



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO



Diego Andrés Cisternas Herrera

Controladores FACTS Trabajo N°1

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 un cuarto de la línea de transmisión, de dos formas. Primero utilizando un compensador estático de reactivos (SVC) y luego utilizando condensador serie controlado a tiristor (TCSC). Se trabaja de forma teórica y luego se comprueba con lo simulado en el software PSIM.

Índice general

Introducción.....	1
1 Sistema sin compensar	2
1.1 Cálculo del ángulo de carga en el punto P.....	3
1.2 Simulación del sistema sin compensar.....	6
1.2.1 Simulación con $\delta=1^\circ$	6
1.2.2 Simulación con $\delta=25^\circ$	6
1.2.3 Simulación con $\delta=35^\circ$	7
1.3 Comparación de cálculos con simulación.....	8
2 Compensación con SVC.....	9
2.1 Cálculo de los parámetros.....	9
2.1.1 Cálculo de parámetro C0	11
2.1.2 Cálculo parámetro L0	11
2.2 Simulación del Sistema con SVC	11
2.2.1 Compensación para $\delta=1^\circ$	12
2.2.2 Compensación para $\delta=25^\circ$	14
2.2.3 Compensación para $\delta=35^\circ$	16
3 Compensación con TCSC	18
3.1 Cálculo de parámetros.....	18
3.1.1 Cálculo de parámetro C0	19
3.1.2 Cálculo de parámetro L0	19
3.2 Compensación para $\delta_{nom}=25^\circ$	19
Discusión y conclusiones.....	23

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 del tiristor, se crearon configuraciones de electrónica de potencia de mucha utilidad, tal y como lo es el TCR (Thyristor Controlled Reactor), el cual mediante el disparo de los tiristores en anti paralelo en serie con una inductancia, es capaz de dar origen a una inductancia variable. Adicionando un capacitor en paralelo a la rama TCR, se crea una capacitancia variable, lo cual resulta ideal para la implementación en los SEP, debido a su naturaleza dinámica y de rápida respuesta.

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 SVC y luego con TCSC, ambos compensadores están basados en la configuración de TCR en paralelo con una capacitancia, la diferencia entre ambos radica en la disposición en la implementación del sistema. Siendo el SVC conectado en 'paralelo' y el TCSC en 'serie' respecto a la línea de transmisión.

El SVC tiene la particularidad que se implementa con el objetivo de elevar la tensión en el punto de conexión. Y el TCSC reduce parcialmente la impedancia de la línea, permitiendo dar paso a mayor corriente. Ambos compensadores, valga la redundancia compensan reactivos.

1 Sistema sin compensar

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

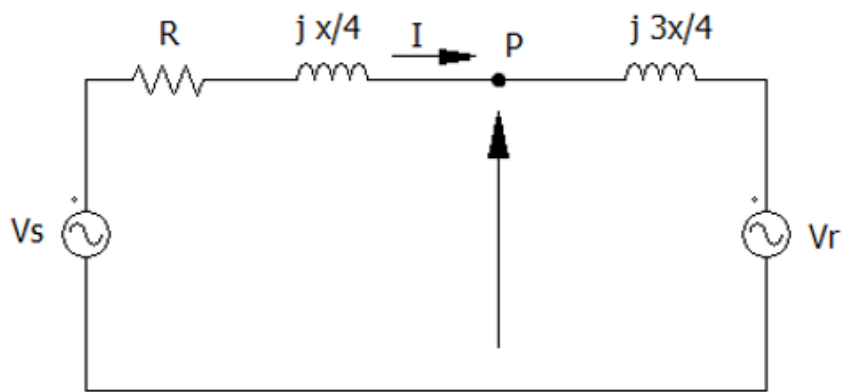


Figura 1-1: Sistema sin compensar

En la Figura 1 es mostrado el punto P que representa un punto de la línea 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 $\delta_{min} = 1^\circ$ Carga mínima $\delta_{nom} = 25^\circ$ Carga nominal

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

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

$$R = 1 \text{ [m}\Omega\text{]}$$

$$L = 1800 \text{ [}\mu\text{H}\text{]}$$

1.1 Cálculo del ángulo de carga en el punto P

Para realizar este cálculo es importante mencionar que se despreciará la resistencia, puesto que su valor es muy pequeño comparado a la reactancia de la línea. Se busca obtener una expresión de $|V_p|$ y δ_p en función del ángulo de carga.

Primero se busca una expresión de la corriente 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}_p se realiza un LVK con la fuente, obteniendo:

$$\vec{V}_s = \vec{I} * \frac{jX}{4} + \vec{V}_p$$

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

$$\vec{V}_p = V - \frac{V * \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \angle (90 - \frac{\delta}{2})}{2}$$

Resulta conveniente pasar dividiendo V, para normalizar \vec{V}_p y trabajarlo en [pu]. Si seguimos desarrollando la expresión, pasando el ángulo a su forma rectangular obtenemos:

$$\frac{\vec{V}_p}{V} = 1 - \frac{\sin\left(\frac{\delta}{2}\right) * [\cos\left(90 - \frac{\delta}{2}\right) + j\sin\left(90 - \frac{\delta}{2}\right)]}{2}$$

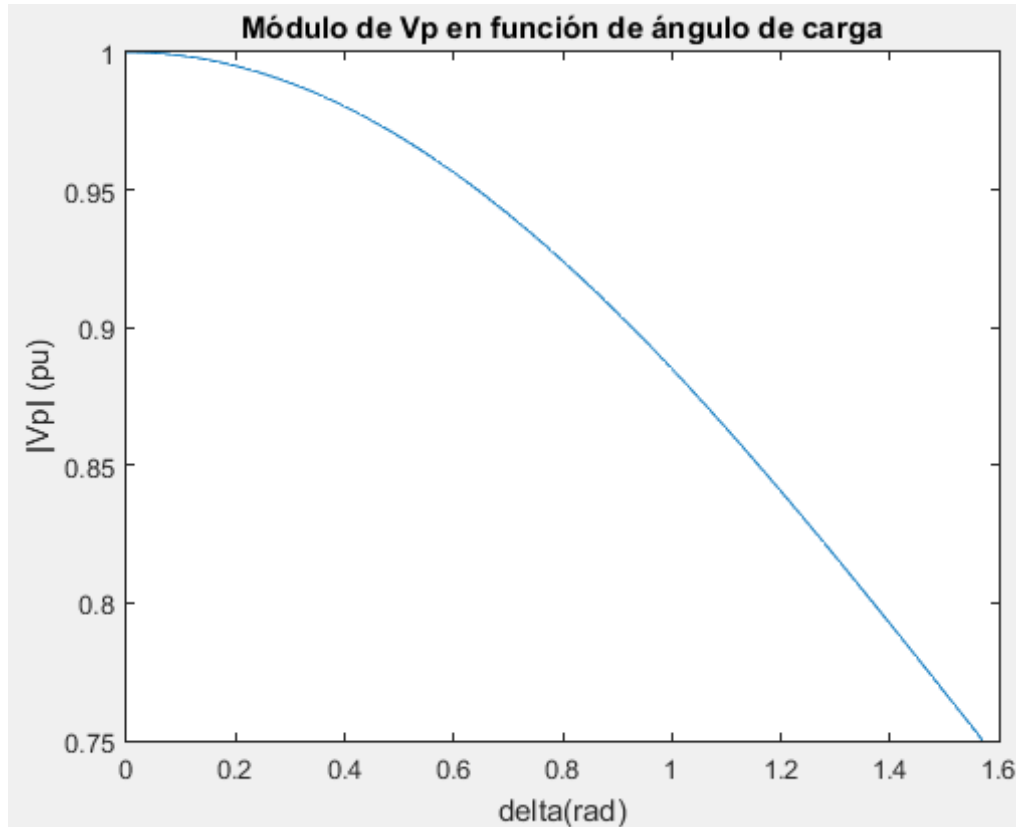
Si seguimos con el desarrollo de la expresión:

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

Haciendo uso de las identidades trigonométricas obtenemos finalmente:

$$\frac{\vec{V}_p}{V} = 1 - 2\sin^2\left(\frac{\delta}{4}\right) \cos^2\left(\frac{\delta}{4}\right) - j\left(\sin\left(\frac{\delta}{4}\right) \cos\left(\frac{\delta}{4}\right) * [\cos^2\left(\frac{\delta}{4}\right) - \sin^2\left(\frac{\delta}{4}\right)]\right)$$

Como se puede observar, la expresión obtenida es de muy difícil trabajo, por lo cual, se usará el software MATLAB para obtener los valores de interés. De forma adicional se presenta en la Figura 2 la variación del módulo de \vec{V}_p normalizado.

