



PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATOLICA
DE VALPARAISO



Alfredo Ignacio Demanet Galdames

Investigación de un circuito compensador basado en un condensador dinámico buck-boost

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Eléctrico



Escuela de Ingeniería Eléctrica



PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATOLICA
DE VALPARAISO

Investigación de un circuito compensador basado en un condensador dinámico buck-boost

Alfredo Ignacio Demanet Galdames

Informe Final para optar al título de Ingeniero Eléctrico,
aprobada por la comisión de la
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
conformada por

Sr. Domingo Ruiz Caballero
Profesor Guía

Sr. Miguel López González
Segundo Revisor

Sr. Jorge Mendoza Baeza
Secretario Académico

Valparaíso, 2017

Resumen

El siguiente trabajo propone el estudio de la conexión de un nuevo tipo de compensador estático de reactivos basado en el convertidor buck-boost; la conexión será en paralelo a un sistema eléctrico de distribución elegido arbitrariamente, el cual posee una carga de potencia variable del tipo comercial.

En primer lugar se presenta el estudio de la nueva topología que se basa en el Sistema de transmisión de corriente alterna flexible (FACTS) denominado Compensador Estático de Reactivos (SVC), funcionando mediante la conmutación de semiconductores que actúan como interruptores en alta frecuencia.

Luego se presenta un análisis cualitativo y cuantitativo del nuevo dispositivo, a través del cual son obtenidas las ecuaciones que le rigen, para percibir el comportamiento del nuevo SVC, que en adelante se le va a denominar como Compensador Estático de Reactivos con Conmutación en Alta Frecuencia tipo buck-boost (CER-CAF-BB), para compensar reactivos, a través de simulaciones en el software computacional PSIM.

Obteniendo resultados tanto para un sistema de dos máquinas como para el sistema de distribución, donde el convertidor se comporta como una reactancia variable, en un rango de operación, que puede aumentar o disminuir a partir de un valor fijo, tal como sucede en el comportamiento de la tensión en un convertidor tipo buck-boost.

Palabras claves: convertidor buck-boost, FACTS, SVC, CER-CAF

Abstract

The following paper proposes the study of a new type of reactive compensator based on the buck-boost converter, connected in parallel to an electrical distribution system, which has a load commercial type variable power.

First studying the new topology based on a Flexible AC Transmission System (FACTS) called Static Var Compensator (SVC), operating by switching semiconductors that act as switches in high frequency.

Then a qualitative and quantitative analysis of the new device is presented, through which are derived the equations that govern it, to perceive the behavior of the new SVC, hereinafter going to be known as Static Var Compensator Switched at High Frequency buck-boost type (SVC-HF-BB), to compensate reactive power, through simulations in a computer PSIM software.

Obtaining results both for a two-machine system and for the distribution system that the converter acts as a variable reactance in a range of operation, which can increase or decrease from a fixed value, as in behavior of the voltage in a buck-boost converter.

Key words: Buck-boost converter, FACTS, SVC, SVC-HF, SVC-HF-BB.

Índice general

Introducción.....	1
Objetivo general.....	4
Objetivos Específicos.....	4
1 Introducción a los compensadores estáticos de potencia reactiva SVC	5
1.1 Introducción a los SVC	5
1.2 Característica régimen permanente de un SVC	5
1.3 SVC Condensador Fijo – Reactor Controlado a Tiristor (CF-TCR)	6
1.4 Problemática del SVC CF-TCR.....	8
1.5 SVC conmutado a alta frecuencia (CER-CAF)	9
1.6 Problemática del CER-CAF tipo buck	12
2 SVC conmutado a alta frecuencia tipo buck-boost (CER-CAF-BB)	13
2.1 Introducción al CER-CAF-BB.....	13
2.2 Antecedentes: Convertidor Buck-Boost (Reductor-Elevador)	13
2.3 Análisis cuantitativo de la configuración buck-boost	15
2.4 Simplificación para el Análisis de la Compensación	18
2.5 Ejemplo de proyecto nº 1	21
2.5.1 Simulaciones del circuito nº 1.	24
2.6 Módulo de Conmutación Propuesto.....	27
2.7 Ejemplo de proyecto nº 2	30
2.7.1 Control de la magnitud de la tensión.	33
2.7.2 Simulaciones del circuito nº 2	36
2.8 Extensión trifásica del circuito.....	39
2.8.1 Compensador conectado en estrella.	40
2.8.2 Simulaciones del circuito nº 3.	40
2.8.3 Compensador conectado en delta.	44
2.8.4 Simulaciones del circuito nº4	44
3 Inserción del CER-CAF buck boost a un sistema de distribución	49
3.1 Presentación de una carga variable para simulación	49
3.2 Presentación del sistema de distribución.....	50

3.3 Simulaciones del sistema de distribución	51
3.3.1 Sistema de distribución sin compensar	52
3.3.2 Sistema de distribución compensado	55
Discusión y conclusiones.....	59
Bibliografía	62

Introducción

Hoy en día, los sistemas eléctricos de potencia deben poder mantener bajo control ciertos niveles de calidad de suministro. Una de las consecuencias de la inyección de potencia hacia una carga es la necesidad de compensar los efectos, producidos por las líneas de transmisión.

