



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO



Diego Andrés Cisternas Herrera

Controladores FACTS Trabajo N°2

Profesor Sr. Domingo Ruiz Caballero



Escuela de Ingeniería Eléctrica



Resumen

En este trabajo se presenta un sistema de potencia tipo dos máquinas conectado mediante una línea corta, en el cual se estudia su estado sin compensar, para luego compensar reactivos a tres cuartos de la línea de transmisión con STATCOM y luego a la mitad de la línea mediante el uso de SSSC.

Ambos tipos de compensación utiliza un inversor (convertidor CC-CA) de tres niveles, para generar una tensión alterna que se implementa en el sistema. Se presentan los cálculos teóricos para el sistema con sus respectivas simulaciones tipo lazo abierto realizadas en el software PSIM.

Se realiza principalmente el análisis de la tensión y corriente de los compensadores, viendo sus formas de onda y el contenido armónico.

Índice general

Introducción.....	1
1 Sistema sin compensar para STATCOM	2
1.1 Cálculo teórico sin compensar	3
1.2 Simulación del sistema sin compensar.....	4
1.2.1 Simulación con $\delta=2^\circ$	5
1.2.2 Simulación con $\delta=25^\circ$	5
1.2.3 Simulación con $\delta=35^\circ$	6
1.3 Comparación de cálculos con simulación.....	6
2 Compensación con STATCOM.....	8
2.1 Cálculo de los parámetros	8
2.2 Simulación del Sistema con STATCOM	11
2.2.1 Compensación para $\delta=2^\circ$	12
2.2.2 Compensación para $\delta=25^\circ$	16
2.2.3 Compensación para $\delta=35^\circ$	19
3 Sistema sin compensar para SSSC	23
3.1 Cálculo teórico sin compensar	24
3.2 Simulación del sistema sin compensar.....	25
4 Compensación con SSSC	27
4.1 Cálculo de parámetros.....	27
4.2 Simulación del sistema con SSSC.....	29
Discusión y conclusiones.....	32

Introducción

Los sistemas eléctricos de potencia (SEP) tienen la particularidad de presentar problemas comunes como bajas tensiones debido a la impedancia de línea o variaciones en el extremo de la carga, que el extremo de la fuente tenga que suministrar altos niveles de potencia reactiva o simplemente tener problemas para suministrar la potencia requerida por la carga.

Con la aparición de los transistores de potencia como los IGBT, se dio paso a crear convertidores que pueden trabajar con mayor potencia y con una respuesta rápida frente a las variaciones de la carga en los sistemas.

En el siguiente trabajo se dará paso al análisis de un sistema eléctrico de línea corta, en el cual se implementará dos tipos de controladores FACTS, primero con STATCOM (Static synchronous compensator) y luego con SSSC (Static synchronous series compensator), ambos compensadores utilizan convertidores CC-CA (inversores) para introducir al sistema una tensión alterna, la diferencia entre ambos radica en la disposición en la implementación del sistema. Siendo el STATCOM conectado en 'paralelo' y el SSSC en 'serie' respecto a la línea de transmisión.

El STATCOM tiene la particularidad que se implementa con el objetivo de elevar la tensión en el punto de conexión. Y el SSSC reduce parcialmente la impedancia de la línea, permitiendo dar paso a mayor corriente. Ambos compensadores, valga la redundancia compensan reactivos e idealmente no procesan potencia activa.

1 Sistema sin compensar para STATCOM

Se presenta el sistema a trabajar. Se da paso a calcular el ángulo de carga en el punto P, simular para los diferentes grados de carga y verificar los niveles de tensión en el punto P.

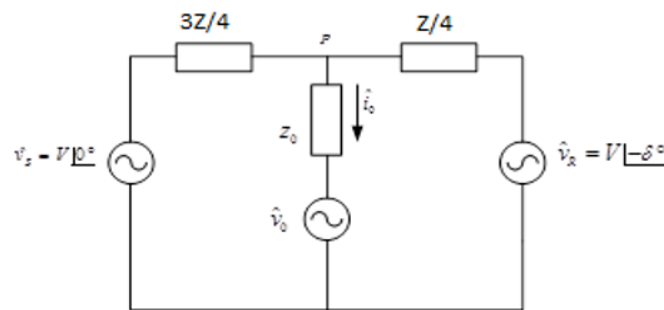


Figura 1-1: Sistema para compensar con STATCOM

En la Figura 1 es mostrado el punto P que representa el punto de compensación y se tiene que:

\vec{V}_S Fasor de tensión fuente (extremo emisor)

\vec{V}_R Fasor de tensión carga (extremo receptor)

X Reactancia de línea

V Tensión eficaz

δ Ángulo de carga

Si se tiene los siguientes datos:

$\delta_{max} = 35^\circ$ Carga máxima $\delta_{min} = 2^\circ$ Carga mínima $\delta_{nom} = 25^\circ$ Carga nominal

$V_s = 1100_{ef} \angle 0^\circ$ [V]

$V_r = 1100_{ef} \angle -\delta^\circ$ [V]

$R = 1$ [mΩ]

$L = 1600$ [μH]

Además se sabe que:

$$f_m = 50 [Hz] \quad f_{port} = 1200 [Hz] \quad V_{port} = 10 [V] \quad E = 3000 [V]$$

1.1 Cálculo teórico sin compensar

Para realizar este cálculo es importante mencionar que se despreciará la resistencia. Se busca conocer valor de $|V_{psc}|$ y δ_p (tensión sin compensar y ángulo en el punto P) en función del ángulo de carga, para luego comparar con las simulaciones.

Primero se busca una expresión de la corriente \vec{I} que circula en la línea de transmisión

$$\vec{I} = \frac{\vec{V}_s - \vec{V}_r}{jX_L}$$

Reemplazando por $\vec{V}_s = V \angle 0^\circ$ y $\vec{V}_r = V \angle -\delta^\circ$ en sus formas complejas rectangulares:

$$\vec{I} = \frac{V(1 - \cos(\delta) + j\sin(\delta))}{jX_L}$$

Utilizando las identidades trigonométricas:

$$\sin[\delta] = 2 * \cos\left[\frac{\delta}{2}\right] * \sin\left[\frac{\delta}{2}\right]$$

$$\cos[\delta] = 1 - 2 * \sin^2\left[\frac{\delta}{2}\right]$$

Se llega a la expresión de corriente

$$\vec{I} = \frac{2V(\sin^2\left[\frac{\delta}{2}\right] + j\cos\left[\frac{\delta}{2}\right] * \sin\left[\frac{\delta}{2}\right])}{jX_L} * \frac{-j}{-j}$$

Desarrollando la expresión se llega a

$$\vec{I} = \frac{2V \sin\left[\frac{\delta}{2}\right] * (\cos\left[\frac{\delta}{2}\right] - j \sin\left[\frac{\delta}{2}\right])}{X_L}$$

Luego la corriente I que circula por el sistema sin compensar es:

$$\vec{I} = \frac{2V \sin\left[\frac{\delta}{2}\right] \angle -\delta/2}{X_L}$$

Ahora para obtener \vec{V}_{psc} se realiza un LVK con la fuente, obteniendo:

$$\vec{V}_s = \vec{I} * \frac{j3X}{4} + \vec{V}_{psc}$$

Si reemplazamos en la ecuación la corriente, podemos notar que las reactancias se van, quedando la expresión de \vec{V}_{psc} :

$$\vec{V}_{psc} = V - \frac{3V * \sin(\frac{\delta}{2}) \angle (90 - \frac{\delta}{2})}{2}$$

Con motivo de realizar el análisis de forma más simple, se procede directamente a evaluar la expresión de \vec{V}_{psc} para los 3 ángulos de carga, utilizando los valores de tensión dados. De lo cual se obtiene la Tabla 1-1 presentada a continuación con los valores teóricos.

Tabla 1-1: Cálculo de tensión y ángulo de carga en el punto P

Ángulo Carga δ [°]	$ \vec{V}_{psc} $ [pu]	$ \vec{V}_{psc} $ [Vpeak]	Ángulo de \vec{V}_p [°]
2	0,9999	1555,46	$\angle -1,500$
25	0,9823	1528,06	$\angle -18,825$
35	0,9655	1501,96	$\angle -26,459$

Cómo se puede observar los ángulos de carga en el punto P corresponden aproximadamente a tres cuartos (3/4) del ángulo de carga δ .

1.2 Simulación del sistema sin compensar

Una vez realizados los cálculos, se procede a simular el sistema para los distintos ángulos de carga, se usará el software PSIM. A continuación en la Figura 1-2 se muestra el sistema en el software.

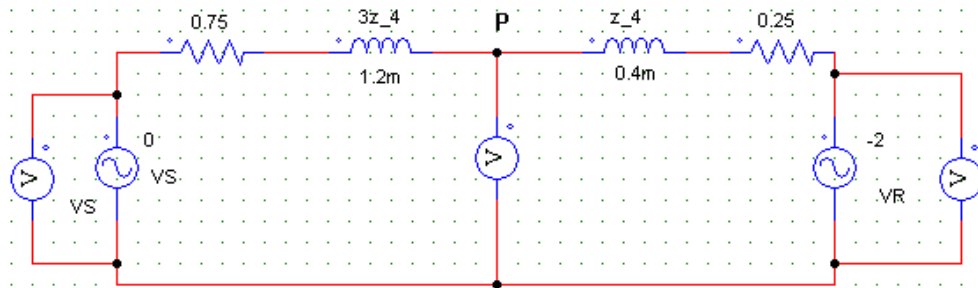


Figura 1-2: Circuito de simulación PSIM sin compensar

Es importante que el sistema se encuentre en régimen permanente para observar de forma correcta las formas de onda y las magnitudes sean las correctas.

1.2.1 Simulación con $\delta=2^\circ$

En la Figura 1-3 se muestra las formas de onda de Vs y Vp para $\delta=2^\circ$:

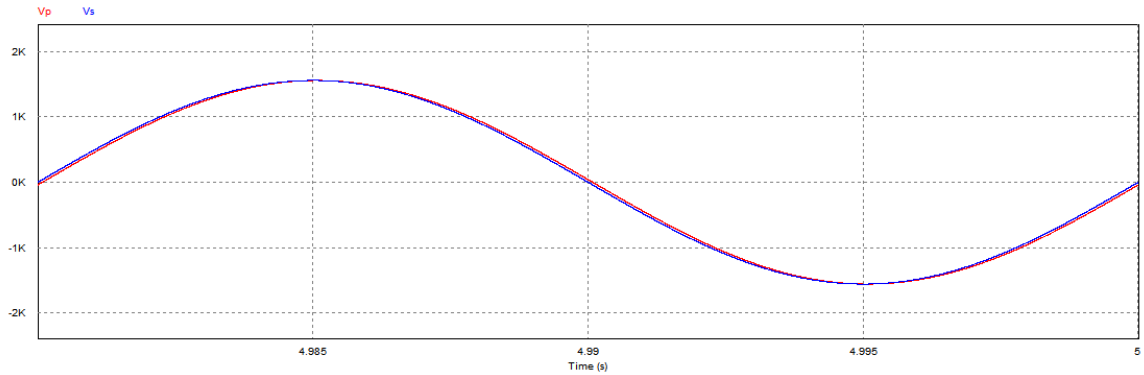


Figura 1-3: Formas de onda Vp y Vs para $\delta=2^\circ$

Como se puede observar, están prácticamente una sobre la otra, en la Figura 1-4 se muestran los resultados de la FFT aplicada a las formas de onda.

