactiva de la red. Por lo contrario cuando el voltaje a la salida del convertidor es mayor al voltaje de la red el STATCOM actúa como un generador en paralelo, generando potencia reactiva hacia el sistema [2].

Los componentes básicos de un STATCOM tienen como parte fundamental un convertidor DC-AC en el cual el lado DC aplicado a este proyecto es de un banco de baterías. El lado AC del convertidor es conectado a la red por medio de una reactancia de acoplamiento o filtro inductivo, un transformador elevador de acoplamiento y un filtro capacitivo como se observa en la figura 1.

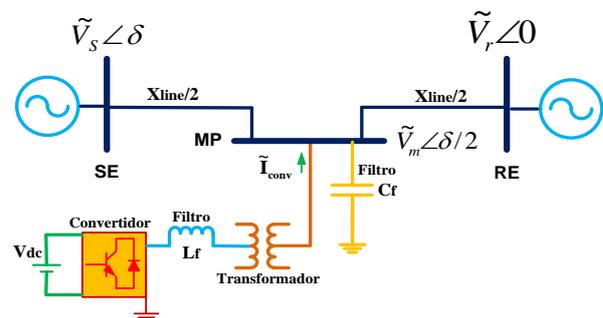


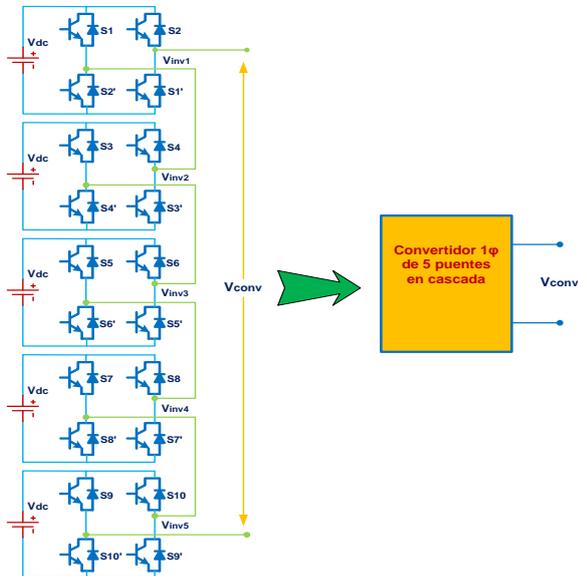
Figura 1. Representación simplificada de un STATCOM.

### 3.1. Convertidores multinivel con modulación SPWM (Sinusoidal por ancho del pulso).

Los convertidores son elementos que varían el voltaje y la corriente que recibe en sus terminales por medio de switches de conmutación que transforman la señal de entrada en una señal pulsante la cual en promedio es una señal AC [5].

En este proyecto se usa una clase de convertidor la cual es multinivel usando celdas inversoras monofásicas conectadas en serie. Para nuestro caso consideramos 5 celdas monofásicas por cada fase por lo que la modulación la cual consiste en controlar la amplitud de voltaje de salida del convertidor haciendo

variar el ancho de pulso en proporción con la amplitud de onda sinusoidal. Se la hace para cada una de las celdas, esto es comparar una señal generadora de pulsos con una señal portadora. La figura 2 muestra los convertidores monofásicos conectados en serie para



una fase [4]

Figura 2. Convertidor multinivel en cascada.

### 3.2. Dimensionamiento de los componentes del STATCOM.

Según el esquema de la figura 1, el cual corresponde al sistema total el cual nosotros vamos a determinar sus componentes donde previamente se estableció los valores típicos en el sistema de transmisión en donde:

- Un nivel de voltaje en la línea de transmisión tanto en la barra de envío como en la barra de recibo de 138000 voltios.
- Un ángulo de transmisión de potencia  $\delta=17.5^\circ$ .
- Resistencia de la línea  $R_{line}=6.893\Omega$
- Inductancia de la línea  $L=56\text{ mH}$ .
- Transformador de acoplamiento de 50MVA y relación de transformación 5100/138000 V.
- Banco de baterías para cada celda monofásica  $V_{dc}=980V$ .

#### 3.2.1. Calculo del filtro inductivo.

Una vez definido el voltaje del convertidor y el voltaje de la red, el método para el cálculo del filtro inductivo es simple, consiste en restar ambas señales para obtener el voltaje en el inductor, en el cual se busca el pulso de mayor área que provoca un mayor rizado de corriente que el filtro tendrá que absorber. La figura 3 muestra un circuito equivalente.