Figura 1-2: Gráfica módulo de V_p en función de δ

En la Figura 2 se puede observar que el comportamiento del módulo es el que se espera, puesto que si el ángulo de carga es 0° no hay circulación de corriente y V_p toma el valor de la fuente resultando ser 1[pu] y a medida que el ángulo de carga aumenta, el valor de V_p decrece.

Para los ángulos de carga de interés se presenta la siguiente Tabla 1, en la que se puede observar el módulo de V_p normalizado y su ángulo correspondiente obtenidos del software MATLAB:

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

δ [°]	$ \vec{V}_p $ [pu]	$ \vec{V}_p $ [Vpeak]	Ángulo de \vec{V}_p [°]
1	1	1555,63	-0,252
25	0,9823	1528,06	-6,177
35	0,9655	1501,89	-8,541

Cómo se puede observar los ángulos de carga en el punto P corresponden aproximadamente a un cuarto 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 3 se muestra el sistema en el software.

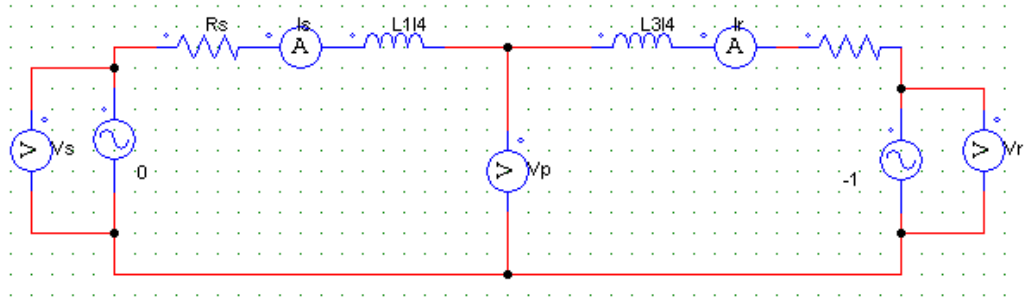


Figura 1-3: Circuito de simulación PSIM sin compensar

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 $\delta=1^\circ$

En la Figura 1-4 se muestra las formas de onda de V_s y V_p obtenidas:

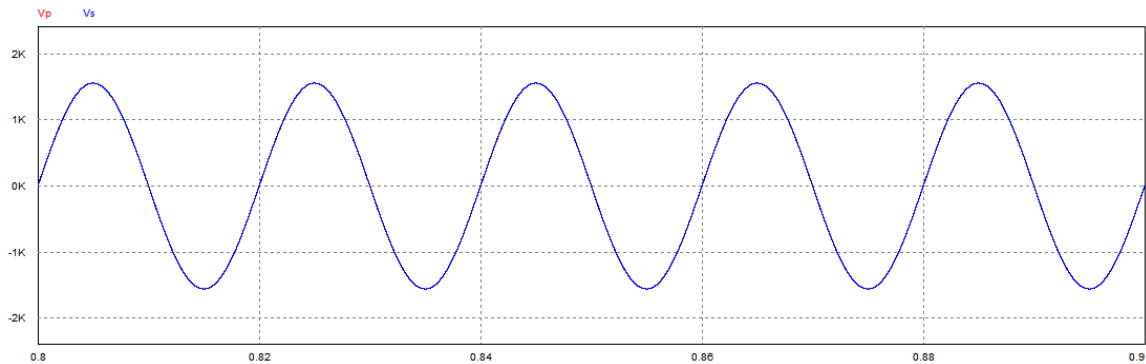


Figura 1-4: Formas de onda V_p y V_s para $\delta=1^\circ$

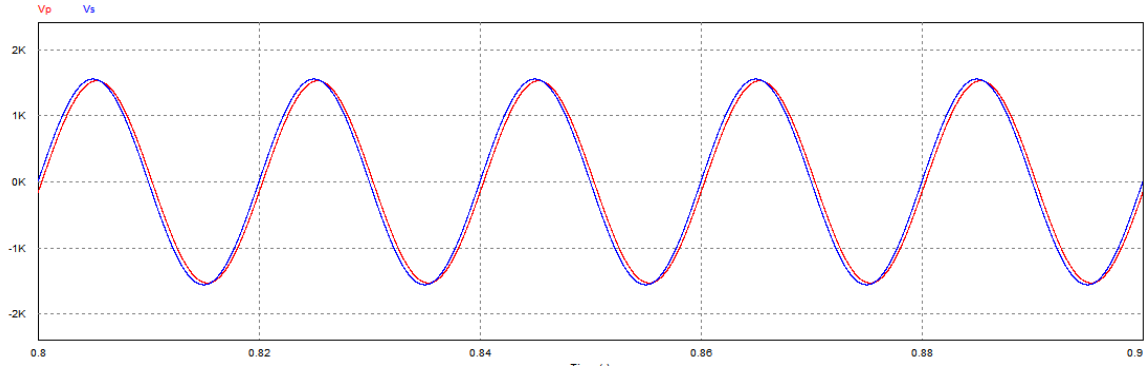
Como se puede observar, están una sobre la otra, en la Figura 1-5 se muestran los resultados de la FFT aplicada a las formas de onda.

Frequency	V_s	V_p	Angle[D] $_Vp$
0	4.6904885533442432e-006	0.00014039070722766242	0
10.000100001504288	0.012964004605362539	0.01296680947654648	178.7070563379244
20.000200003008576	0.029632129747936505	0.029632871046516664	179.35614530432593
30.000300004512866	0.05833890183470921	0.058338293885501651	179.5737533048421
40.000400006017152	0.13828984248428133	0.13828668608922876	179.68346234288848
50.000500007521438	1555.6504700308833	1555.606031799236	-0.24998973822055168

Figura 1-5: Resultados de FFT para $\delta=1^\circ$

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

En la Figura 1-6 se muestra las formas de onda de V_s y V_p obtenidas:

Figura 1-6: Formas de onda Vp y Vs para $\delta=25^\circ$

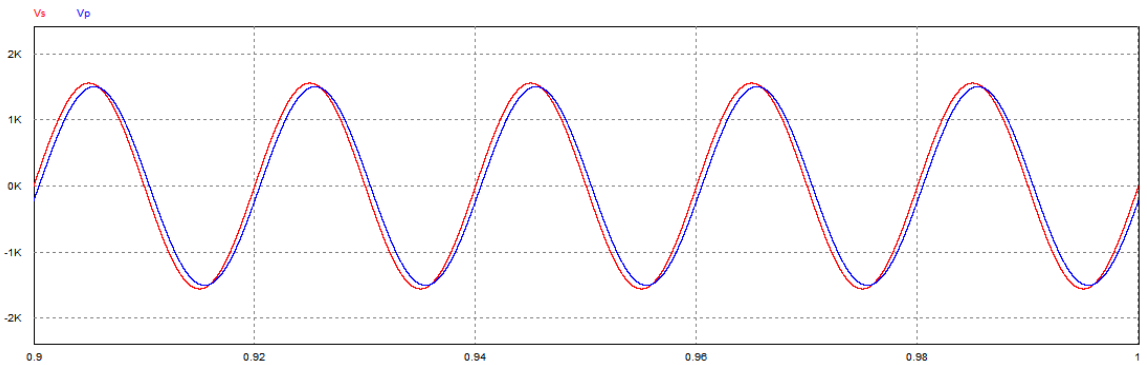
En estas formas de onda ya se puede apreciar el desfase que existe entre la fuente Vs y la tensión Vp, en la Figura 1-7 se muestra n los resultados de la FFT aplicada a las formas de onda.