Frequency	Vs	Vp	Angle[D]_Vp
0	8.3975908074287325e-009	6.8823510876661735e-007	0
50.002500980566701	1555.6349789489634	1555.457301443334	-1.4820358180532474
100.0050019611334	4.413536539795294e-005	4.4120154985931022e-005	-0.8116610944997612
150.0075029417001	2.3609671094670212e-005	2.3600175530284607e-005	-0.52901248693564884
200.0100039222668	1.6546899712157424e-005	1.6539906260849434e-005	-0.38166147299816755
250.01250490283351	1.2846173349066193e-005	1.2840621760956339e-005	-0.28935668403843456

Figura 1-4: Resultados de FFT para $\delta=2^\circ$

1.2.2 Simulación con $\delta=25^\circ$

En la Figura 1-5 se muestra las formas de onda de Vs y Vp para $\delta=25^\circ$:

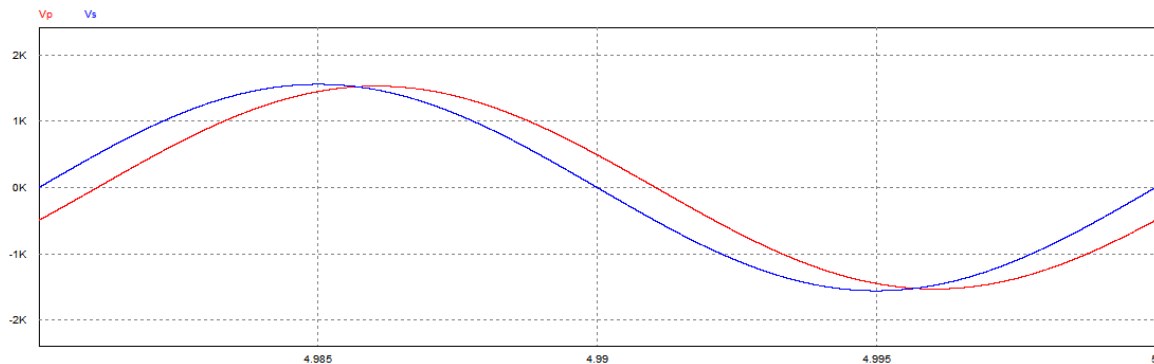


Figura 1-5: Formas de onda Vp y Vs para $\delta=25^\circ$

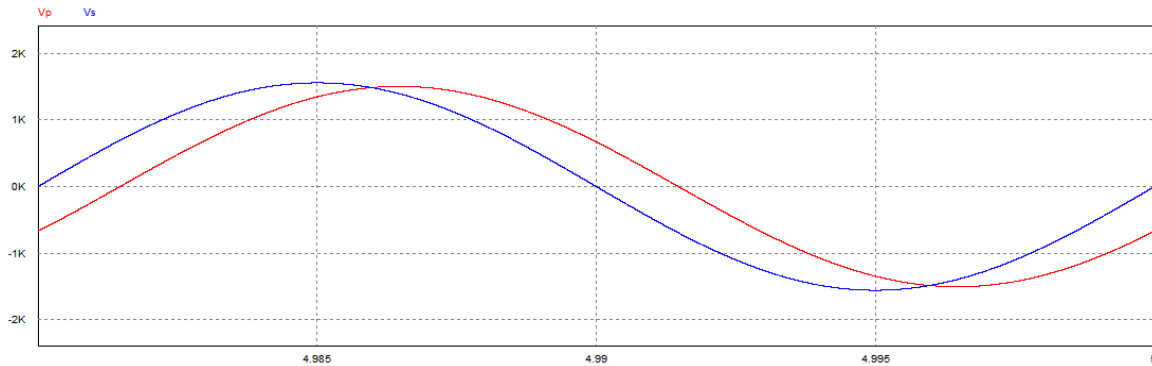
En estas formas de onda ya se puede apreciar el desfase que existe entre la fuente Vs y la tensión Vp, en la Figura 1-6 se muestran los resultados de la FFT aplicada a las formas de onda.

Frequency	Vs	Vp	Angle[D]_Vp
0	8.3903551845706216e-009	8.4280836258609946e-006	0
50.002500980566701	1555.6346213278973	1528.0623013078475	-18.807264406795667
100.0050019611334	4.413535523847798e-005	4.1774719538093472e-005	-10.758452642234383
150.0075029417001	2.3609665660526788e-005	2.2130738947295528e-005	-7.2432044106324458
200.0100039222668	1.6546895908240932e-005	1.5456190009196046e-005	-5.4381724243444998
250.01250490283351	1.2846170396080526e-005	1.197978164813278e-005	-4.3421843054711848

Figura 1-6: Resultados de FFT para $\delta=25^\circ$

1.2.3 Simulación con $\delta=35^\circ$

En la Figura 1-7 se muestra las formas de onda de Vs y Vpsc obtenidas:

Figura 1-7: Formas de onda Vpsc y Vs para $\delta=35^\circ$

Se puede observar ahora que están un poco más desfasadas, a continuación se muestra en la Figura 1-8 los resultados de la FFT para las formas de onda.

Frequency	Vs	Vp	Angle[D]_Vp
0	8.3880771373077152e-009	1.1441911642184797e-005	0
50.002500980566701	1555.6344188602072	1501.9588919113312	-26.440915479977658
100.0050019611334	4.4135349515331082e-005	3.9600467162965484e-005	-15.513347441550946
150.0075029417001	2.3609662592375146e-005	2.0761393514047902e-005	-10.524926349724195
200.0100039222668	1.6546893761104277e-005	1.4443998639255312e-005	-7.9297580666070973
250.01250490283351	1.2846168721694534e-005	1.1174858060134027e-005	-6.3468169712495097

Figura 1-8: Resultados de FFT para $\delta=35^\circ$

1.3 Comparación de cálculos con simulación

Con los resultados obtenidos se construye una tabla comparativa para observar de mejor forma el contraste de los cálculos con las simulaciones.

Tabla1-2: Comparación de Cálculos y Simulación sin compensar

1 Sistema sin compensar para STATCOM

$\delta [^\circ]$	$\overrightarrow{ V_{psc} } [V_{peak}]$ Calculado	$\delta_p [^\circ]$ Calculado	$\overrightarrow{ V_{psc} } [V_{peak}]$ Simulado	$\delta_p [^\circ]$ Simulado
2	1555,46	$\angle -1,500$	1555,457	$\angle -1,482$
25	1528,06	$\angle -18,825$	1528,062	$\angle -18,807$
35	1501,96	$\angle -26,459$	1501,959	$\angle -26,441$

Como se apreciar al contrastar los resultados obtenidos, estos presentan un error mínimo, por lo que podemos concluir que las simulaciones realizadas fueron realizadas de forma correcta.

Compensación con STATCOM

Ahora se busca compensar reactivos con el uso de STATCOM, para lograrlo primero se calcularán los parámetros del compensador y posteriormente realizar las simulaciones lazo abierto del sistema para los 3 ángulos de carga de interés.

2.1 Cálculo de los parámetros

El STATCOM consiste en un inversor (convertidor CC-CA) el cual impone una tensión \vec{V}_0 y es conectado al punto P mediante una impedancia de acoplamiento presentada como \vec{z}_0 .

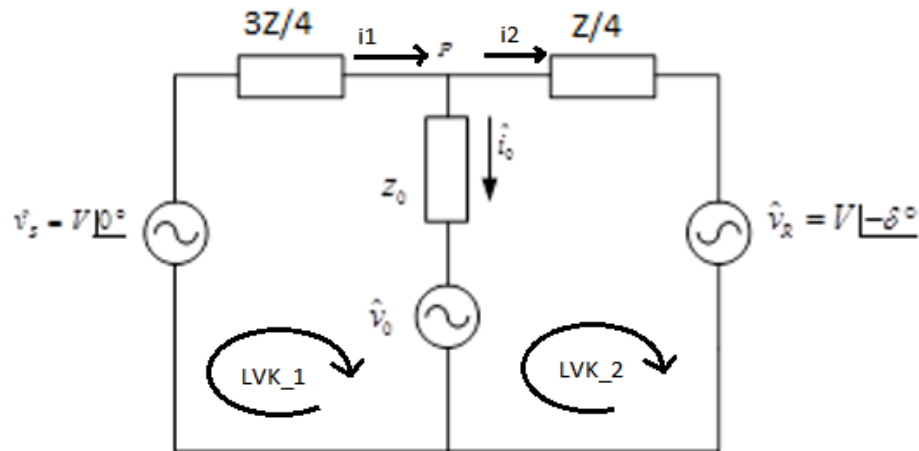


Figura 2-1: Circuito equivalente SVC y su representación equivalente

Para el cálculo de parámetros se usará la Figura 2-1 para definir las ecuaciones necesarias, es importante mencionar que la rama del STATCOM idealmente no debe procesar potencia activa, por lo cual la tensión al punto P, denominada \vec{V}_P , debe conservar el ángulo de la tensión sin compensar, y para que compense debe llevar la tensión a 1 [pu].

A continuación se plantearán una serie de ecuaciones a partir de la Figura 2-1. Primero se define la ecuación de tensión para \vec{V}_0 del inversor.

$$\vec{V}_0 = \vec{V}_P - \vec{I}_0 * \vec{z}_0$$

Luego se define las ecuaciones para las corrientes \vec{I}_1 e \vec{I}_2 , a partir del LVK1 y LVK2 respectivamente:

$$\vec{I}_1 = \frac{\vec{V}_s - \vec{V}_p}{3z/4} \quad ; \quad \vec{I}_2 = \frac{\vec{V}_p - \vec{V}_r}{z/4}$$

A partir del LCK se tiene que:

$$\vec{I}_0 = \vec{I}_1 - \vec{I}_2$$

Reemplazando por las expresiones de \vec{I}_1 e \vec{I}_2 en el LCK:

$$\vec{I}_0 = \frac{4(\vec{V}_s - \vec{V}_p) - 3 * 4(\vec{V}_p - \vec{V}_r)}{3z}$$

Desarrollando la expresión de corriente para \vec{I}_0 :

$$\vec{I}_0 = \frac{(4\vec{V}_s + 12\vec{V}_r - 16\vec{V}_p)}{3z}$$

Ahora para nuestro sistema se tienen las siguientes tensiones, considerando que la compensación realizada por el STATCOM en el punto P corresponde a 1 en por unidad con un ángulo de $(-3\delta/4)$ de modo que idealmente no procese potencia activa:

$$\vec{V}_s = V \angle 0^\circ$$

$$\vec{V}_p = V \angle -\frac{3\delta}{4}$$

$$\vec{V}_r = V \angle -\delta^\circ$$

Finalmente al despejar \vec{I}_0 en función de δ :

$$\vec{I}_0(\delta) = \frac{4V(1 + (3\angle -\delta) - (4\angle -\frac{3\delta}{4}))}{3z}$$