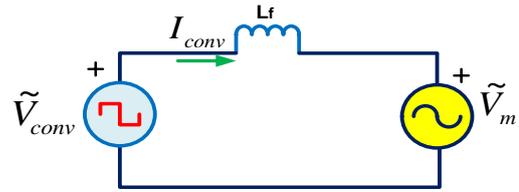


Figura 3. Diagrama equivalente para el cálculo del inductor.

La onda resultante, de la diferencia entre el voltaje sinusoidal de la red y el voltaje pulsante del convertidor es mostrada en la figura 4.

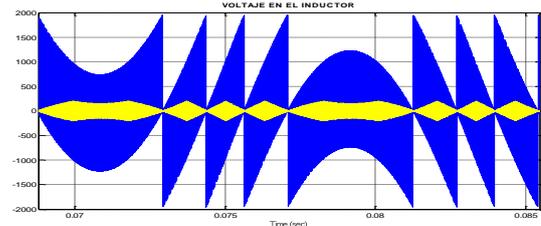


Figura 4. Forma del voltaje del inductor.

El análisis para el cálculo del filtro inductivo se lo hace de manera grafica y matemática, el cual se basa en diferenciales de voltaje y de corriente usando la relación:

$$i_{nom} = \frac{1}{L} \int V_L * dt \quad (1)$$

Donde se aplica un porcentaje de la corriente nominal y gráficamente se busca la mayor área de voltaje por lo que se tiene un valor de inductancia de:

$$L_{filtro} = 0.2\text{ mH}$$

#### 3.2.2. Cálculo de filtro capacitivo.

Se usa el mismo procedimiento que en el cálculo inductivo pero se relaciona un rizado de voltaje y se toma el área mayor de corriente que presenta la figura 5 donde se obtiene una capacitancia  $C=10\mu\text{f}$  por fase.

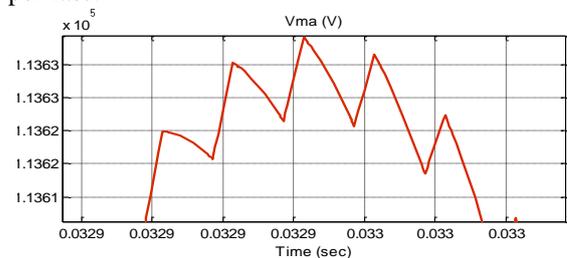


Figura 5. Rizado de voltaje en el punto medio

## 4. Diseño del control del STATCOM

La estrategia de control del STATCOM que se presenta se basa en regular el voltaje en el punto medio de una línea de transmisión esto es controlando la cantidad de potencia reactiva que entrega o absorbe el convertidor [6].

Se modela el sistema en el dominio dq para comprobar cuanta potencia activa y reactiva se puede entregar o absorber de un convertidor trifásico conectado directamente a la red.

Una vez hecho este análisis se procede a encontrar los controladores usando la técnica K-Facto. Estos controladores serán diseñados según como se analice la planta general del sistema.

La planta va a ser dividida en 2 partes ya que tenemos 2 lazos de control como se observa en la figura 6, por lo tanto se calculan 2 funciones de transferencia bien definidas usando la transformación dq [5].

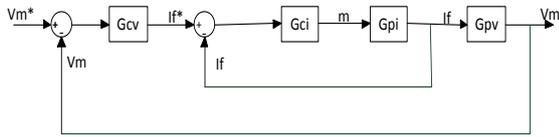


Figura 6. Diagrama de bloques de la planta y controladores del sistema

### 4.1 Modelo matemático del lazo interno de corriente.

Para el control del lazo de corriente se analiza el circuito de la figura 7 y se asume como constante el voltaje del punto medio debido a que el control del lazo de voltaje varía en forma lenta respecto al lazo de corriente.