Frequency	Vs	Vp	Angle[D]_Vp
0	0.00014572893346463968	0.0031037424328118255	0
10.000100001504288	0.012966662911219024	0.014401376958569209	151.56252761479342
20.000200003008576	0.029633442393213073	0.029981893784988407	164.84870795552101
30.000300004512866	0.058339749285744924	0.057893903765376453	169.76963771759054
40.000400006017152	0.13829041031393319	0.136281969583844	172.29447448486397
50.000500007521438	1555.6493544355569	1528.0757630458204	-6.1746087636165523

Figura 1-7: Resultados de FFT para $\delta=25^\circ$

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

En la Figura 1-8 se muestra las formas de onda de Vs y Vp obtenidas:

Figura 1-8: Formas de onda Vp y Vs para $\delta=35^\circ$

Se puede observar ahora que están un poco más desfasadas, a continuación se muestra en la Figura 1-9 los resultados de la FFT para las formas de onda.

Frequency	Vs	Vp	Angle[D]_Vp
0	0.00028653331164167953	0.0041018242441867156	0
10.000100001504288	0.01296915652822515	0.015489804377914517	143.08370598345275
20.000200003008576	0.029634683095817505	0.030227073113133631	159.40674939953593
30.000300004512866	0.058340566120101224	0.057423942070251553	165.93891666299589
40.000400006017152	0.1382909976799826	0.134347072050084	169.36398637055228
50.000500007521438	1555.6489382271502	1501.9712334892276	-8.5409081286050803

Figura 1-9: 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

δ [°]	\vec{V}_p [Vpeak] Calculado	δ_p [°] Calculado	\vec{V}_p [Vpeak] Simulado	δ_p [°] Simulado
1	1555,63	-0,252	1555,61	-0,249
25	1528,06	-6,177	1528,07	-6,175
35	1501,89	-8,541	1501,97	-8,5409

Como se apreciar al contrastar los resultados obtenidos, estos presentan un error mínimo, por lo que podemos concluir que se ha realizado el análisis sin compensar de forma satisfactoria.

Compensación con SVC

Ahora se busca compensar reactivos con el uso de Static Var Compensation (SVC), 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

Lo primero que necesitaremos es encontrar una ecuación de proyecto para la capacitancia equivalente (C_{eq}) del SVC. En la Figura 2-1 se muestra el circuito del compensador y su representación equivalente. Constructivamente el compensador está compuesto por una rama TCR en paralelo con la capacitancia C_0 , y se conecta entre el punto P y el neutro.

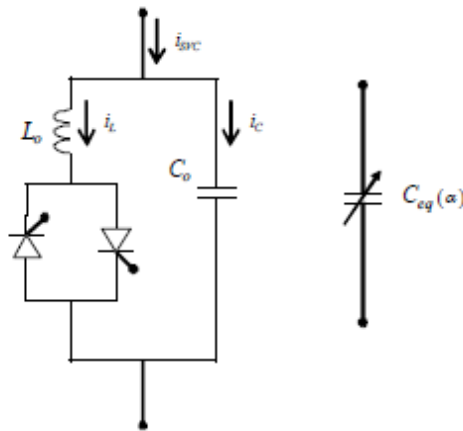


Figura 2-1: Circuito equivalente SVC y su representación equivalente

Para obtener la ecuación deseada, se presenta en la Figura 2-2 el circuito equivalente a usar para plantear las ecuaciones, se despreciará la parte resistiva por tener una magnitud despreciable comparada a la reactancia.

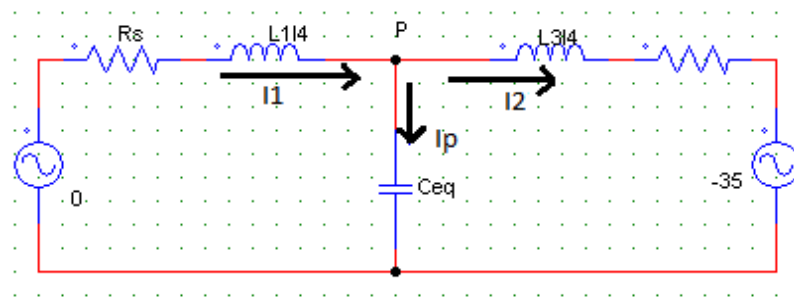


Figura 2-2: Circuito con SVC representado por C_{eq}

A continuación se plantearán una serie de ecuaciones a partir de la Figura 2-2. Primero se define la ecuación de tensión para V_p .

$$\vec{V}_p = I_p * (-jX_{ceq})$$

Luego se define las ecuaciones para las corrientes I1 e I2:

$$I_1 = \frac{\vec{V}_s - \vec{V}_p}{jX_L/4} ; \quad I_2 = \frac{\vec{V}_p - \vec{V}_r}{j3X_L/4}$$

A partir del LCK se tiene que:

$$I_p = I_1 - I_2$$

Reemplazando por las expresiones de I1 e I2:

$$I_p = \frac{3 * 4(\vec{V}_s - \vec{V}_p) - 4(\vec{V}_p - \vec{V}_r)}{3 * jX_L}$$

Si multiplicamos a ambos lados de la ecuación por $(-jX_{ceq})$:

$$\vec{V}_p = -\frac{(12\vec{V}_s + 4\vec{V}_r - 16\vec{V}_p)}{3X_L} * X_{ceq}$$

Se reemplaza $X_{ceq} = \frac{1}{\omega * Ceq}$ y $X_L = \omega * L$, se despeja Ceq:

$$Ceq = \frac{16\vec{V}_p - 4\vec{V}_r - 12\vec{V}_s}{3V_p * \omega^2 * L}$$

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

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

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

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

Finalmente al despejar Ceq en función de δ :

$$Ceq(\delta) = \frac{16 - \left(12\angle\frac{\delta}{4}\right) - \left(4\angle-\frac{3\delta}{4}\right)}{3 * \omega^2 * L}$$

Es importante notar que la ecuación de proyecto a utilizar está en función de números complejos, por lo cual, se debe calcular de forma polar preferentemente y luego solo usar el módulo para encontrar los valores de capacitancia deseados.

2.1.1 Cálculo de parámetro C_0

Teniendo la ecuación para proyectar, se obtiene C_0 , la capacitancia constructiva del SVC, para $\delta_{MAX} = 35^\circ$, debido a que cuando se está en la condición de carga máxima el SVC debe compensar la posible mayor potencia reactiva, bloqueando los tiristores y dejando camino a la corriente solo por C_0 .

Con ω y L :

$$\omega = 2 * \pi * 50 \left[\frac{rad}{seg} \right]$$

$$L = 1800 [\mu H]$$

Luego:

$$C_0 = Ceq(35^\circ) = 1,0414 [mF]$$

2.1.2 Cálculo parámetro L_0

Para este cálculo se debe elegir un ángulo de disparo que haga resonar C_0 con L_0 para la frecuencia fundamental el cual debe estar entre $\pi/2 < \alpha < \pi$.