Luego si reemplazamos la expresión de \vec{I}_0 en la ecuación de \vec{V}_0 se obtiene:

$$\vec{V}_0(\delta) = (V \angle -\frac{3\delta}{4}) - \left(\frac{4V \left(1 + (3\angle -\delta) - \left(4\angle -\frac{3\delta}{4} \right) \right)}{3z} * z_0 \right)$$

A partir de esta última ecuación se puede saber la tensión \vec{V}_0 que debe entregar el inversor en función del ángulo de carga, puesto que 'z' y 'V' son valores conocidos.

$$z = (1 + j * 2\pi * 50 * 1600 * 10^{-6}) = (1,119 \angle 26.687^\circ) [\Omega]$$

$$V = (1100 * \sqrt{2}) = 1555,63 [V]$$

Solo queda obtener el valor de z_0 , el cuál es la impedancia de acoplamiento, la cual consiste principalmente en una inductancia de acoplamiento, siendo la parte resistiva parásita. Si se considera un valor de la resistencia parásita de $R_o=10[m\Omega]$, solo queda por obtener L_o a partir de las ecuaciones de los apuntes.

$$L_o = \frac{E}{8 * f_{port} * \Delta I_o}$$

Los valores de E y f_{port} son conocidos. El valor de ΔI_o (ondulación máxima de corriente) será considerado del 5%. Para el circuito de dos máquinas resulta que las corrientes tienen mayor valor cuando el ángulo de carga es más grande, por lo que la ondulación debe ser calculada considerando condición de δ_{max} , resultando:

$$\vec{I}_0(\delta_{max}) = \frac{4 * 1555,63 * (1 + (3\angle -35^\circ) - (4\angle -26,25^\circ))}{3 * (1,119\angle 26,687^\circ)} = (257,2\angle 132,8^\circ)[A]$$

Luego ΔI_o resulta:

$$\Delta I_o = 0,05 * |I_o(\delta_{max})| = 12,86[A]$$

Con el valor de ΔI_o se procede a calcular L_o :

$$L_o = \frac{3000}{8 * 1200 * 12,86} = 24,3[mH]$$

Conociendo L_o , se puede obtener z_0 :

$$z_0 = (R_o + j\omega L_o) = (0,01 + j * 2\pi * 50 * 24,3 * 10^{-3}) = (7,634\angle 89,92^\circ)[\Omega]$$

Con este último resultado ya es posible calcular \vec{V}_0 . A continuación se presenta la Tabla 2-1 con las tensiones y corrientes fasoriales de interés, para los diferentes ángulos de carga. Tanto \vec{V}_0 como \vec{I}_0 son calculados según las ecuaciones ya planteadas, y se considera a \vec{V}_p como 1 [pu] y con el ángulo obtenido de las simulaciones sin compensar.

Tabla 2-1: Tensiones y corrientes teóricos de interés STATCOM

Ángulo de carga $\delta[^\circ]$	Tensión compensada en punto P $\vec{V}_p[V]$	Corriente rama STATCOM $\vec{I}_0[A]$	Tensión a salida del inversor $\vec{V}_0[V]$
2	(1555,63 \angle -1,482°)	(2,483 \angle -138,12°)	(1542,69 \angle -0,97°)
25	(1555,63 \angle -18,807°)	(131,44) \angle 135,52°)	(2187,07 \angle 5,59°)
35	(1555,63 \angle -26,441°)	(255,84 \angle 127,37°)	(2987,23 \angle 9,45°)

Por último queda por obtener los índices y parámetros relacionados con el inversor, primero se calculará el índice de frecuencia m_f , para saber en qué frecuencia se tendrán las componentes armónicas de tensión más relevantes.

$$m_f = \frac{f_{port}}{f_m} = \frac{1200}{50} = 24[-]$$

El inversor a utilizar corresponde a uno de tres niveles, por lo cual las armónicas más importantes estarán presentes en el orden de $(2m_f \pm 1)$, o sea en las armónicas 47 y 49, que corresponden a 2350[Hz] y 2450[Hz] respectivamente.

El circuito se simulará en lazo abierto, por lo cual es necesario obtener el índice de modulación m_i , la tensión de la señal moduladora V_m y el ángulo de fase de la moduladora, para cada ángulo de carga. A continuación se presentan las ecuaciones obtenidas de los apuntes para realizar estos cálculos:

$$m_i(\delta) = \frac{|\overrightarrow{V_o}(\delta)|}{E}$$

Una vez obtenido el índice de modulación se calcula la tensión de la moduladora como:

$$V_m(\delta) = V_{port} * m_i(\delta)$$

Y el ángulo de fase de la moduladora, debe ser el mismo ángulo que el de la tensión ya calculada $\overrightarrow{V_o}$. Se presenta la Tabla 2-2 los parámetros de interés de la señal moduladora para cada ángulo de carga:

Tabla 2-2: Parámetros de interés de la señal de tensión moduladora del inversor

Ángulo de carga $\delta[^\circ]$	Índice de modulación $m_i(\delta)[-]$	Tensión de la moduladora $V_m(\delta)[V]$	Ángulo de fase de moduladora $\theta[^\circ]$
2	0,514	5,14	$\angle -0,97$
25	0,729	7,29	$\angle 5,59$
35	0,996	9,96	$\angle 9,45$

2.2 Simulación del Sistema con STATCOM

Ya con los parámetros constructivos del STATCOM se procede a simular el circuito para los ángulos de carga de interés en lazo abierto, y comprobar si la tensión en el punto P es llevada a 1 en [pu] con su ángulo correspondiente para la frecuencia fundamental. Es importante notar que como el circuito está en presencia ahora de la tensión $\overrightarrow{V_o}$ del inversor de 3 niveles, por tanto aparece ahora en el circuito el contenido armónico correspondiente.

Para los distintos grados de carga se verán las formas de onda, el espectro monolateral (obtenido aplicando la FFT) y una tabla con las armónicas significativas de \vec{V}_0 , \vec{I}_0 y \vec{V}_p . Estos fasores serán comparados con los resultados calculados previamente.

Las distintas tensiones \vec{V}_0 se logran modificando los parámetros de tensión y desfase a la onda de tensión moduladora.

Se muestra en la Figura 2-2 el circuito a simular en el software PSIM para compensar con STATCOM.

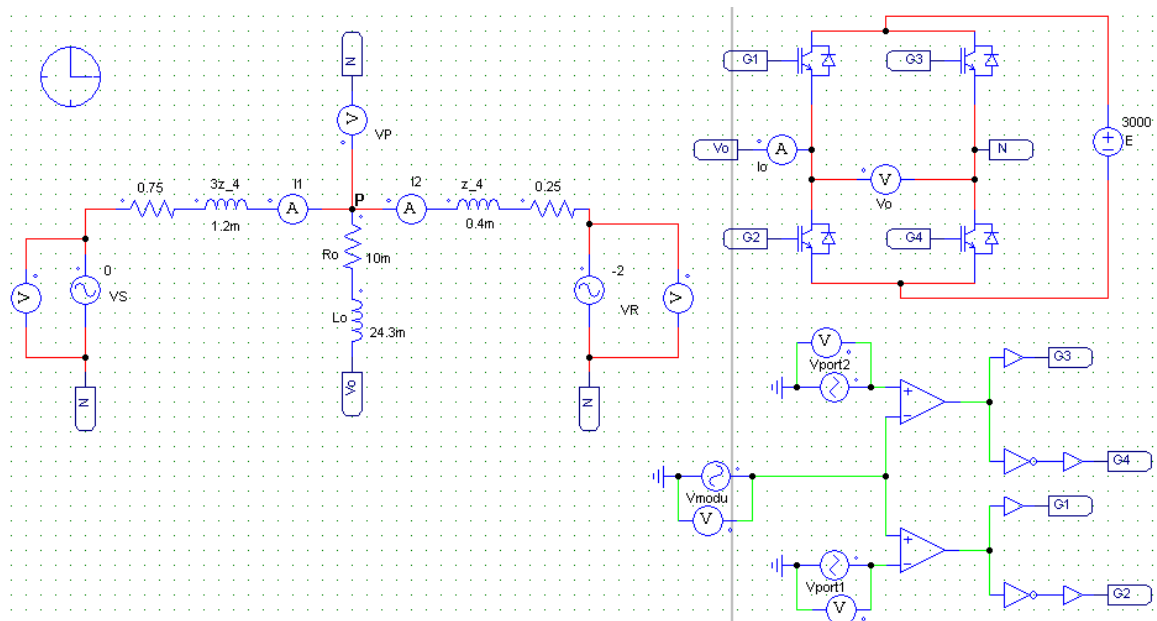


Figura 2-2: Simulación de sistema con STATCOM en PSIM

2.2.1 Compensación para $\delta=2^\circ$

Primero se muestran las formas de onda de la tensión \overline{V}_0 :