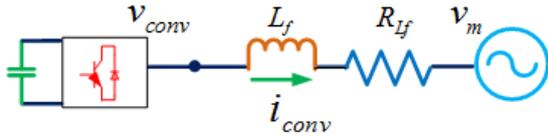


Figura 7. Circuito equivalente para el control de corriente

Analizando se tiene:

$$v_{conv} - v_m = L_f \frac{di_{conv}}{dt} + R_{L_f} i_{conv}$$

$$\bar{T} v_{conv} - \bar{T} v_m = L_f \bar{T} \frac{di_{conv}}{dt} + R_{L_f} i_{conv}$$

$$\begin{bmatrix} v_{conv.d} \\ v_{conv.q} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{md} \\ v_{mq} \end{bmatrix} = L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{conv.d} \\ i_{conv.q} \end{bmatrix} - \omega L_f \begin{bmatrix} i_{conv.q} \\ -i_{conv.d} \end{bmatrix} + R_{L_f} \begin{bmatrix} i_{conv.d} \\ i_{conv.q} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$v_{conv.d} - v_{md} = L_f \frac{di_{conv.d}}{dt} - \omega L_f i_{conv.q} + R_{L_f} i_{conv.d} + \omega L_f i_{conv.q}$$

$$v_{conv.q} - v_{mq} = L_f \frac{di_{conv.q}}{dt} + \omega L_f i_{conv.d} + R_{L_f} i_{conv.q} - \omega L_f i_{conv.d}$$

Asumiendo  $V_{md}$  y  $V_{mq}$  como perturbación se tiene:

$$\frac{I_{conv.d}(s)}{V_{conv.d}(s)} = \frac{1}{L_f s + R_{L_f}} \quad (3)$$

$$\frac{I_{conv.q}(s)}{V_{conv.q}(s)} = \frac{1}{L_f s + R_{L_f}} \quad (4)$$

### 4.2 Modelo matemático del lazo externo de voltaje.

Una vez teniendo el control de corriente, para hacer el modelamiento del lazo de voltaje se analiza desde el voltaje en el punto medio hacia adelante, por lo que se modela de acuerdo a la figura 8.

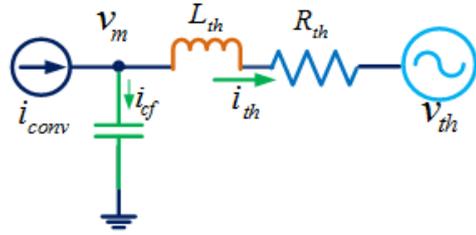


Figura 8. Circuito equivalente para el control de voltaje

Analizando en el dominio dq se tiene:

$$\begin{bmatrix} v_{md} \\ v_{mq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{thd} \\ v_{thq} \end{bmatrix} = L_{th} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{thd} \\ i_{thq} \end{bmatrix} - \omega L_{th} \begin{bmatrix} i_{thq} \\ -i_{thd} \end{bmatrix} + R_{th} \begin{bmatrix} i_{thd} \\ i_{thq} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} i_{conv.d} \\ i_{conv.q} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{thd} \\ i_{thq} \end{bmatrix} = C_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{md} \\ v_{mq} \end{bmatrix} - \omega C_f \begin{bmatrix} v_{mq} \\ -v_{md} \end{bmatrix}$$

$$(L_{th} C_f s^2 + R_{th} C_f s + 1) \begin{bmatrix} v_{md} \\ v_{mq} \end{bmatrix} = (L_{th} s + R_{th}) \begin{bmatrix} i_{conv.d} \\ i_{conv.q} \end{bmatrix}$$

Por lo tanto la planta del lazo de voltaje es:

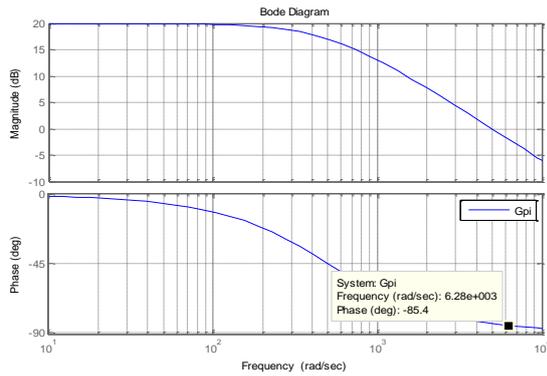
$$G_{PV} = \frac{V_m(s)}{I_{conv}(s)} = \frac{L_{th} s + R_{th}}{L_{th} C_f s^2 + R_{th} C_f s + 1} \quad (6)$$

### 4.3 Diseño del controlador del lazo interno de corriente.

El controlador del lazo interno de corriente es calculado por la técnica antes explicada y que presenta buenas respuestas. Para eso se empieza escribiendo la función de transferencia de la planta.

$$G_{pi} = \frac{1}{L_f s + R_{L_f}} = \frac{1}{0.0002s + 0.1}$$

Una vez encontrada la planta, se deben considerar ciertos aspectos como el margen de fase PM y la fase del sistema  $\varphi_{sist}$ . El cual es calculado graficando el diagrama de bode de la planta dando como resultado la grafica de la figura 9.