Como el SVC en el sistema netamente inductivo, solo se va a comportar en su Zona Capacitiva, se elige $\alpha_0 = \alpha_{min} = \pi/2$.

Luego L_0 se obtiene de la expresión de la inductancia equivalente de la rama TCR del SVC, evaluada en α_0 , la cual se presenta a continuación:

$$Leq_{TCR}(\alpha_0) = \frac{\pi * L_0}{2(\pi - \alpha_0) - \sin(2(\pi - \alpha_0))} = L_0$$

Finalmente tenemos la ecuación de resonancia como:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 * C_0}}$$

Resultando:

$$L_0 = \frac{1}{C_0 * (2 * \pi * 50)^2} = 9,7293 [mH]$$

2.2 Simulación del Sistema con SVC

Ya con los parámetros constructivos del SVC se procede a simular el circuito para los ángulos de carga de interés, 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 rama TCR del SVC, es que aparece ahora en el circuito la presencia armónica.

Para los distintos grados de carga se tendrá que obtener el ángulo de disparo para los tiristores, es importante notar que este ángulo de disparo debe llevar el desfase del punto de conexión P, lo cual quiere decir que debemos sumarle $\frac{\delta}{4}$.

Se muestra en la Figura 2-3 el circuito a simular en el software PSIM para compensar con el SVC.

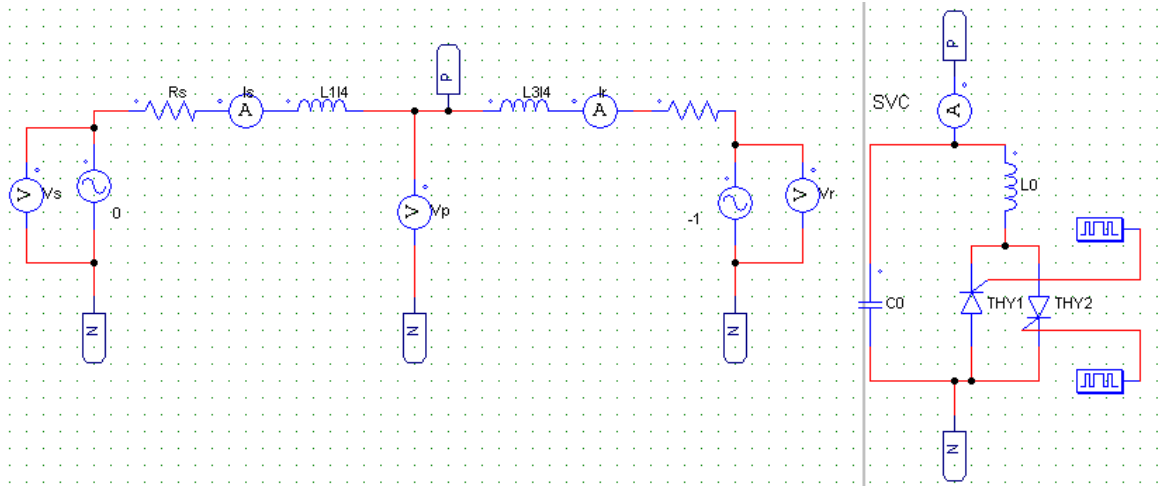


Figura 2-3 Simulación de sistema con SVC en PSIM

2.2.1 Compensación para $\delta=1^\circ$

Para esta situación, se tiene que la tensión en el punto P, es prácticamente 1 [pu] por lo cual el SVC debe encontrarse en resonancia. El ángulo de resonancia ya fue definido como $\alpha_0 = \pi/2$ por lo cual el ángulo de disparo del tiristor α_d viene dado por:

$$\alpha_d = 90^\circ + 0,25^\circ = 90,25^\circ$$

En la Figura 2-4 se muestran las formas de onda de tensión Vs y Vp:

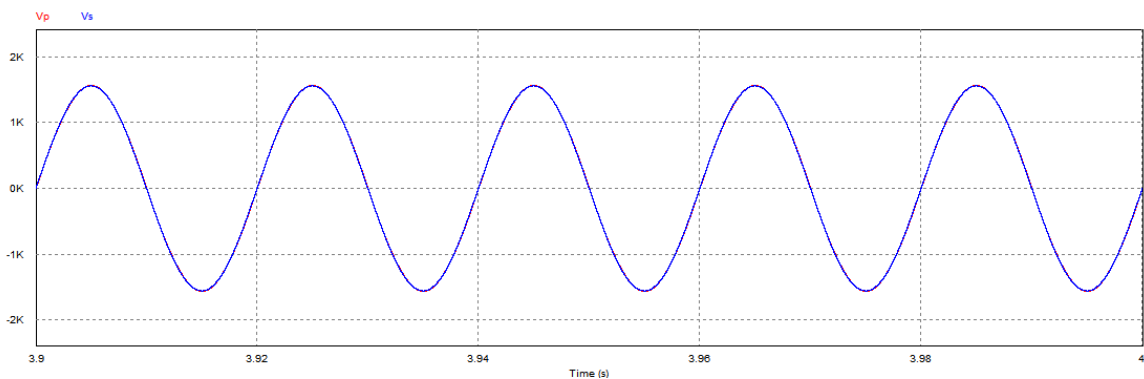


Figura 2-4: Tensiones de Vs y Vp compensación SVC para $\delta=1^\circ$

Luego se hace uso de la FFT para poder ver numéricamente lo que está sucediendo en la frecuencia fundamental.

Frequency	Vs	Vp	Angle[D]_Vp
0	4.87522825752174e-006	0.00013609304741868855	0
10.000100020123368	0.012965208154024171	0.012989414262645009	178.7206617673765
20.000200040246735	0.02963488655505948	0.029682555926145816	179.35137879951694
30.000300060370101	0.058344331981109429	0.058401489781245777	179.59788329044301
40.000400080493471	0.13830271579705131	0.1384267735266678	179.68831376765502
50.00050010061684	1555.6504714526282	1556.4955905388442	-0.25009196766701919

Figura 2-5: FFT de Vs y Vp para frecuencia fundamental para $\delta=1^\circ$

En la Figura 2-5 podemos ver que para la frecuencia fundamental, las magnitudes de Vs y Vp presentan una diferencia mínima de 0,15[V], además, se muestra el ángulo de Vp que corresponde satisfactoriamente a $-0,25^\circ$.

Finalmente, se considera relevante observar el espectro monolateral de la corriente del SVC, la cual se muestra en la Figura 2-6 y 2-7.