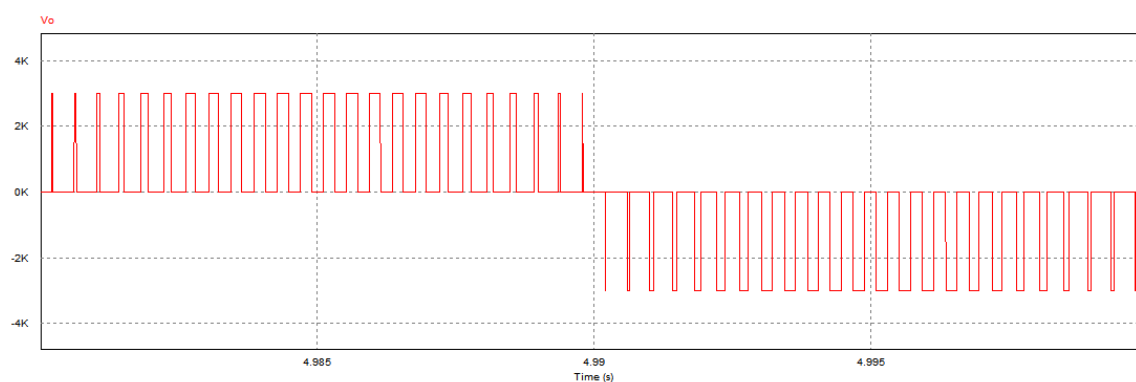


Figura 2-3: Forma de tensión \vec{V}_0 para δ_{min}

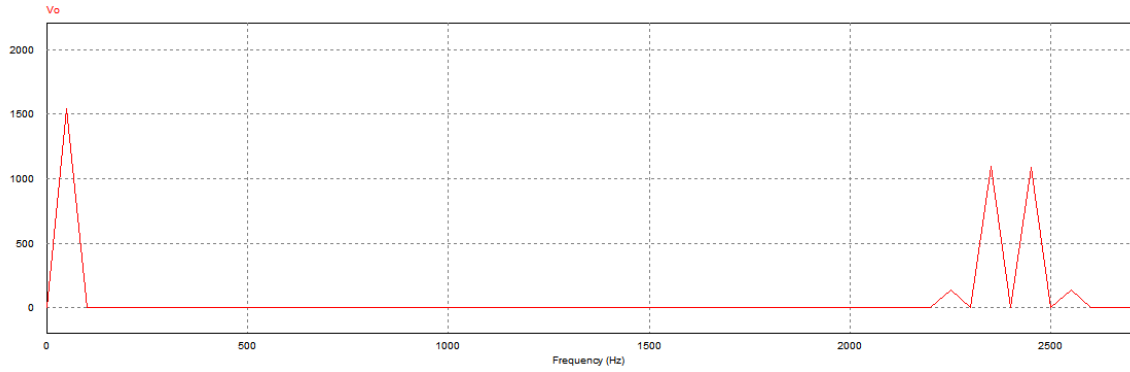
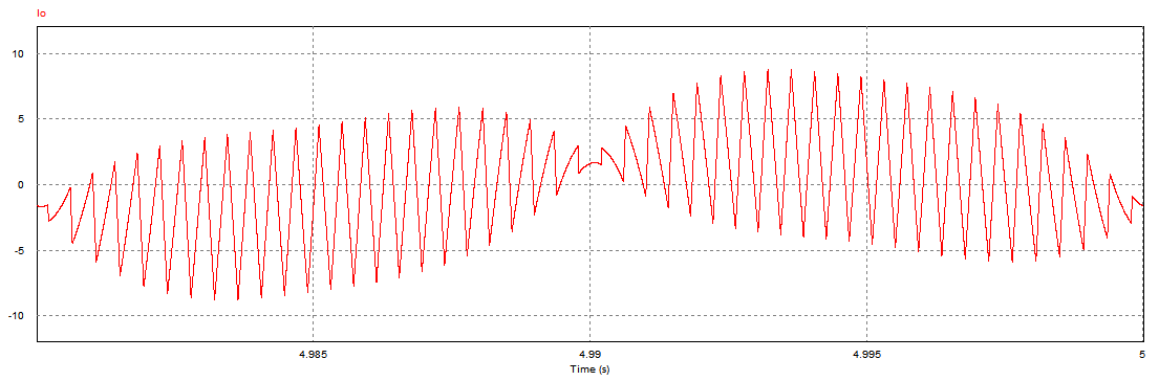

Figura 2-4: Espectro monolateral de \vec{V}_0 para δ_{min}

Tabla 2-3: Armónicos de amplitud relevante de \vec{V}_0 para δ_{min}

Frecuencia [Hz]	$ \vec{V}_0 [\text{V}]$	Ángulo de $\vec{V}_0[^\circ]$
50	1541,5	$\angle -0,92$
2250	141,5	$\angle 4,13$
2350	1092,3	$\angle 1,76$
2450	1089,9	$\angle 179,88$
2550	142,3	$\angle 178,22$

Ahora la corriente por el STATCOM \vec{I}_0 :


Figura 2-5: Forma de onda corriente \vec{I}_0 para δ_{min}

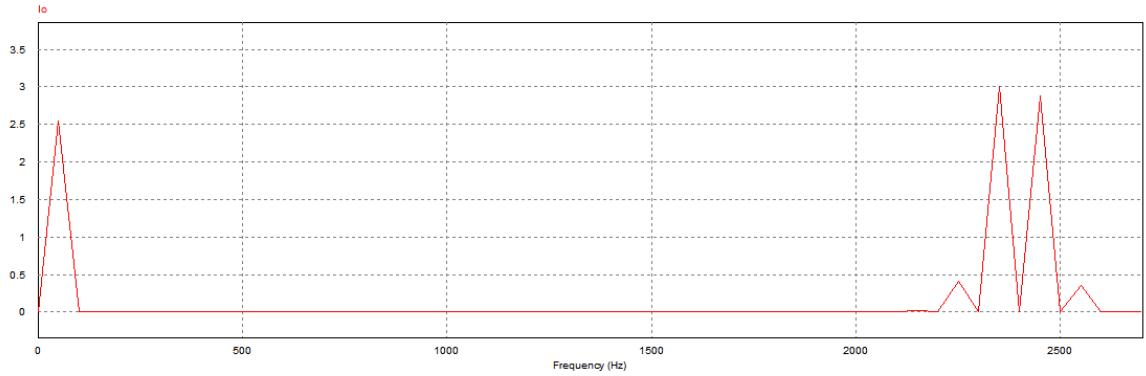
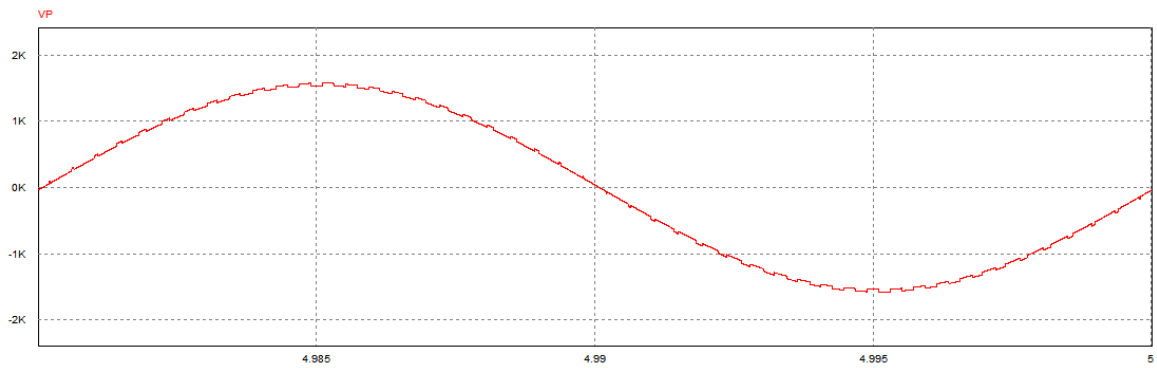

Figura 2-6: Espectro monolateral de \vec{I}_0 para δ_{min}

Tabla 2-4: Armónicos de amplitud relevante de \vec{I}_0 para δ_{min}

Frecuencia [Hz]	$ \vec{I}_0 $ [A]	Ángulo de \vec{I}_0 [°]
50	2,54	$\angle -136,54$
2250	0,41	$\angle 93,75$
2350	3,00	$\angle 91,84$
2450	2,88	$\angle -90,06$
2550	0,36	$\angle -91,96$

Finalmente las formas de onda de \vec{V}_p :


Figura 2-7: Forma de onda de \vec{V}_p para δ_{min}

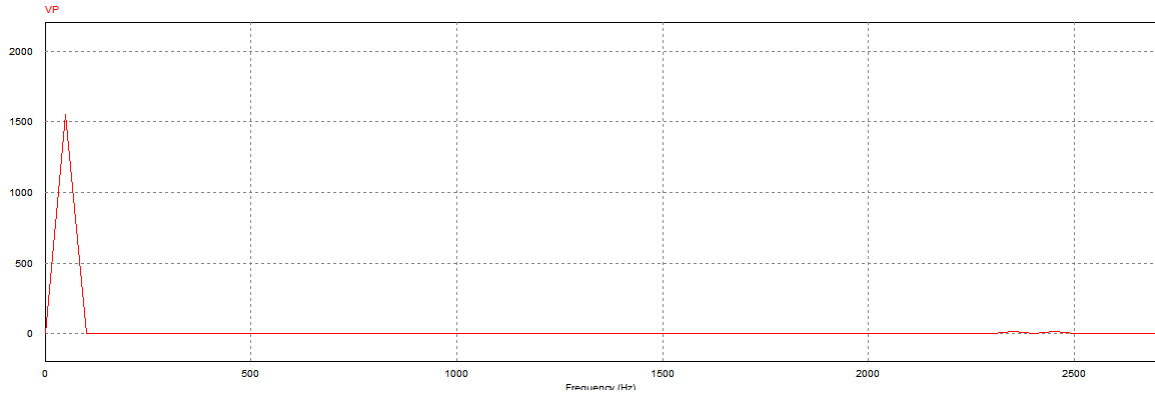

Figura 2-8: Espectro monolateral de \vec{V}_p para δ_{min}

Tabla 2-5: Armónicos de amplitud relevante de \vec{V}_p para δ_{min}

Frecuencia [Hz]	$ \vec{V}_p $ [V]	Ángulo de \vec{V}_p [°]
50	1555,62	$\angle -1,46$
2250	1,73	$\angle 1,62$
2350	13,33	$\angle -0,63$
2450	13,30	$\angle 177,59$
2550	1,74	$\angle 176,02$

Con los resultados obtenidos de las simulaciones se procede a realizar una tabla comparativa de los fasores \vec{V}_0 , \vec{I}_0 y \vec{V}_p de 50[Hz] para δ_{min} :

Tabla 2-6: Comparación de cálculos con simulación para δ_{min}

Fasores de STATCOM	Magnitud calculada	Magnitud simulada	Ángulo calculado [°]	Ángulo simulado [°]
\vec{V}_0	1542,69[V]	1541,5[V]	$\angle -0,97$	$\angle -0,92$
\vec{I}_0	2,483[A]	2,54[A]	$\angle -135,52$	$\angle -136,54$
\vec{V}_p	1555,63[V]	1555,6[V]	$\angle -1,48$	$\angle -1,46$

Como se puede apreciar en la Tabla 2-6, los cálculos y las simulaciones tienen un error mínimo, y se logró llevar la tensión de \vec{V}_p a 1[pu] con su ángulo correspondiente. Se cierra con éxito la compensación de STATCOM para δ_{min} .

2.2.2 Compensación para $\delta=25^\circ$

Primero se muestran las formas de onda de la tensión \vec{V}_0 :

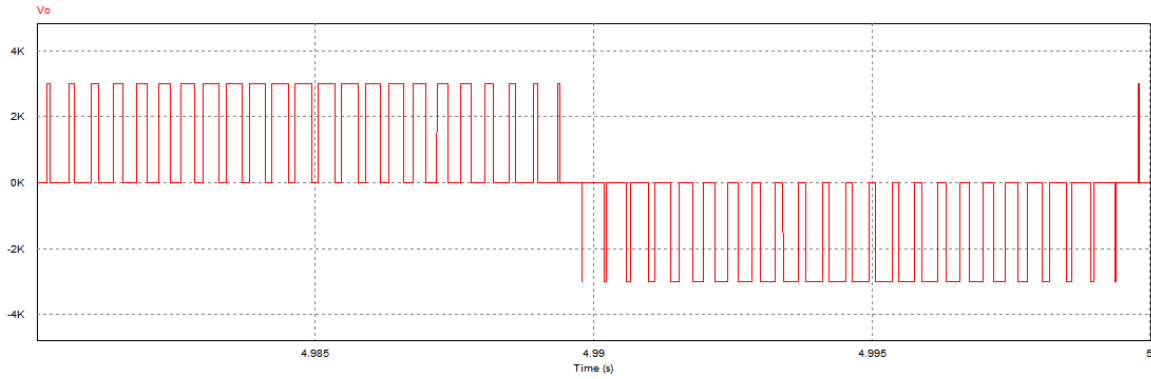


Figura 2-9: Forma de tensión \vec{V}_0 para δ_{op}

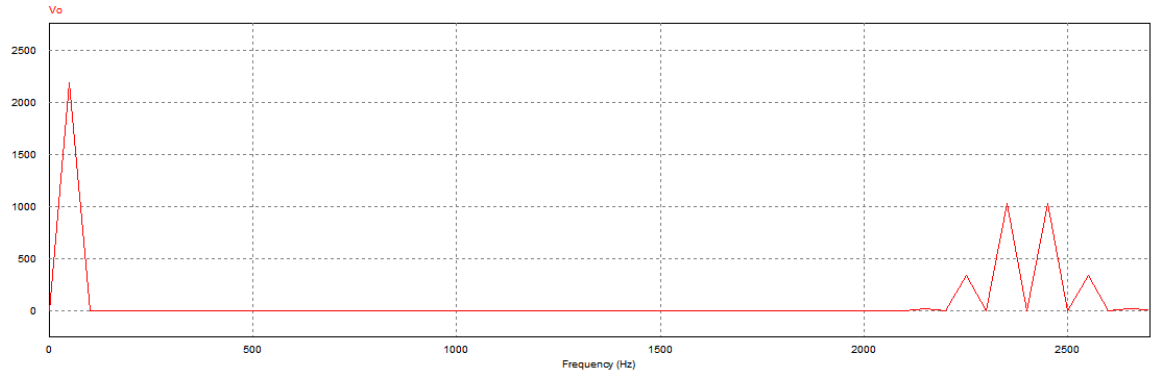


Figura 2-10: Espectro monolateral de \vec{V}_0 para δ_{op}

Tabla 2-7: Armónicos de amplitud relevante de \vec{V}_0 para δ_{op}

Frecuencia [Hz]	$ \vec{V}_0 [\text{V}]$	Ángulo de $\vec{V}_0[^\circ]$
50	2186,94	$\angle 5,62$
2250	341,04	$\angle -16,06$
2350	1034, 09	$\angle -4,85$
2450	1034,22	$\angle -173,53$
2550	340,19	$\angle -162,41$