**Figura 9.** Diagrama de bode de la planta de corriente.

Como se sabe el diagrama de bode representa la ganancia de la función de transferencia expresada en Decibelios y la fase del mismo en grados. Observamos claramente que a una frecuencia de corte expresada en radianes/segundo. El lazo interno debe ser muy rápido por lo que asumimos ancho de banda  $BW_i = 1000 [Hz]$  por lo que:

$$W_c = 2\pi f_c = 6283.185 \left[ \frac{rad}{seg} \right] \quad (7)$$

Con esa frecuencia de corte en la fase del diagrama de bode observamos que la fase del sistema es de  $-85.4^\circ$

Por lo tanto:

$$\phi_{boost} = PM - \phi_{sys} - 90^\circ = 60^\circ - (-85.4^\circ) - 90^\circ = 55.4^\circ \quad (8)$$

Por lo tanto necesitamos un controlador tipo II. Por lo que empezamos calculando  $k$  y el polo y cero del controlador.

$$k = \tan\left(\frac{\phi_{boost}}{2} + 45^\circ\right) = \tan\left(\frac{85.4}{2} + 45^\circ\right) = \tan(72.7) = 3.21 \quad (9)$$

$$W_z = \frac{W_c}{k} = \frac{6283.185}{3.2106} = 1957.012$$

$$W_p = kW_c = 6283.185(3.2106) = 20172.9845$$

Por lo que la estructura del controlador:

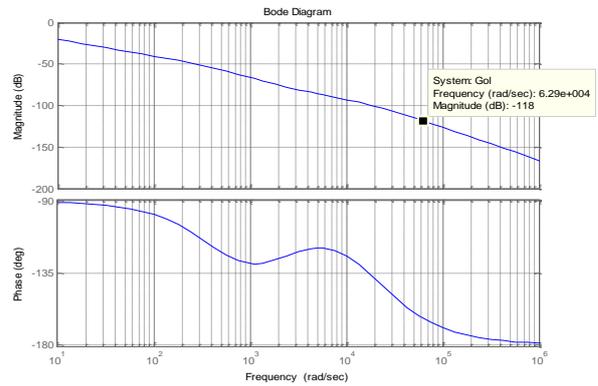
$$G_{ci} = \frac{k_c}{S} \left( \frac{W_z + S}{W_p + S} \right) = \frac{k_c}{S} \left( \frac{1957.012 + S}{20172.9845 + S} \right) \quad (10)$$

Debemos calcular la constante  $k_c$  que nos queda para tener el controlador completo, para eso primeramente asumimos que  $k_c = 1$  y graficamos la función de transferencia de lazo abierto, es decir:

$$G_{OL} = G_{pi} * G_{ci} \quad (11)$$

Esta función de lazo abierto es graficada en bode para determinar qué cantidad de ganancia se debe ajustar para que la frecuencia corte exactamente por 0

decibeles. La figura 10 muestra la función de lazo abierto.



**Figura 10.** Función de transferencia del lazo abierto con  $K_c=1$

Se observa claramente que a la frecuencia de corte se tiene una ganancia de  $-118$  decibeles el cual se debe ajustar por lo que:

$$DB = 20 \log k_p - 118 = 20 \log k_p k_p = 1.2589 * 10^{-6} \quad (12)$$

$$k_c = \frac{1}{k_p} = 794328.2347 \quad (13)$$

Este valor de  $K_c$  es el que se reemplaza en el controlador por lo tanto:

$$G_{ci}(S) = \frac{794328.2347}{S} \left( \frac{1957.012 + S}{20172.9845 + S} \right) = \frac{39.3758S + (77058.99)}{(4.957 * 10^{-5})S^2 + S}$$

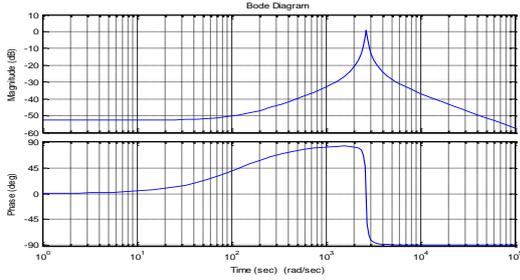
#### 4.4 Diseño del controlador del lazo externo de voltaje

El modelamiento de la planta del lazo externo tiene una particularidad ya que la planta de voltaje requiere de manipulación para su buen funcionamiento.