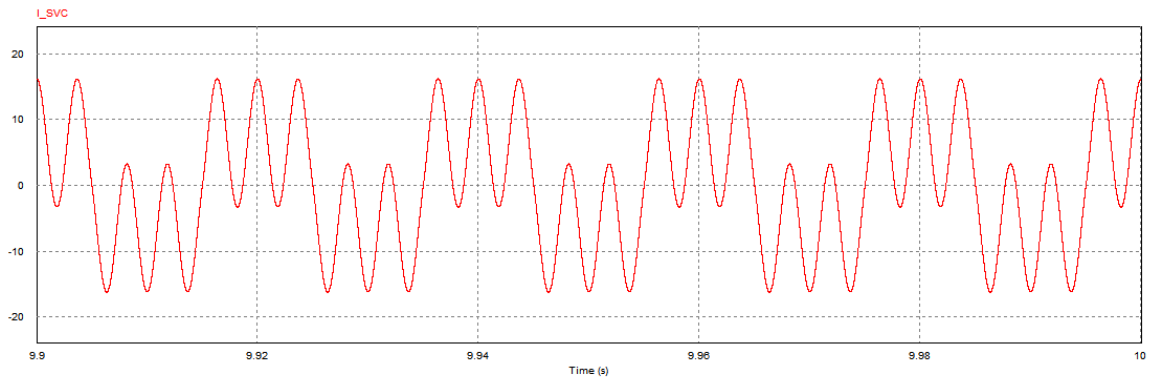


Figura 2-6: Corriente SVC para $\delta=1^\circ$

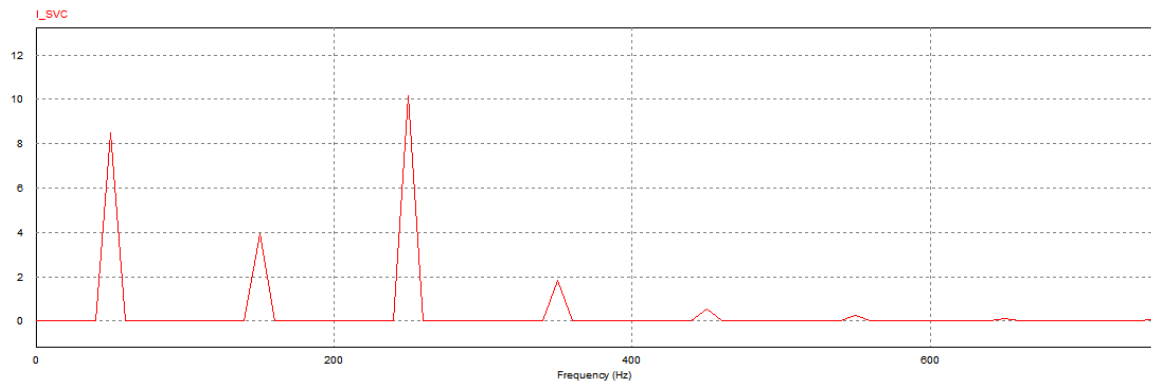


Figura 2-7: Espectro monolateral de la corriente SVC para $\delta=1^\circ$

Como se puede apreciar en el espectro de la corriente, la corriente fundamental, que idealmente debería ser cero, presenta una magnitud de bajo valor cercano a 8[A]. Y se puede observar que estamos en presencia de más armónicas, siendo la más importante la 5ta. Con una magnitud cercana a 10[A].

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

Lo primero es encontrar el ángulo de disparo de los tiristores para esta situación, se procede entonces a evaluar el ángulo $\delta=25^\circ$ en la ecuación de proyecto. Resultando:

$$Ceq(25^\circ) = \frac{16 - \left(12 \angle \frac{25^\circ}{4}\right) - \left(4 \angle -\frac{3 \cdot 25^\circ}{4}\right)}{3 \cdot \omega^2 \cdot L} = 0,534[mF]$$

De los apuntes del curso, obtenemos la expresión normalizada de capacitancia la cual es:

$$\bar{C}(\alpha_{op}) = [C_0 - Ceq(\delta_{op})] \cdot \omega^2 \cdot L_0$$

Usando los valores ya calculados se obtiene:

$$\bar{C}(\alpha_{op}) = 0,487588[pu]$$

Luego se tiene que la capacitancia normalizada en función de α corresponde a:

$$\bar{C}(\alpha_{op}) = \frac{2 \cdot (\pi - \alpha_{op}) + \sin(2 \cdot \alpha_{op})}{\pi}$$

Para encontrar el ángulo de disparo solo basta con resolver la ecuación, para lo cual se trabaja con MATLAB, y se obtiene:

$$\alpha_{op} = 114,5^\circ$$

Entonces el ángulo de disparo para $\delta=25^\circ$:

$$\alpha_d = 114,5^\circ + \frac{25^\circ}{4} = 120,75^\circ$$

Teniendo el ángulo de disparo se procede a simular. En la Figura 2-7 se muestran las formas de onda de Vs y Vp:

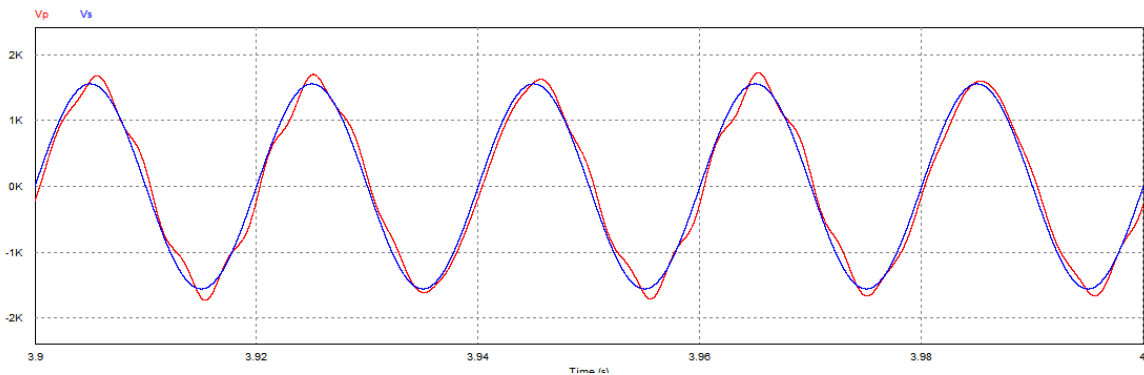


Figura 2-8: Tensiones de Vs y Vp compensación SVC para $\delta=25^\circ$

En esta Figura 2-8 ya se puede notar el desfase entre Vp y Vs. Usando la FFT, obtenemos para la componente fundamental.

Frequency	Vs	Vp	Angle[D]_Vp
0	2.3065500869672933e-005	0.34496878280110965	0
10.000100020123368	0.012965835709324931	0.68003166125957593	-92.737904675788315
20.000200040246735	0.029635528330733556	0.70118562290028974	-95.673531051204876
30.000300060370101	0.058342800096199576	0.54393699003391371	-102.30080053807617
40.000400080493471	0.13830261812084885	0.68480489468371375	-108.34326971955248
50.00050010061684	1555.6493344975502	1556.4549925907738	-6.2024394490148573

Figura 2-9: FFT de Vs y Vp para frecuencia fundamental para $\delta=25^\circ$

La Figura 2-9 deja en evidencia para la frecuencia fundamental, que la diferencia de Vs y Vp es tan solo 0,85[V]. También se puede observar que el ángulo de Vp es $-6,2^\circ$ muy cercano a lo esperado que corresponde a $-6,25^\circ$. Se puede concluir que se realiza la compensación de manera satisfactoria.

Finalmente se da paso a observar el espectro monolateral de la corriente del SVC para esta condición, la cual se presenta en la Figura 2-10 y 2-11.