Ahora la corriente por el STATCOM \vec{I}_0 :

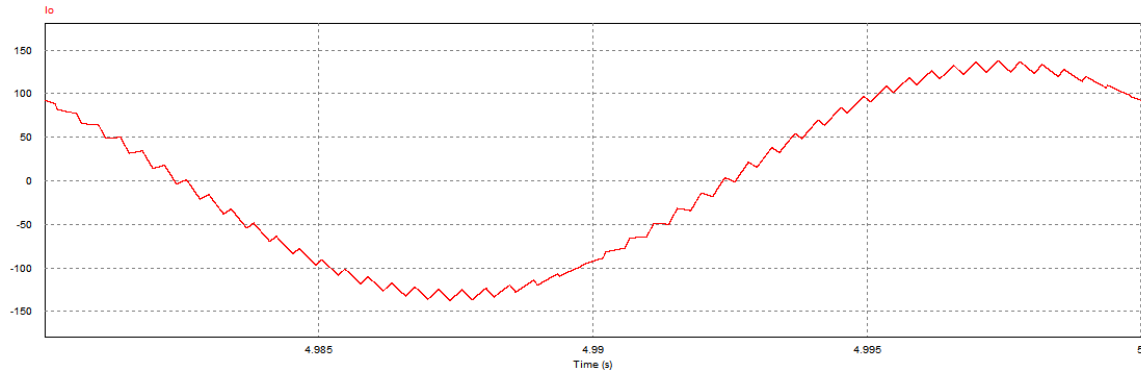


Figura 2-11: Forma de onda corriente \vec{I}_0 para δ_{op}

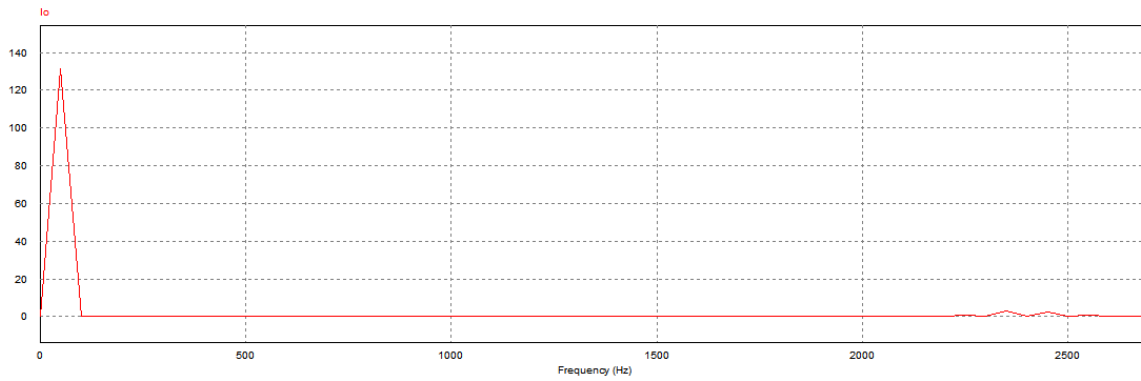


Figura 2-12: Espectro monolateral de \vec{I}_0 para δ_{op}

Tabla 2-8: Armónicos de amplitud relevante de \vec{I}_0 para δ_{op}

Frecuencia [Hz]	$ \vec{I}_0 $ [A]	Ángulo de \vec{I}_0 [°]
50	131,39	$\angle 135,52$
2250	0,98	$\angle 74,07$
2350	2,85	$\angle 85,29$
2450	2,73	$\angle -83,49$
2550	0,86	$\angle -72,28$

Finalmente las formas de onda de \vec{V}_p :

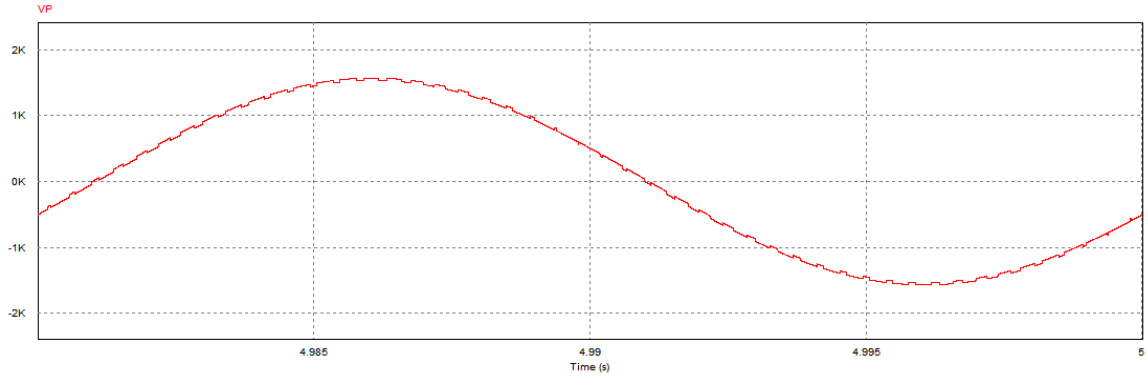


Figura 2-13: Forma de onda de \vec{V}_p para δ_{op}

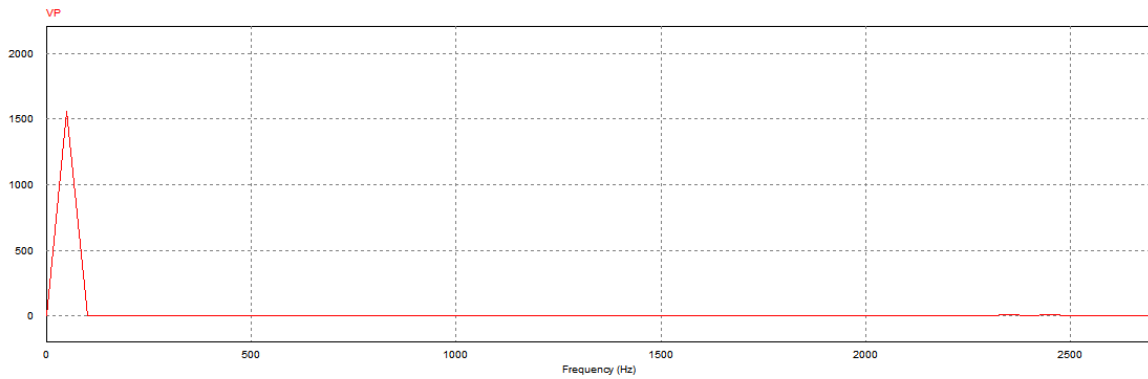


Figura 2-14: Espectro monolateral de \vec{V}_p para δ_{op}

Tabla 2-9: Armónicos de amplitud relevante de \vec{V}_p para δ_{op}

Frecuencia [Hz]	$ \vec{V}_p $ [V]	Ángulo de \vec{V}_p [°]
50	1555,63	$\angle -18,79$
2250	4,16	$\angle -18,55$
2350	12,62	$\angle -7,24$
2450	12,62	$\angle -175,83$
2550	4,15	$\angle -164,61$

Con los resultados obtenidos de las simulaciones se procede a realizar una tabla comparativa de los fasores \vec{V}_0 , \vec{I}_0 y \vec{V}_p de 50[Hz] para δ_{op} :

Tabla 2-10: Comparación de cálculos con simulación para δ_{op}

Fasores de	Magnitud	Magnitud	Ángulo	Ángulo
------------	----------	----------	--------	--------

STATCOM	calculada	simulada	calculado [°]	simulado [°]
\vec{V}_0	2187,07[V]	2186,94[V]	∠5,59	∠5,62
\vec{I}_0	131,44[A]	131,39[A]	∠135,52	∠135,52
\vec{V}_p	1555,63[V]	1555,63[V]	∠-18,81	∠-18,79

La Tabla 2-10 comparativa, deja en evidencia el mínimo error presente entre los cálculos y las simulaciones, nuevamente se logró la compensación con éxito, viendo que la tensión de \vec{V}_p es llevada a 1[pu].