Partimos escribiendo la función de transferencia de la planta:

$$G_{pv} = \frac{1.9148e^{-5}S + 0.0024}{1.402e^{-7}S^2 + 1.723e^{-5}S + 1}$$

Graficando el diagrama de bode de la planta, como se muestra en la figura 4.16 notamos que la ganancia tiene una forma especial, como una especie de pasa banda por culpa de la frecuencia de resonancia que existe.



**Figura 11.** Ganancia de la planta de voltaje original.

Antes de usar el método de Factor K para hallar el controlador, modificamos la planta de tal manera que insertamos una especie de compensador adicional el cual va a ser calculado previamente.

La frecuencia de resonancia en la Fig.4.16 está al borde o sobre los 0dB. Por lo que se recomienda modificar la planta para que la misma frecuencia de resonancia se encuentre por debajo de los 0dB.

Insertamos una ganancia de compensación al sistema, en donde  $G_{pv}$  y  $G_{comp}$  se comportan como una sola planta y así calculamos el controlador. La ganancia del compensador aumentada a la planta también se la aumenta al controlador. Para hallar el controlador vemos que la planta original tiene un cero que afecta gravemente por lo que encontramos ese mismo cero y lo colocamos como polo en la ganancia del compensador y así luego cancelarse. Luego se averigua la frecuencia de resonancia  $f_{th}$  para insertar un polo adicional ubicado antes de la frecuencia de resonancia. Por lo tanto:

$$w_{th} = \frac{1}{\sqrt{L_{TH} + C}} = 2670.7 \quad (14)$$

$$f_{th} = \frac{w_{th}}{2\pi} = 425.056 \quad (15)$$

$$w_{comp} = \frac{w_{th}}{10} = 267.07 \quad (16)$$

Por lo que:

$$G_{comp} = \left( \frac{w_{comp}}{S + w_{comp}} \right) * \left( \frac{1}{SL_{th} + R_{th}} \right) \quad (17)$$

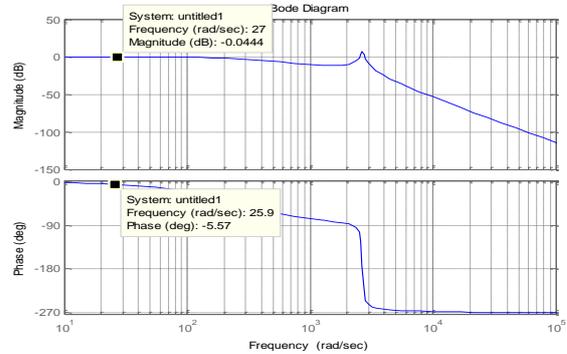
De esta manera este valor de compensación multiplicado por la planta original nos origina una planta aumentada a la que se calculará el compensador por el método del Factor K.

Por lo tanto:

$$G_{pv1} = G_{pv} * G_{comp} \quad (18)$$

$$G_{pv1} = \frac{1.9148e^{-5}S + 0.0024}{1.402e^{-7}S^2 + 1.723e^{-5}S + 1} * \left( \frac{w_{comp}}{S + w_{comp}} \right) * \left( \frac{1}{SL_{th} + R_{th}} \right)$$

Graficamos inicialmente la ganancia y fase de la planta aumentada como se observa en la Fig.12.



**Figura 12.** Ganancia y fase de la planta aumentada.

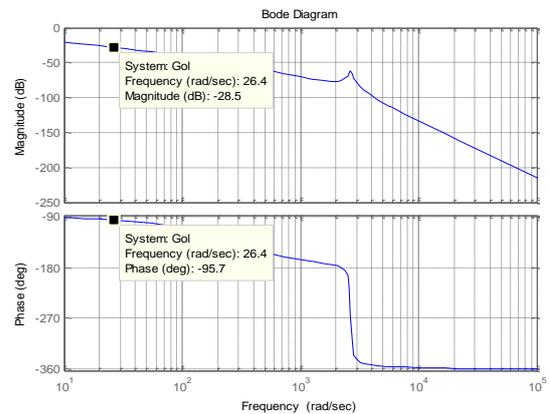
Con esa frecuencia de corte de 26.7 en la fase del diagrama de bode observamos que la fase del sistema es de  $-5.57^\circ$

Por lo tanto:

$$\phi_{Boost} = PM - \phi_{sist.} - 90^\circ = 60^\circ - (-5.57) - 90^\circ = -24.43^\circ$$

Por lo tanto necesitamos un controlador tipo I. Por lo que empezamos calculando k del controlador.