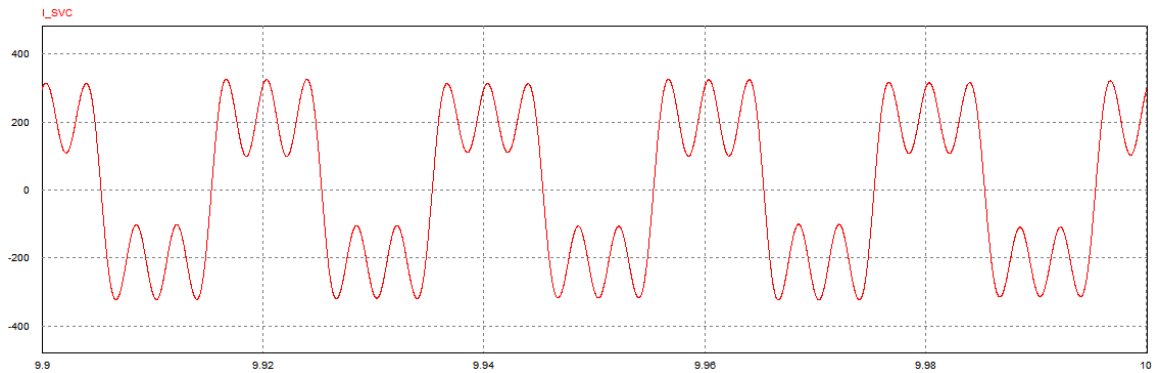


Figura 2-10: Corriente SVC para $\delta=25^\circ$

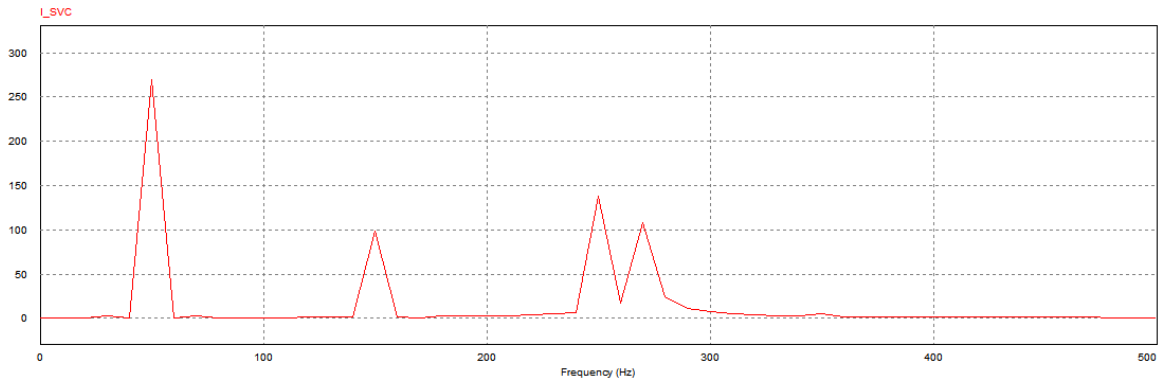


Figura 2-11: Espectro monolateral de la corriente SVC para $\delta=25^\circ$

En el espectro podemos apreciar que se tiene contenido armónico provocado por el disparo de los tiristores de la rama TCR del SVC. La componente fundamental alcanza una amplitud de corriente cercana a los 270[A] y la armónica más relevante observada nuevamente corresponde a la 5ta con una amplitud aproximada de 130[A].

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

Para este último caso, que es el de carga máxima, ya se sabe que el SVC debe estar compensando la máxima cantidad de Reactivos, por lo cual la rama TCR debe estar bloqueada, o sea que:

$$\alpha_{OP} = 180^\circ$$

Luego el ángulo de disparo corresponde a:

$$\alpha_d = 180^\circ + \frac{35^\circ}{4} = 188,75^\circ$$

Se procede a simular, en la Figura 2-12 se muestran las formas de onda de Vs y Vp:

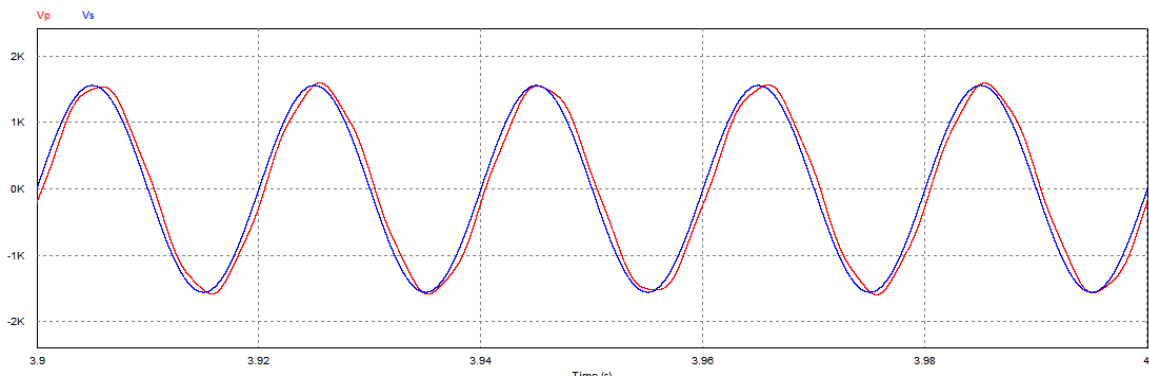


Figura 2-12: Tensiones de Vs y Vp compensación SVC para $\delta=35^\circ$

Aplicando la TFF se obtiene para la frecuencia fundamental:

Frequency	Vs	Vp	Angle[D]_Vp
0	4.9987418464637793e-005	0.21636432276594278	0
10.000100020123368	0.012966186244876533	0.40546529364798856	-91.002906168557558
20.000200040246735	0.029635382971277824	0.40614411910687986	-92.462011103009999
30.000300060370101	0.058344657946786144	0.40721173077448874	-95.591094395503021
40.000400080493471	0.13830290054047087	0.41375327391701422	-105.77074743240802
50.00050010061684	1555.6488839192589	1555.6162758213716	-8.5600188015258771

Figura 2-13: FFT de Vs y Vp para frecuencia fundamental para $\delta=35^\circ$

Se puede comprobar que la diferencia entre las tensiones Vs y Vp es ínfima siendo 0,03[V]. Y el ángulo de Vp es $-8,56^\circ$, muy cercano al esperado de $-8,75^\circ$. Se concluye que se compensa de forma exitosa para esta última condición.

En la Figura 2-14 y 2-15 se muestra el espectro monolateral de corriente por el SVC.

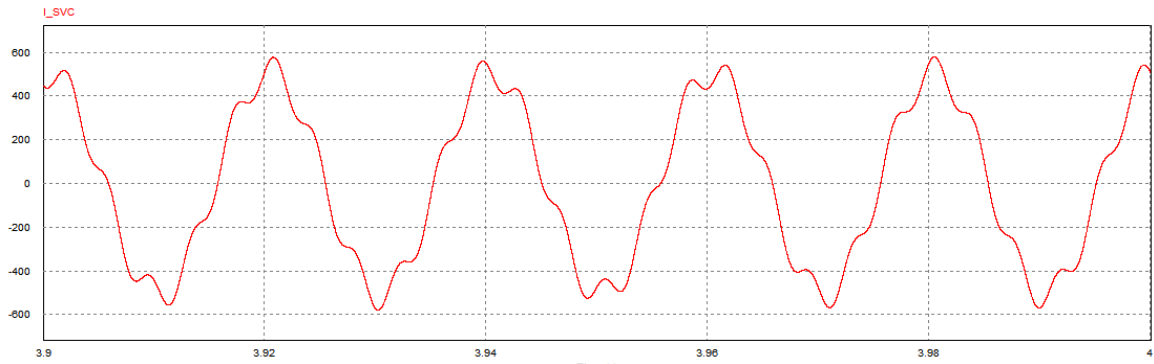


Figura 2-14: Corriente SVC para $\delta=35^\circ$

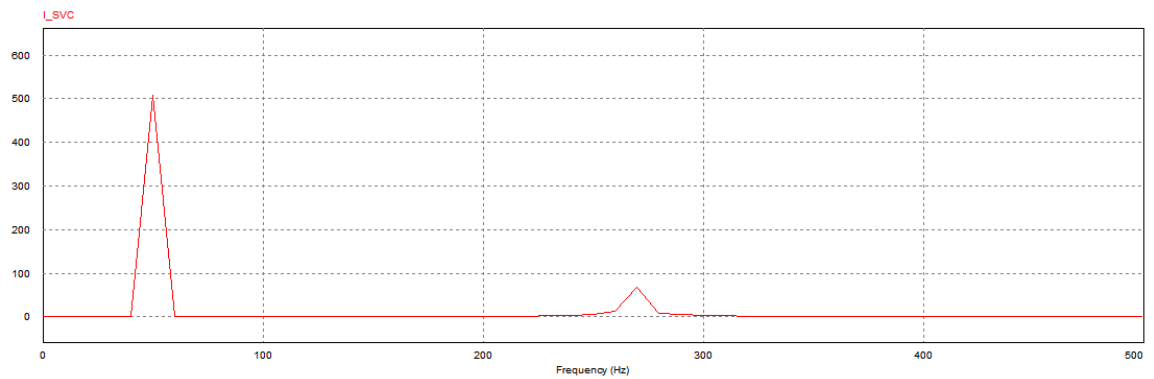


Figura 2-15: Espectro monolateral de la corriente SVC para $\delta=35^\circ$

Del espectro se puede decir que prácticamente la corriente solo tiene la componente fundamental con una amplitud aproximada de 500[A]. Y se puede observar que aparece una armónica en aproximadamente en 270[Hz] (como una 5ta armónica desplazada), de una amplitud aproximada de 70[A].