2.2.3 Compensación para $\delta=35^\circ$

Para este caso se muestran las formas de onda de la tensión \vec{V}_0 :

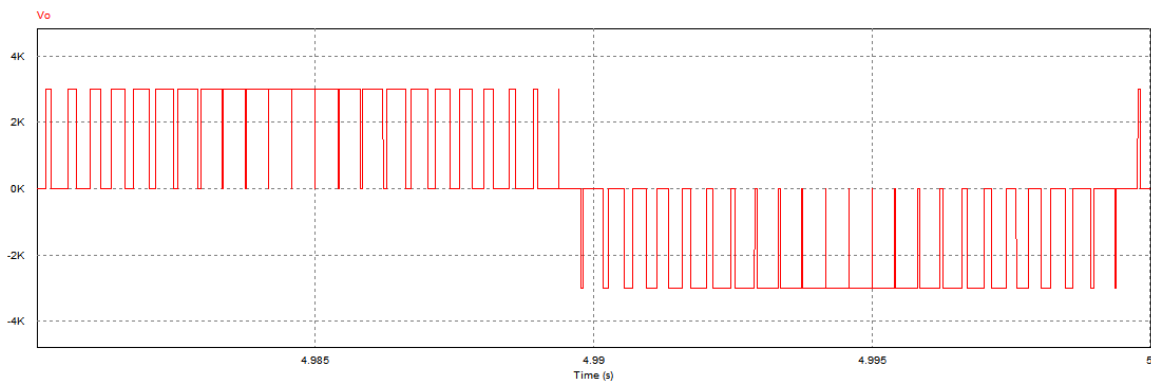


Figura 2-15: Forma de tensión \vec{V}_0 para δ_{max}

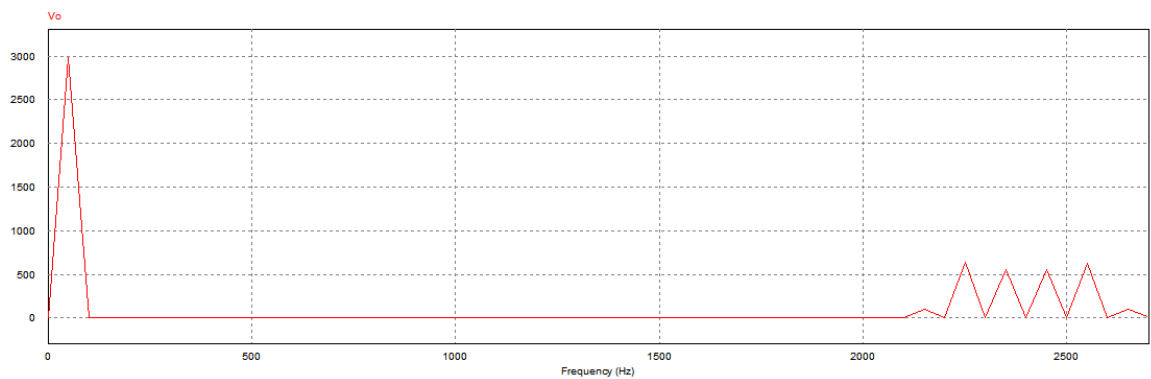


Figura 2-16: Espectro monolateral de \vec{V}_0 para δ_{max}

Tabla 2-11: Armónicos de amplitud relevante de \vec{V}_0 para δ_{max}

Frecuencia [Hz]	$ \vec{V}_0 $ [V]	Ángulo de \vec{V}_0 [°]
-----------------	-------------------	---------------------------

2 Compensación con STATCOM

50	2986,70	$\angle 9,46$
2250	633,16	$\angle -27,30$
2350	554,56	$\angle -8,63$
2450	554,19	$\angle -169,54$
2550	632,23	$\angle -150,81$

Ahora la corriente por el STATCOM \vec{I}_0 :

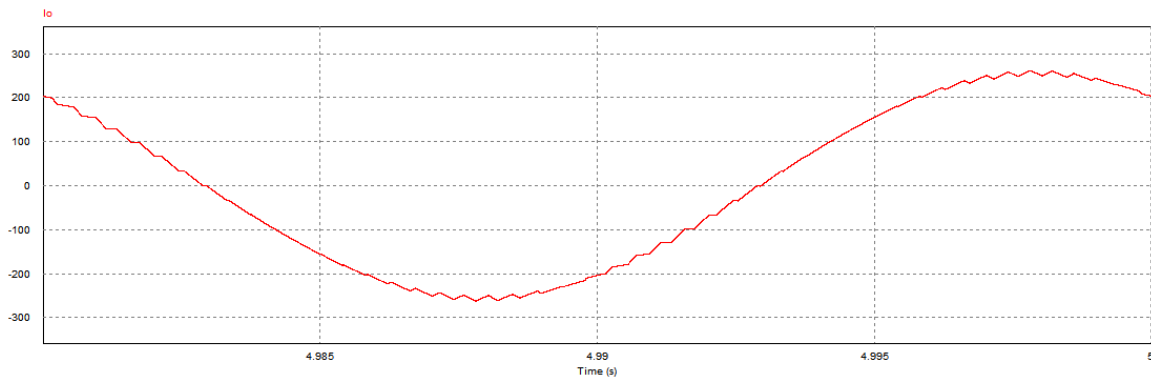


Figura 2-17: Forma de onda corriente \vec{I}_0 para δ_{max}

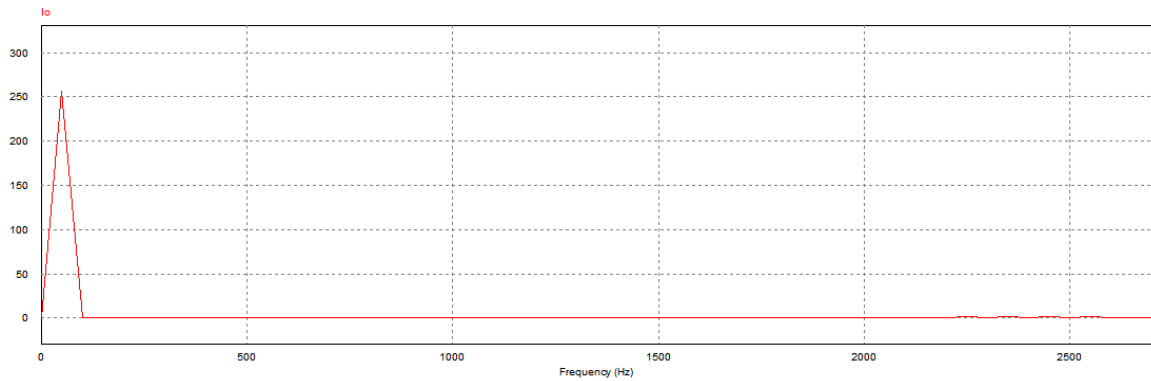


Figura 2-18: Espectro monolateral de \vec{I}_0 para δ_{max}

Tabla 2-12: Armónicos de amplitud relevante de \vec{I}_0 para δ_{max}

Frecuencia [Hz]	$ \vec{I}_0 $ [A]	Ángulo de \vec{I}_0 [°]
50	255,90	$\angle 127,37$
2250	1,82	$\angle 62,49$
2350	1,52	$\angle 81,43$

2450	1,46	$\angle -79,63$
2550	1,61	$\angle -60,71$

Finalmente las formas de onda de \vec{V}_p :

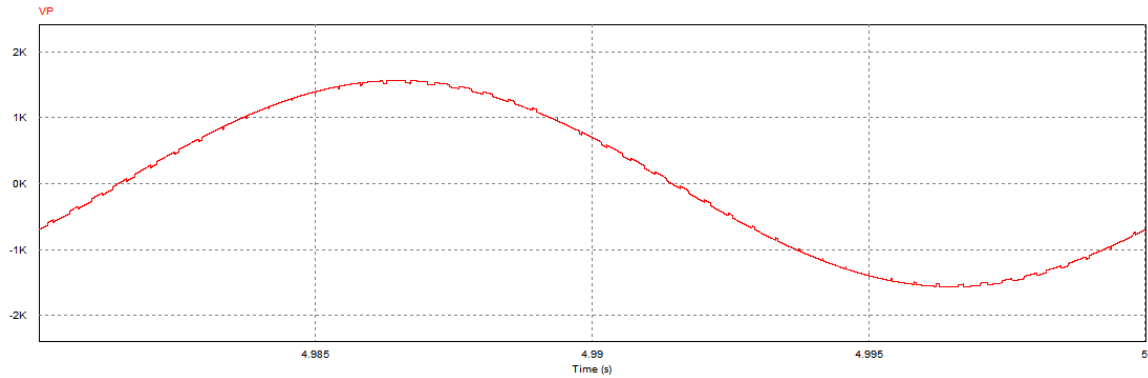


Figura 2-19: Forma de onda de \vec{V}_p para δ_{max}

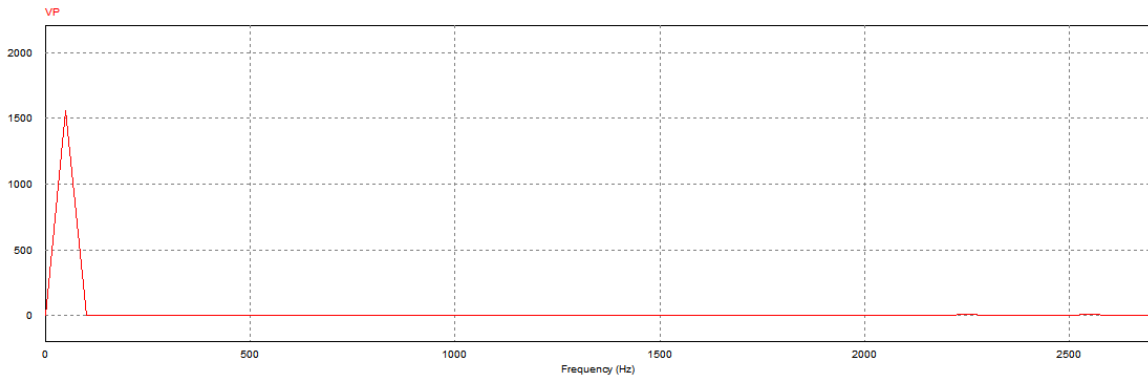


Figura 2-20: Espectro monolateral de \vec{V}_p para δ_{max}

Tabla 2-13: Armónicos de amplitud relevante de \vec{V}_p para δ_{max}

Frecuencia [Hz]	$ \vec{V}_p $ [V]	Ángulo de \vec{V}_p [°]
50	1555,65	$\angle -26,42$
2250	7,73	$\angle -29,80$
2350	6,77	$\angle -11,02$
2450	6,76	$\angle -171,83$
2550	7,72	$\angle -153,02$

Con los resultados obtenidos de las simulaciones se procede a realizar una tabla comparativa de los fasores \vec{V}_0 , \vec{I}_0 y \vec{V}_p de 50[Hz] para δ_{max} :

Tabla 2-14: Comparación de cálculos con simulación para δ_{max}

Fasores de STATCOM	Magnitud calculada	Magnitud simulada	Ángulo calculado [°]	Ángulo simulado [°]
\vec{V}_0	2987,23[V]	2986,70[V]	∠9,45	∠9,46
\vec{I}_0	255,84[A]	255,90[A]	∠127,37	∠127,37
\vec{V}_p	1555,63[V]	1555,65[V]	∠-26,44	∠-26,42

En la Tabla 2-14 se muestra que las simulaciones para la compensación con STATCOM para δ_{max} son satisfactorias, resultando mínimas diferencias entre lo calculado y lo simulado. Se puede comprobar además que la tensión de \vec{V}_p es llevada a 1[pu].

Sistema sin compensar para SSSC

Se presenta el sistema a compensar con SSSC. La compensación se realizará a la mitad de la línea y se conocen los siguientes datos:

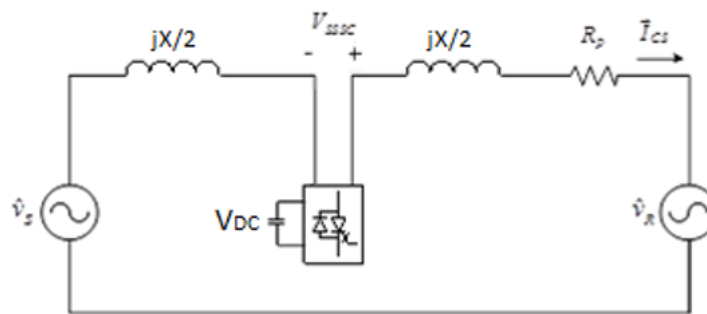


Figura 3-1: Sistema para compensación SSSC

$$\hat{V}_S = 1100_{ef} \angle 0^\circ \text{ [V]}$$

$$\hat{V}_R = 1100_{ef} \angle -\delta^\circ \text{ [V]}$$

$$R_p = 0,1 \text{ } [\Omega]$$

$$L = 5,6 \text{ [mH]}$$

$$\delta_{nom} = 20^\circ$$

$$k_{SOP} = 0,3$$

Además se sabe que:

$$f_m = 50 \text{ Hz}$$

$$f_{port} = 1200 \text{ Hz}$$

$$V_{port} = 5,5 \text{ [V]}$$

$$V_{DC} = 500 \text{ [V]}$$

$$\Delta I_{csmax} = 5\%$$

3.1 Cálculo teórico sin compensar

Se busca conocer valor de la corriente \vec{I}_{cs} que circula por el sistema sin compensar para el ángulo de carga nominal, con el fin de comparar con la posterior simulación del sistema sin compensar.