Inicialmente evaluamos el tipo de controlador para un  $k=1$ , es decir un simple polo y de esta manera calculamos la ganancia de lazo abierto  $G_{ol}=G_{pv}*G_{cv}$  asumiendo que simplemente  $G_{cv}=1/S$ . La Fig.13 muestra la ganancia de lazo abierto inicial:



**Figura 13.** Diagrama de bode de la ganancia del controlador de voltaje

La magnitud de la frecuencia de corte hasta donde se desea analizar la señal promedio es de -28.5dB, con lo que se calcula el valor de k.

$$DB = 20 \text{Log} k_p$$

$$k_p = 3.7583 * 10^{-2}$$

$$k = \frac{1}{k_p} = 26.60$$

El nuevo valor de k encontrado se multiplica a la ganancia del controlador inicial por lo que se tiene el valor del controlador real y se procede a graficar como se muestra en la Fig.4.19.

$$G_{c1} = \frac{26.6}{s}$$

Este controlador encontrado es calculado usando una ganancia de compensación antes mencionada por lo que si con esta ganancia afectamos la planta, también debe ser afectada por el controlador por lo que:

$$G_{cv} = G_{comp} * G_{c1} \quad (19)$$

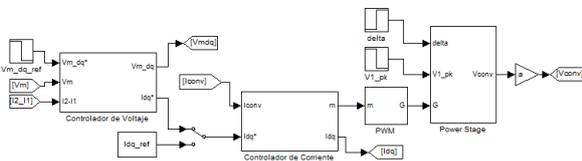
$$G_{cv} = \frac{7168}{1.915e^{-5}S^3 + 0.006478S^2 + 0.6286S}$$

## 5. Simulación del STATCOM

Se presenta el convertidor implementado a una línea de transmisión en MatLab, específicamente en Simulink. Se realizan pruebas en donde se modifica o perturba a la red de transmisión ya sea en magnitud de voltaje o ángulo de una de las barras y así verificar el correcto funcionamiento del STATCOM.

### 5.1 Diseño e implementación en Simulink.

El diseño e implementación del proyecto usando el Programa en Simulink se lo presenta en la Figura 14 en donde se detalla cada bloque.



**Figura 14.** Esquema en Simulink de STATCOM escogido

El diseño del convertidor STATCOM es llamado POWER STAGE en el cual están contenidos varios bloques los cuales son: Convertidor trifásico, transformador trifásico, barra de envío (sending bus, Vs), barra de recibo (receiving bus, Vr). A continuación se especifican el contenido de cada bloque.

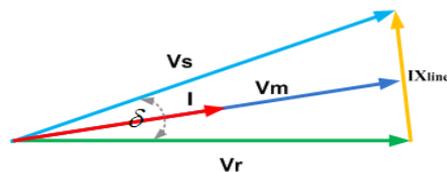
## 5.2 Análisis de resultados del STATCOM.

Los escenarios planteados para comprobar el funcionamiento del STATCOM en la línea de transmisión son los siguientes:

- Un incremento en el ángulo de transmisión de potencia de 17.5 ° que se considera su ángulo de operación normal a 35° su máximo ángulo de transferencia de potencia.
- Una caída de voltaje de un 5% en la barra de envío

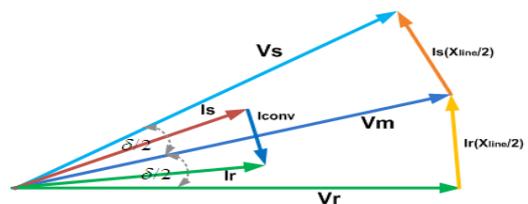
### 5.2.1 Incremento en el ángulo de transmisión de potencia de 17.5° a 35°.

Para entender lo que en principio sucede presentamos el diagrama fasorial en la Figura 15, donde previo al disturbio el voltaje en el punto medio Vm se encuentra en fase con la corriente a través de la línea I que en este caso es igual a la corriente de envío (Is) y la corriente de recibo (Ir)



**Figura 15.** Diagrama fasorial del sistema sin compensación

Luego una vez ocurrido el disturbio, el STATCOM actúa inyectando una corriente en cuadratura (Iconv) al voltaje en el punto medio (Vm) como se observa en la Figura 16.