En particular, se requiere de inyectar al sistema la denominada potencia reactiva; una de las formas más populares de realizar este proceso, es por medio de la instalación de bancos de condensadores, los cuales van siendo conectados por etapas al sistema.

Debido a los valores fijos de la capacidad de estos condensadores, estos sistemas son poco flexibles, es decir es demasiado acotada la posibilidad de poder controlar adecuadamente el flujo de potencia.

Por ello en la década del '80 nace la familia de controladores denominados como (FACTS) sistemas de transmisión de corriente alterna flexibles o en inglés Flexible AC Transmission System, cuya base es la de estar conformados por elementos de la electrónica como la implementación de diodos, tiristores, transistores, entre otros y cuyo objeto es el de modificar los parámetros de potencia, tensión y reactancia de una línea para así controlar el flujo de potencia de la misma.

Chile cuenta con varios FACTS instalados como el que en 2011 puso en servicio la empresa ABB en la subestación de Cerro Navia. Éste provee desde 65 MVAR inductivos a 140 MVAR capacitivo y permite aumentar la capacidad de transmisión en 200MW [1].

Los dispositivos FACTS se pueden clasificar a, según su topología o según la función de sus principales elementos, en particular pueden dividirse en dos grupos:

Basados en Impedancia Variable: donde estos emplean reactancias (o susceptancias) que modifican su magnitud usando tiristores como elementos de control. En esta familia se puede encontrar a: el Compensador Estático Reactivo (SVC), el Condensador en Serie, Fijo y Controlado por Tiristores (TCSC), el Transformador de Desplazamiento de Fase (PST) y Asistido (APST).

Basados en Fuentes de Tensión Sintéticas: donde este conjunto utiliza los convertidores estáticos auto conmutado como fuentes de tensión controladas. A este grupo pertenecen: el Compensador

Estático Síncrono (STATCOM), el Compensador en Serie Estático Síncrono (SSSC), el Controlador Unificado de Flujo de Energía (UPFC) [2].

En particular se analiza, el compensador estático de reactivos o en inglés Static Var Compensator (SVC) que busca controlar la impedancia de un circuito, regularizando de esa manera la corriente y de potencia activa. Esto se consigue por ejemplo funcionando como un condensador que varía su capacidad en paralelo con la línea.

Dentro de los usos de los dispositivos FACTS y en particular de los SVC en los sistemas de distribución y transmisión son:

En primer término, el aumento de la capacidad de transmisión, que permite hacer un uso eficiente de la potencia activa actualmente disponible, permitiendo postergar la construcción de nuevas líneas aéreas y centrales de energía eléctrica.

En segundo término, el control de tensión en puntos críticos, acondicionando la tensión producida en cierto punto de una línea, la cual si es de naturaleza inductiva, es de magnitud menor si es que no está instalado el dispositivo, reduciendo el efecto de las perturbaciones de la red sobre las cargas sensibles, puede tratarse de cortocircuitos o la pérdida de una línea importante de transmisión, donde el SVC detecta la caída de tensión resultante en el sistema y modifica su impedancia para restaurar rápidamente la tensión de la red, inyectando reactivos capacitivos hacia la red.

En tercer término, el mejoramiento de la estabilidad transitoria donde el SVC debe producir la amortiguación de las oscilaciones de potencia. En el caso de un sistema sub-amortiguado cualquier disturbio menor puede causar una oscilación en el ángulo de carga, lo cual llevara a una oscilación de potencia alrededor de potencia de régimen transmitida. Puesto que la oscilación de potencia es un evento dinámico, es necesario modificar la compensación aplicada de modo a lograr una consistente y rápida amortiguación [3].

Para los SVC es fundamental poseer un comportamiento tal que sólo absorban o entreguen reactivos a la red, dependiendo del tipo de reactivos que se requiera compensar (inductivo o capacitivo), es decir idealmente no deben procesar potencia activa, debido a que se requiere que para receptores de energía, se pueda aprovechar la máxima cantidad entregada desde quienes la generan.