En la Figura 3-2 se presenta el circuito a utilizar para el análisis sin compensar.

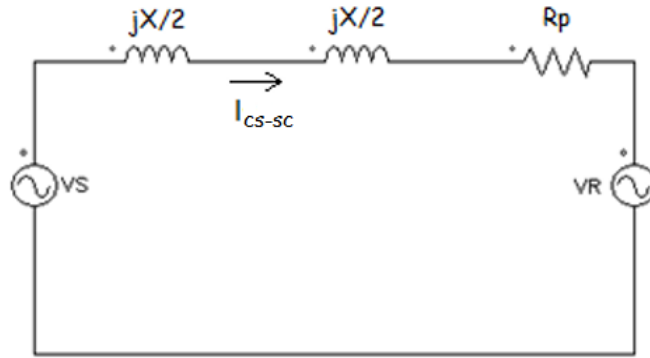


Figura 3-2: Sistema sin compensar para SSSC

Para la corriente se tiene del LVK que:

$$\vec{I}_{cs-sc} = \frac{\vec{V}_s - \vec{V}_R}{(R_p + j * X)}$$

Reemplazando los fasores de tensión:

$$\vec{I}_{cs-sc} = \frac{V(1\angle 0^\circ - 1\angle -\delta_{nom}^\circ)}{(R_p + j * X)}$$

Siendo:

$$V = 1555,635 [V_{peak}];$$

$$X_L = 2 * \pi * 50 * 0,0056 = 1,7593[\Omega]$$

$$\delta_{nom} = 20^\circ$$

$$R_p = 0,1 [\Omega]$$

La corriente sin compensar viene dada por:

$$\vec{I}_{cs-sc} = 306,596\angle -6,747^\circ [A]$$

Es importante tener noción de esta corriente, puesto que al compensar con SSSC, desde el punto de vista de la fuente, la reactancia de la línea se ve aminorada, por lo que se espera que la magnitud de esta corriente aumente y el ángulo se mantenga igual.

3.2 Simulación del sistema sin compensar

Se procede a simular el sistema para ángulo de carga nominal, se usará el software PSIM. A continuación en la Figura 3-3 se muestra el sistema en el software.

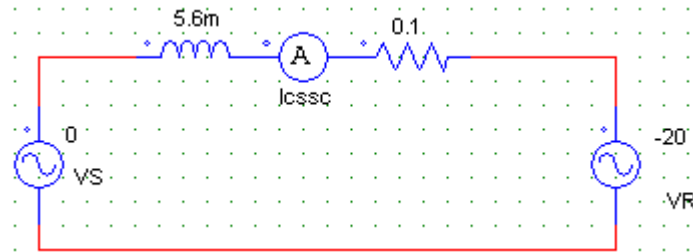


Figura 3-3: Circuito Sin compensar en PSIM

Simulando se obtuvo la forma de corriente:

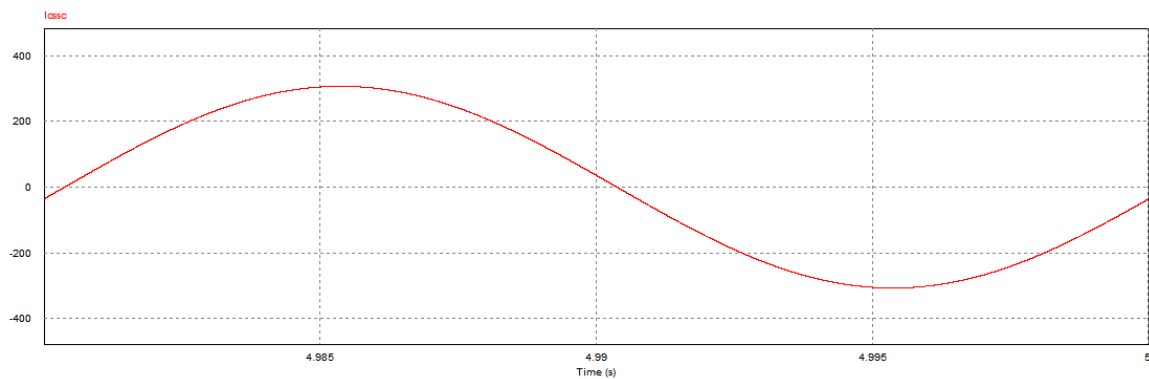


Figura 3-4: Forma de onda corriente $\overrightarrow{I_{CS-SC}}$

Como se puede apreciar la corriente es sinusoidal, al aplicar la FFT para obtener su valor de magnitud y ángulo para la fundamental se obtuvo:

Frequency	Icsc	Angle[D]_Icsc
0	6.1469626571531744e-007	0
50.002500980566701	306.59816347634768	-6.7286806458943884

Figura 3-5: FFT de la corriente sin compensar

Con los datos obtenidos se presenta la tabla comparativa:

Tabla 3-1: Comparación de Cálculos y Simulación sin compensar

$\delta [^\circ]$	$ \overrightarrow{I_{CS-SC}} $ [Apeak] Calculado	Ángulo de corriente $[^\circ]$ Calculado	$ \overrightarrow{I_{CS-SC}} $ [Apeak] Simulado	Ángulo de corriente $[^\circ]$ Simulado
20	306,596	$\angle -6,747$	306,598	$\angle -6,729$

En la tabla se muestra que lo teórico con lo simulado se corresponden, concluyendo que el análisis sin compensar fue realizado de forma satisfactoria.

Compensación con SSSC

Con el análisis del sistema sin compensar es que ahora se pasa al cálculo de parámetros del compensador SSSC (usando las ecuaciones vistas en el curso), los cálculos de la tensión y corriente del compensador y finalmente la simulación en lazo abierto y contrastación de los resultados.

4.1 Cálculo de parámetros

Primero comenzaremos calculando la corriente \vec{I}_{cs} para $\delta_{nom}=20^\circ$, para lo cual usaremos el siguiente circuito equivalente:

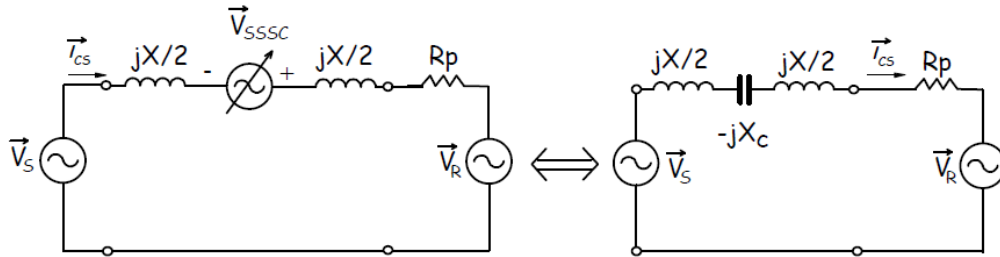


Figura 4-1: Circuito equivalente de compensación con SSSC

La tensión que produce el SSSC idealmente no debe procesar potencia activa, por lo cual esta debe ir atrasada de la corriente de línea en 90° , de forma que la tensión producida puede ser modelada como una capacitancia.

Del LVK del circuito equivalente con capacitor, se tiene que la corriente compensada viene dada por:

$$\vec{I}_{cs} = \frac{\vec{V}_s - \vec{V}_R}{R_p + j(X - X_c)}$$

Resulta además que es conocido el factor de compensación serie $ks_{op} = 0,3$, de modo que:

$$X_c = k_s * X = 0,3 * 2 * \pi * 50 * 5,6m = 0,5278[\Omega]$$

Siendo todos los valores de la expresión de corriente \vec{I}_{cs} ya conocidos se tiene que:

$$\vec{I}_{cs} = 437,27 \angle -5,36^\circ [A]$$

Antes de continuar calculando la tensión que debe entregar el inversor para lograr la compensación, se verá si resulta necesario adicionar una inductancia de acoplamiento para cumplir con la condición de ondulación de corriente $\Delta I_{csmax} = 5\%$. De forma que:

$$\Delta I_{cs} = 0,05 * |\vec{I}_{cs}| = 21,864 [A]$$

De los apuntes tenemos que la inductancia de acoplamiento viene dada por la ecuación:

$$L_o = \frac{V_{DC}}{8 * f_{port} * \Delta I_o}$$

Calculando:

$$L_o = \frac{500}{8 * 1200 * 22,864} = 2,38 [mH]$$

Para nuestro sistema ya se tiene una inductancia de línea de $5,6 [mH]$ por lo cual no es necesario adicionar L_o .

Ahora se procede con el cálculo de la tensión del inversor \vec{V}_{sssc} , del modelo equivalente tenemos que:

$$\vec{V}_{sssc} = \vec{I}_c * (-j * X_C) = 230,79 \angle -95,36^\circ [V]$$

Luego los parámetros del inversor, el índice de modulación m_i viene dado por:

$$m_i(\delta_{nom}) = \frac{|\vec{V}_{sssc}(\delta_{nom})|}{V_{DC}} = \frac{230,79}{500} = 0,46158$$

La tensión de la moduladora es entonces:

$$V_m(\delta_{nom}) = 0,46158 * 5,5 = 2,5387 [V]$$

La tensión moduladora debe llevar el mismo ángulo que el calculado para \vec{V}_{sssc} o sea $\angle -95,36^\circ$.

Al igual que para la compensación realizada con STATCOM, se tiene que se utilizará un inversor de 3 niveles, de forma que sus armónicas de mayor amplitud estarán presentes en $2m_f \pm 1$, siendo:

$$m_f = \frac{f_{port}}{f_m} = \frac{1200}{50} = 24$$

Resultando la presencia armónica en el orden 47 y 49, o bien 2350[Hz] y 2450[Hz] respectivamente.

4.2 Simulación del sistema con SSSC

Con los cálculos teóricos ya realizados, se procede a realizar las simulaciones. En la Figura 4-2 se muestra el circuito con compensador SSSC.