**Figura 16.** Diagrama fasorial del sistema con compensación

En la Figura 17 se muestra el voltaje del convertidor Vconv\_high en naranja, el voltaje ciclo por ciclo del convertidor Vconv\_high\_cca en rojo, el voltaje en el punto medio Vm en azul, el voltaje en la barra de envío Vs en celeste y el voltaje en la barra de recibo Vr en verde.

En el tiempo t=0.2s ocurre el disturbio y el voltaje del convertidor se incrementa a fin de inyectar una mayor cantidad corriente como se ve en la figura 17 en la cual se muestra la corriente de envío Is en color

rojo, la corriente de recibo  $I_r$  en color verde y la corriente del convertidor  $I_{conv\_high}$  en azul.

En un inicio la corriente de envío a un delta inicial de  $17.5^\circ$  tiene un valor de aproximadamente 1500 [A] y el convertidor aporta con una corriente de 250 [A] suficientes para mantener el voltaje del punto medio en su valor nominal, luego de esto el disturbio generado al cambiar el ángulo delta a un valor de  $35^\circ$  siendo este su valor máximo, se observa que la corriente de envío llega aproximadamente a 3000 [A] y que el convertidor realiza un cambio en su voltaje tanto así que pueda transmitir más cantidad de reactivos, la corriente que inyecta el convertidor llega a un valor de 500 [A], suficiente para mantener el voltaje del punto medio en su valor nominal.

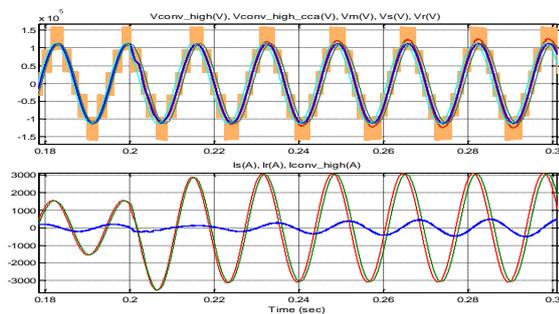


Figura 17. Incremento del ángulo de transmisión

### 5.2.2. Caída de voltaje de un 5% de la barra de envío.

Para explicar lo que sucede en el sistema mostramos el diagrama fasorial en el momento del disturbio donde el voltaje de envío ( $V_s$ ) cae en un 10% y la corriente de envío ( $I_s$ ) crece dando como resultado un incremento en la corriente del convertidor, todo esto en un pequeño transitorio.

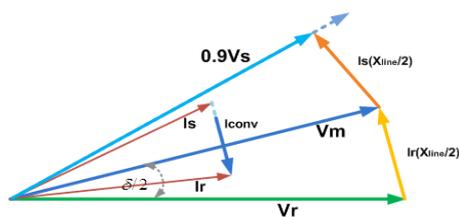


Figura 18. Diagrama fasorial durante la caída de voltaje

Una vez pasado el transitorio y aumentado en su magnitud la corriente del convertidor se establece y los ángulos entre las corrientes de envío y recibo aumentan, como se observa en la Figura 18.

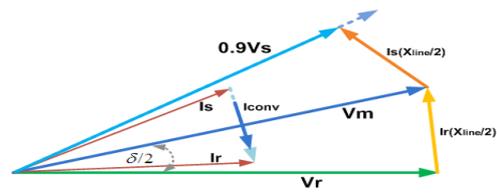


Figura 19. Diagrama fasorial después de la caída de voltaje

En la Figura 19 se muestra el segundo disturbio en  $t=0.4s$  donde el voltaje en la barra de envío  $V_s$  en color celeste cae en una 5% de su valor nominal pico por fase, esto es aproximadamente 5600V lo que provoca un incremento en el voltaje del convertidor y así aumentar la cantidad de potencia reactiva inyectada a la red para mantener el voltaje del punto medio constante y un aumento en la corriente inyectada hacia la red.