Compensación con TCSC

Finalmente se da paso a compensar reactivos mediante Thyristor-Controlled Series Capacitor (TCSC), para lo cual en primera instancia se calcularán los parámetros del compensador y luego se procederá a simular en lazo abierto solo para el grado de carga nominal.

Para este caso se realizarán las siguientes consideraciones:

$$L = 20[mH]$$

$$k_{S_{OP}} = 0,25$$

$$k_{S_{MIN}} = 0,15$$

$$\lambda = 2,1$$

$$R = 10[m\Omega] \text{ *se aumenta la resistencia para que la simulación pueda converger más rápido*}$$

Se define k_s como el factor de compensación serie y se define como: $k_s = \frac{X_{TCSC}}{X_{Linea}}$.

Por otra parte se define λ como el cociente de la frecuencia resonante de los parámetros C_0 y L_0 y

$$\text{la frecuencia de la red, o bien: } \lambda = \sqrt{\frac{X_{C0}}{X_{L0}}}$$

Es importante mencionar que se aumenta la inductancia de la línea, con la intención de mantener la corriente fija en esta. Previamente en el análisis sin compensar se obtuvo la expresión de corriente:

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

$$\text{Siendo: } V = 1555,635[V_{peak}] \text{ ; } X_L = 2 * \pi * 50 * 0,02 = 6,283[\Omega] \text{ ; } \delta_{nom} = 25^\circ$$

La expresión de corriente sin compensar viene dada por:

$$\vec{I}_{SC} = 107,175 \angle -12,5^\circ [A]$$

Es importante tener noción de esta corriente, puesto que al compensar con TCSC, 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.

3.1 Cálculo de parámetros

El compensador a utilizar constructivamente es igual al SVC, pero su disposición dentro del circuito es distinta, puesto va conectado en serie. Desde el punto de vista de los terminales del compensador, al igual que en el SVC, el TCSC se comporta como una capacitancia variable.

Las ecuaciones a utilizar para el cálculo de los parámetros constructivos del TCSC son obtenidas de los apuntes del curso y nos permitirán calcular C_0 y L_0 de la Figura 3-1.

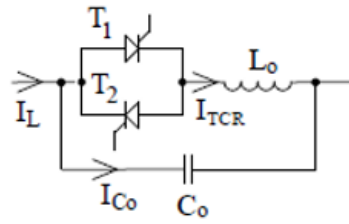


Figura 3-1: Circuito del compensador TCSC

3.1.1 Cálculo de parámetro C_0

Como el TCSC es el dual del SVC, se calcula C_0 para mínima demanda, o bien para $ks_{MIN} = 0,15$. Luego de los apuntes:

$$C_0 = \frac{1}{ks_{MIN} * \omega * X_L}$$

Calculando obtenemos:

$$C_0 = \frac{1}{0,15 * (2\pi * 50)^2 * 20[mH]} = 3,377[mF]$$

3.1.2 Cálculo de parámetro L_0

Para obtener L_0 se realiza a través de la definición de λ , de modo que:

$$L_0 = \frac{1}{\lambda^2 * \omega^2 * C_0}$$

Entonces:

$$L_0 = \frac{1}{2,1^2 * (2 * \pi * 50)^2 * 0,003377} = 0,68027[mH]$$

3.2 Compensación para $\delta_{nom}=25^\circ$

Ya con los parámetros definidos, se procede a realizar el análisis para el punto de operación y de esta forma determinar el ángulo de disparo para los tiristores del TCSC. Se tiene como dato de entrada que $ks_{OP} = 0,25$, luego se puede determinar la capacitancia equivalente requerida para la compensación como:

$$ks_{OP} = \frac{X_{C_{OP}}}{X_L}$$

Desarrollando la expresión se obtiene $C_{EQ.OP}(\beta)$ como:

$$C_{EQ.OP}(\beta) = \frac{1}{\omega * k_{SOP} * X_L} = \frac{1}{(2 * \pi * 50)^2 * 0,25 * 0,02} = 2,026[mF]$$

Para obtener β (ángulo para obtener disparo de tiristores) se tiene que la ecuación del factor k_{Bpu} es definida como:

$$k_{Bpu} = \frac{C_0}{C_{EQ.OP}(\beta)} - 1 = 0,66667[-]$$

Con este resultado, nos vamos a la ecuación de $k_{Bpu}(\beta)$ obtenida de los apuntes para encontrar finalmente el ángulo β :

$$k_{Bpu} = \frac{2 \lambda^2}{\pi(\lambda^2 - 1)} * \left[\frac{2 \cos^2(\beta)}{(\lambda^2 - 1)} * (\lambda \tan(\lambda\beta) - \tan(\beta)) - \beta - \frac{\sin(2\beta)}{2} \right]$$

Haciendo uso de MATLAB se calcula que el valor:

$$\beta = 45,6^\circ$$

Luego el disparo de los tiristores sin sincronizar con la corriente que circula por la línea viene dada por:

$$\alpha = 180 - \beta = 132,4^\circ$$

Ahora para sincronizar los disparos, es que se vuelve necesario encontrar la ecuación para la corriente compensada, puesto que los tiristores deben sincronizar con los peak de corriente, dicho de otra forma 90° después del cruce de la corriente por cero.

$$\vec{I} = \frac{2 * V * \text{Sen}\left(\frac{\delta}{2}\right) \angle -\frac{\delta}{2}^\circ}{(1 - K_{SOP}) * X_L}$$

Reemplazando los valores conocidos se obtiene:

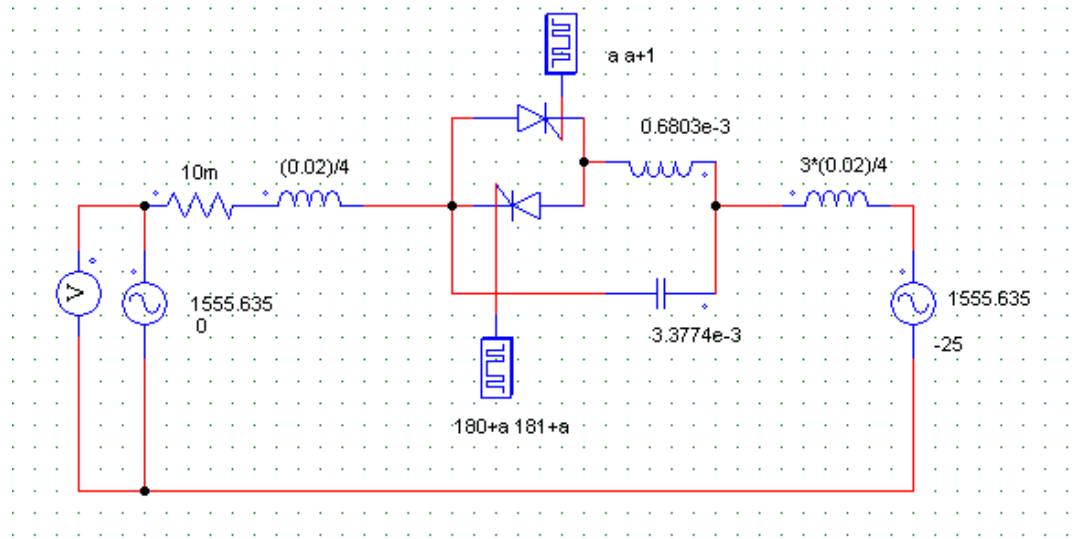
$$\vec{I} = \frac{2 * 1100 * \sqrt{2} * \text{Sen}\left(\frac{25^\circ}{2}\right) \angle -\frac{25^\circ}{2}}{(1 - 0,25) * 2 * \pi * 50 * 0,02} = 142,9 \angle -12,5^\circ [A]$$

Como se puede observar en la expresión calculada, la corriente compensada es de mayor magnitud que la sin compensar, y mantiene el mismo ángulo de desfase.