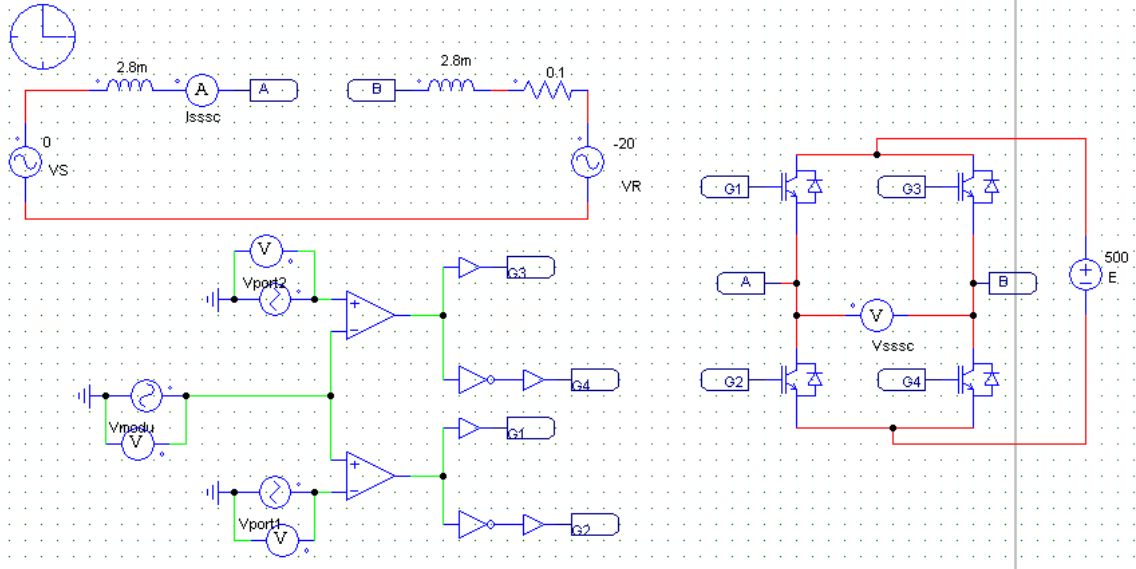


Figura 4-2: Circuito simulación compensación con SSSC en PSIM

Se procede a mostrar las formas de onda de tensión y corriente en el compensador, ambas para el ángulo de carga nominal.

Las formas de onda de la tensión por el compensador $\overrightarrow{V_{sssc}}$:

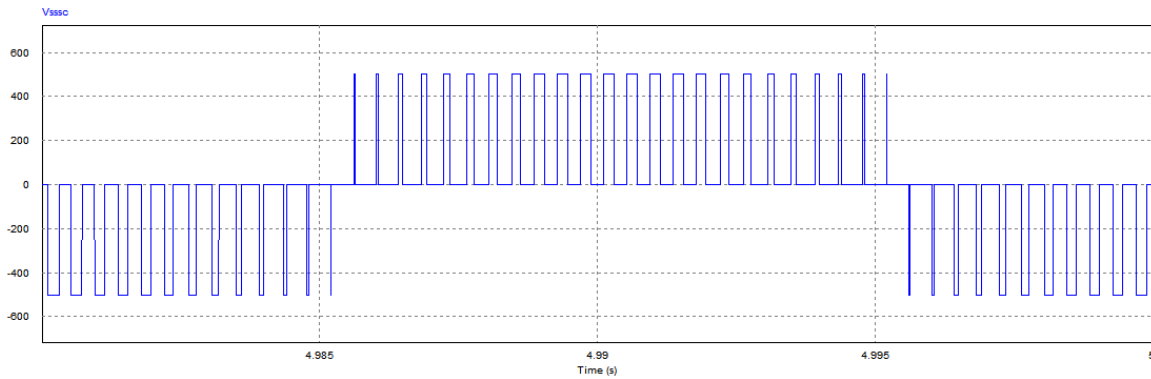
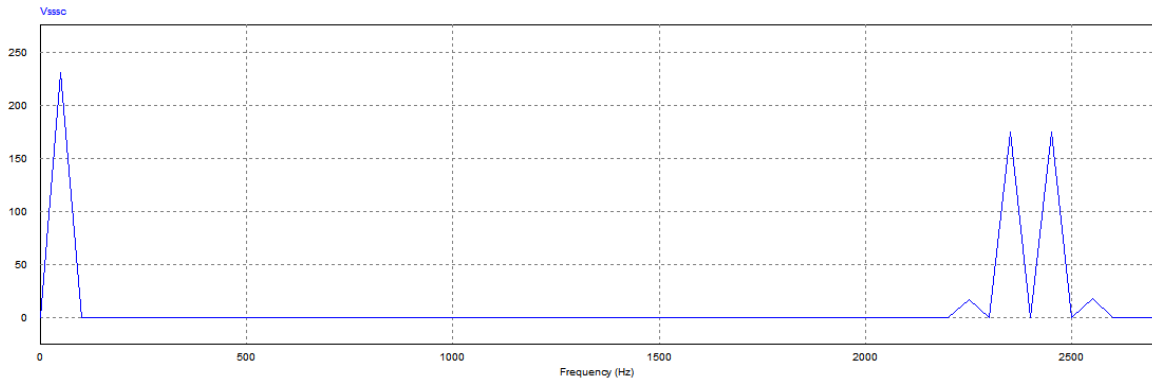
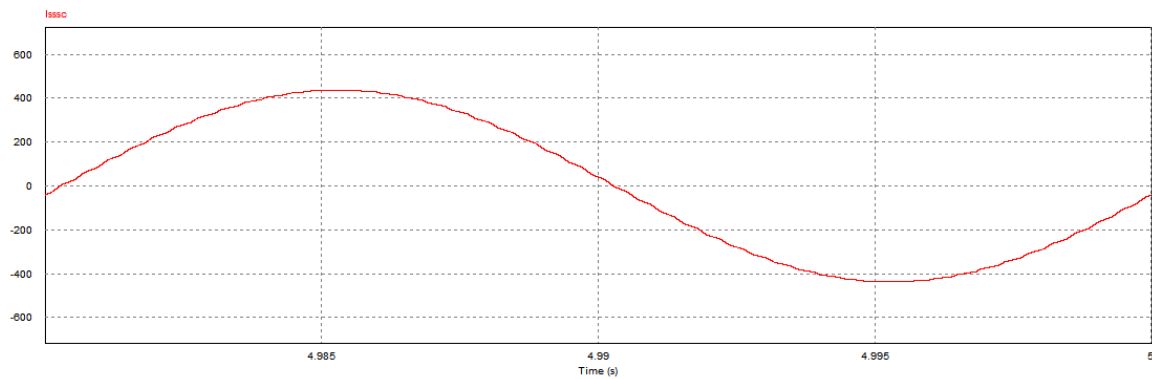


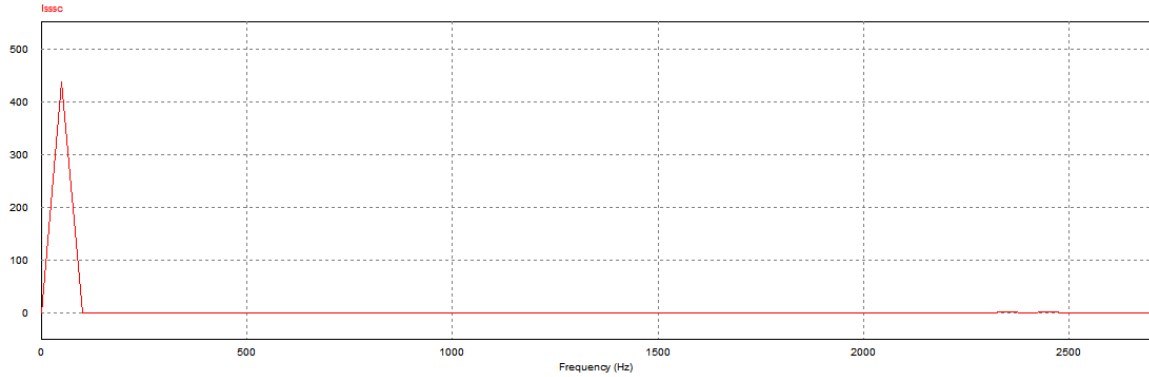
Figura 4-3: Forma de tensión $\overrightarrow{V_{sssc}}$ para δ_{nom}

Figura 4-4: Espectro monolateral de \vec{V}_{sssc} para δ_{nom} Tabla 4-1: Armónicos de amplitud relevante de \vec{V}_{sssc} para δ_{nom}

Frecuencia [Hz]	$ \vec{V}_{sssc} $ [V]	Ángulo de \vec{V}_{sssc} [°]
50	230,88	$\angle -95,38$
2250	17,7	$\angle -72,07$
2350	175,24	$\angle 96,22$
2450	175,31	$\angle 85,47$
2550	17,87	$\angle -104,03$

Ahora la corriente por el SSSC \vec{I}_{cs} :

Figura 4-5: Forma de onda corriente \vec{I}_{cs} para δ_{nom}

Figura 4-6: Espectro monolateral de \vec{I}_{cs} para δ_{nom} Tabla 4-2: Armónicos de amplitud relevante de \vec{I}_{cs} para δ_{nom}

Frecuencia [Hz]	$ \vec{I}_{cs} $ [A]	Ángulo de \vec{I}_{cs} [°]
50	437,27	$\angle -5,34$
2250	0,22	$\angle 16,96$
2350	2,12	$\angle -173,72$
2450	2,03	$\angle 175,59$
2550	0,20	$\angle -15,10$

Finalmente se presenta la tabla comparativa para contrastar lo calculado y lo simulado, correspondiente al sistema compensado con SSSC

Tabla 4-3: Comparación de simulación y cálculos para sistema compensado SSSC

Fasores de STATCOM	Magnitud calculada	Magnitud simulada	Ángulo calculado [°]	Ángulo simulado [°]
\vec{V}_{SSSC}	230,79[V]	230,88 [V]	$\angle -95,36$	$\angle -95,38$
\vec{I}_{cs}	437,27[A]	437,27 [A]	$\angle -5,36$	$\angle -5,34$

Discusión y conclusiones

En el trabajo realizado se pudo comprobar de forma satisfactoria la implementación de los compensadores en el sistema, siendo los resultados calculados y lo simulados muy similares.

Los compensadores al estar contruidos por convertidores CC-CA, es que se vuelve relevante analizar el contenido armónico asociado una vez implementados, puesto que en la mayoría de los espectros analizados había presencia de la 47 y 49 armónica. De ser filtradas estas armónicas se podría tener un aún mejor funcionamiento del sistema.

Los inversores utilizados de tipo tres niveles fueron controlados por PWM (Pulse Width Modulation), consistiendo en dos señales una moduladora sinusoidal y otra portadora triangular. Modificando los parámetros de la señal moduladora se logró generar las tensiones a la salida alterna del inversor necesarias para la compensación.

Ambos compensadores al ser estáticos no tienen inercia, por lo cual con el debido control vectorial implementado, son capaces de adaptarse rápidamente a las condiciones de trabajo.

El STATCOM puede generar o absorber reactivos, y funciona imponiendo una tensión que está asociado a una inductancia de acoplamiento, conformando una rama a conectar en el punto P, con el fin de controlar la tensión en punto. Lo cual tiene como consecuencia un aumento en la potencia real transferida al trabajar debidamente.

El SSSC permite que pase mayor corriente por la línea de transmisión, esto se logra imponiendo una tensión (tipo capacitiva) en serie con la finalidad de reducir la impedancia efectiva vista por la fuente. Como consecuencia aumenta la potencia transferida.

A Bibliografía

[1] Apuntes “Introducción a los Controladores FACTS”. Profesor Domingo Ruiz Caballero.