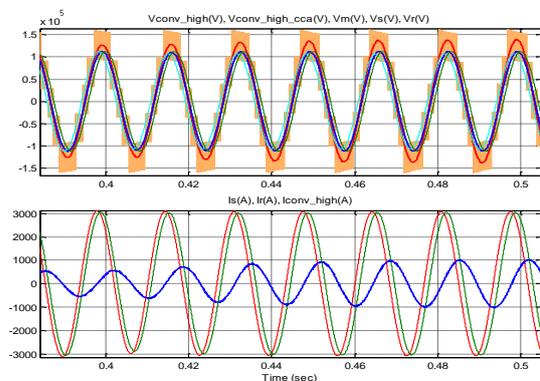
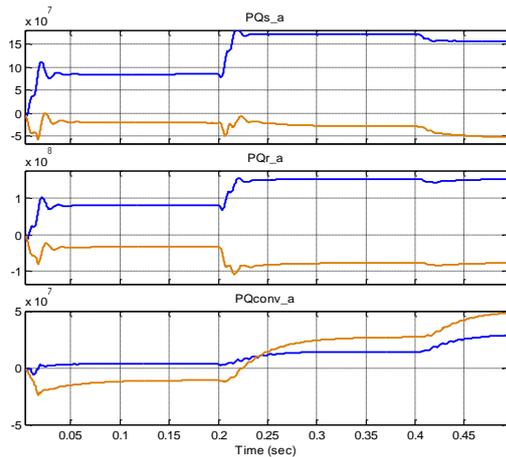


Figura 20. Caída de voltaje en la barra de envío

La reactiva en cada una de las barras la de envío y la de recibo y la barra del punto medio donde está el convertidor. Inicialmente la cantidad de potencia que se transmite por la línea tiene valores de 90 MW y 25 MVAR, el primer disturbio generado por el cambio del ángulo de transmisión cambia los valores de potencia en la línea a 180 MW y 10 MVAR y por parte del STATCOM un aporte de potencia reactiva necesaria para la compensación de aproximadamente 30 MVAR que como consecuencia incrementa la potencia activa en la línea a un valor de 195 MW.

Con el segundo disturbio, el cual se trata de un Sag de voltaje, se produce una reducción de potencia en la línea a valores de 165 MW y 50 MVAR y en donde el convertidor realiza un esfuerzo para compensar la potencia reactiva entregando un total de 50 MVAR que como resultado la línea se incrementa en un valor de 195 MW, es decir el STATCOM aporta con un total de 30MW.



**Figura 21.** Potencia activa y reactiva en las barras durante los disturbios

## Conclusiones

- Se comprobó en las simulaciones que los valores de inductancia y capacitancia en cada uno de los convertidores fue el adecuado ya que permitieron un rizado de voltaje considerado dentro de los márgenes establecidos.
- A través de las simulaciones en el capítulo 4 se comprobó que el control diseñado es estable y además cumple con las especificaciones dadas de ancho de banda y margen de fase.
- A través de las simulaciones en el capítulo 5 se comprobó que el convertidor inyecta la cantidad necesaria de reactivos y concuerda con el análisis fasorial propuesto en cada una de las pruebas con lo que se concluye que efectivamente originó incremento en la capacidad de potencia en aproximadamente un 10 %.
- Se pudo verificar en la simulación que el sistema es estable, ya que haciendo cambios tanto en el ángulo de transferencia como reducción de el voltaje de una de las barras el sistema responde de manera adecuada.

## Recomendaciones

- A la hora de establecer el voltaje en el enlace dc es necesario dimensionar el filtro inductivo de tal forma que su valor no limite la cantidad de reactivos que se desee inyectar a la red ni tampoco que su valor sea muy pequeño de tal manera que no elimine el máximo rizado de corriente permitido en cuyo caso se procederá a variar el número de inversores en serie para el convertidor multinivel en cascada (CMC)
- Debido al limitado ancho de banda para seguir una señal alterna se hizo complicado el control por métodos tradicionales por lo que se

recomienda el uso de la transformada dq0 que alivia el problema al limitado ancho de banda.

## Referencias

- [1] Acha, E; Agelidis, V.G; Anaya-Lara, O; Miller, T.J.E., "Power Electronic Control in Electrical Systems", Newnes Power Engineering Series.
- [2] Murillo, J., "Análisis del STATCOM trifásico en estado estacionario y dinámico para estabilidad de voltaje", Tesis Doctoral, Guadalajara.
- [3] Rivadeneira, J., "Modelamiento y simulación de dispositivos FACTS para estudios eléctricos de estado estable", Tesis Doctoral, Universidad de Antioquia.
- [4] Zhang, X; Rehtanz, C; Pa, R., "Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control (Power Systems)", Springer March 2006.
- [5] Bhim, S; Saha, R., "Enhancing Power Transfer Capacity of Transmission System by Reduced Magnetics Based 48-pulse STATCOM controller", Paper IEEE.
- [6] Burhan, G; Cem, O; Tevhid, A., "Desing and Implementation of a 154KV,  $\pm 50$  MVAR Transmission STATCOM Based on 21 Level Cascaded Multilevel Converter", Paper IEEE.