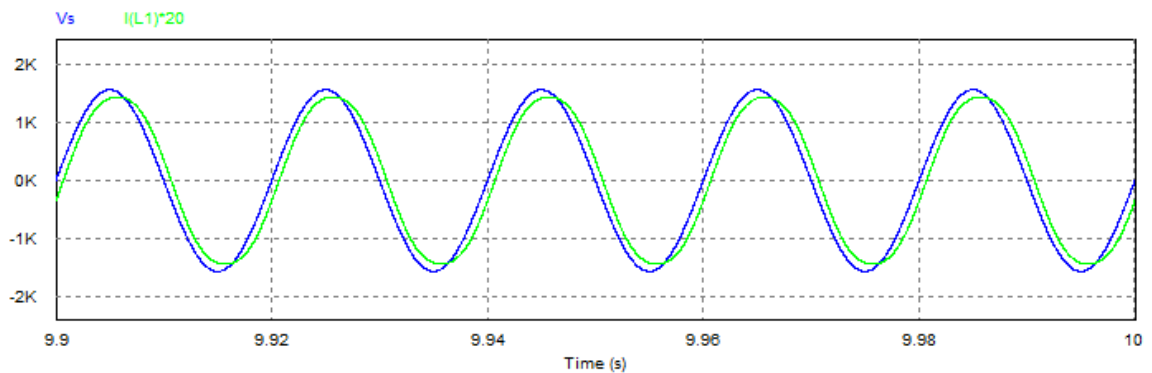
Finalmente obtenemos el ángulo de disparo de los tiristores como:

$$\alpha_d = 132,4^\circ - (90^\circ - 12,5^\circ) = 54,9^\circ$$

Con el ángulo de disparo, se procede a simular en PSIM, en la Figura 3-2 se muestra el circuito utilizado para simular:

Figura 3-2: Circuito de simulación TCSC para $\delta_{nom} = 25^\circ$

Es de interés observar la forma de onda de corriente en la línea contrastada con la tensión de la fuente, para ver que tengan un pequeño desfase, lo cual se muestra en la Figura 3-3 donde se amplificó la corriente para poder observar de mejor forma el desfase.

Figura 3-3: Comparación de V_s con la corriente de línea para $\delta_{nom} = 25^\circ$

Aplicando la FFT a la corriente de la línea podemos observar en su fundamental la compensación realizada por el TCSC, como se muestra en la Figura 3-4.

Frequency	I(L1)	Angle[D]_I(L1)
0	0.01753854946887403	0
50.00000052352452	149.11608340820521	-12.351708192410975
100.00000104704904	0.091926649068895389	177.01419033733279
150.00000157057354	5.5583992711801118	-37.332249577447357
200.00000209409808	0.047454046337786548	171.21482561483896
250.00000261762261	0.38272724649082107	122.60697909810598
300.00000314114709	0.027560468172062449	176.90908133203348
350.00000366467162	0.1316577986831699	103.80214693672218
400.00000418819616	0.020286052151586992	179.80794046193282
450.00000471172069	0.031970623811939734	-142.75156258232869
500.00000523524523	0.016092204652008293	179.36245296579287

Figura 3-4: FFT de la corriente de línea compensada

Como se puede observar la amplitud de la corriente compensada es de $149,1[A]$ que difiere de la esperada calculada de amplitud $142,9[A]$, la diferencia es de $6,2[A]$. Luego si observamos el desfase, el simulado tiene ángulo de $-12,35^\circ$ y el esperado por los cálculos es de $-12,5^\circ$, nuevamente la diferencia es mínima de $0,15^\circ$. Estas diferencias pueden corresponder a que para los cálculos teóricos no se consideró la resistencia de la línea de $10[m\Omega]$ y durante los cálculos de los ángulos de disparo de los tiristores se hizo una aproximación de los decimales para los resultados numéricos obtenidos.

Respecto a la corriente de línea, se puede observar en la FFT que tiene un contenido importante en la 3era armónica, en la Figura 3-5 se puede apreciar el espectro monolateral de forma gráfica.

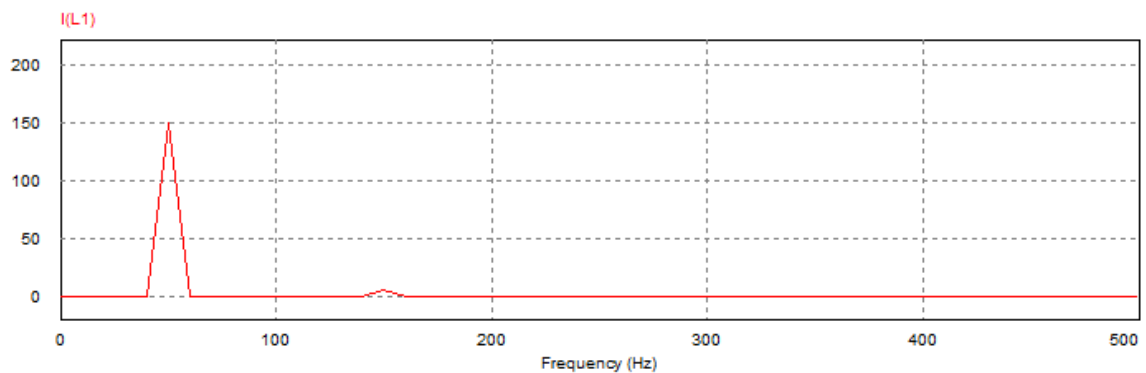


Figura 3-5 Espectro monolateral de corriente de línea

Finalmente se concluye que se realizó la compensación mediante TCSC de forma satisfactoria.

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 con la rama de TCR 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 tercera, quinta y séptima armónica. De ser filtradas estas armónicas se podría tener un aún mejor funcionamiento del sistema. Como el sistema solo consideraba una fase, en la realidad, habría que hacerlo de forma trifásica, y esperando que el sistema esté balanceado es que la tercera armónica bajo esa situación no debería presentar problemas. Para la quinta es que se vuelve necesaria la inminente implementación de filtros puesto que esta fue la que presentó mayor amplitud.

El SVC a diferencia del TCSC presenta una mayor región de trabajo, además de que permite elegir el ángulo de resonancia, lo cual nos da paso para poder utilizarlo tanto para absorber o generar reactivos según se desee. El TCSC al trabajar con más parámetros y de forma más acotada es que su ajuste es mucho más sensible.

Para la mayoría de los SEP es necesario subir la tensión para llegar a los puntos de carga con una tensión deseada, por lo cual de ambos compensadores se considera que el SVC es más idóneo para esta situación.

El TCSC como permite que pase mayor corriente por la línea de transmisión, se podría implementar en un sistema en el cual en el lado de la carga se presente un aumento de la potencia requerida, puesto que la tensión es la misma, permite suministrar más potencia.