En el trascurso de los años, gracias al desarrollo de la electrónica de potencia, se han propuesto diversas topologías de SVC, dotando a por ejemplo redes de distribución y de transmisión de posibilidades adicionales de control debido a la rápida respuesta de dispositivos semiconductores, que actúan como interruptores.

Dentro las topologías se encuentran modificaciones al SVC clásico que se caracteriza por ser un Condensador Fijo con Reactor Controlado a Tiristor (CF-TCR), en donde debido a la conmutación

de los semiconductores asociados a la estructura, la reactancia equivalente de la misma es controlada, en el SVC clásico por el accionamiento de tiristores.

Pudiéndose presentar estudios de diversas variantes de esta topología como el SVC aislado basado en inductancias no lineales [4], en donde se desea evitar efectos indeseados producidos por perturbaciones, sobretensiones, cambios en la demanda, etc., en un sistema de transmisión.

O el SVC aislado basado en la topología Mcvey- Weber [5], para eliminar efectos inherentes de un CF-TCR como lo son la inyección de armónicos en una red.

Otro caso es del Compensador Estático de Reactivos con Conmutación a Alta Frecuencia (CER-CAF), cuya topología es a base de transistores, naciendo a partir de los convertidores DC-DC por ejemplo el tipo Buck o reductor de tensión [1] [3] [6], que funciona a partir de un condensador fijo que permite que la aparición de una reactancia equivalente, cuya capacidad va disminuyendo a medida que aumenta porcentaje de tiempo en un periodo de conmutación en el cual están encendidos los semiconductores, es decir comportándose como la tensión de salida en un convertidor DC-DC tipo buck o reductor y que si conecta en los módulos en cascada pueden cumplir los requisitos de tensión soportada de los semiconductores.

En estas topologías es fundamental reconocer si se requiere de la instalación de filtros armónicos para convertirla en una alternativa más económica y demostrar que cada caso es una generalización del SVC convencional, es decir, el compensador estudiado en este trabajo puede operar exactamente igual a un SVC clásico si se conmuta a baja frecuencia

Destacándose el proyecto [6] donde se comparan de modelos de FACTS tipo SVC aplicados a una red de distribución de media tensión radial, en donde se produce el hecho de balancear las tensiones de fase en todas las barras del sistema, asunto que con un banco de condensadores no se puede hacer. Por otro lado, también se mejora el perfil de tensión en todas las barras, es decir la tensión no solo aumenta en la barra de compensación.

Pudiéndose realizar diversas variantes al respecto como es la propuesta de este trabajo que busca entregar información sobre una nueva topología de compensación de reactivos basado en el convertidor DC-DC tipo buck-boost, es decir que funcione como una reactancia equivalente cuya capacidad a partir de un condensador fijo pueda aumentar o disminuir dependiendo porcentaje de tiempo en un periodo de conmutación en el cual están encendidos los semiconductores.

Para todos los casos es fundamental para garantizar el funcionamiento de estos dispositivos, al evaluar su respuesta ante diferentes escenarios de operación, para de esta forma concluir acerca de la selección de los elementos que lo forman, mejorar las condiciones de funcionamiento y así poder controlar un sistema.

Objetivo general

- Investigar un nuevo tipo de condensador dinámico basado en el convertidor conversor buck-boost, encontrando las ecuaciones de sus componentes y proponiendo un control adecuado para realizar un proyecto aplicado a un circuito de distribución típico.

Objetivos Específicos

- Analizar el circuito propuesto, encontrando en un principio la expresión de capacitancia equivalente monofásica, para posteriormente poder realizar su respectiva extensión trifásica.
- Estudiar un control apropiado para su uso de compensación de reactivos.
- Proyectar y simular el circuito aplicado a un sistema de distribución típico, verificando su desempeño.

1 Introducción a los compensadores estáticos de potencia reactiva SVC

1.1 Introducción a los SVC

El compensador estático de reactivos o en inglés Static Var Compensator (SVC) es un dispositivo eléctrico diseñado para proveer una rápida compensación de reactivos en redes eléctricas de alta tensión. Pertenecen a la familia de los Sistemas de transmisión de corriente alterna flexibles o en inglés Flexible AC Transmission System (FACTS), donde su principal función es la de regular la tensión en un punto de una línea y contribuir a la estabilidad de un sistema eléctrico de potencia [1].

El SVC posee un comportamiento el cual se rige por elementos de características reactivas como los son reactores y bancos de condensadores, denominándosele además como estático al no poseer en su estructura física partes mecánicas móviles, que incluyen a elementos que hacen actuar al conjunto como un condensador o inductor estático, es decir, en un punto de operación.

1.2 Característica régimen permanente de un SVC

En general el SVC opera como “regulador de tensión” de un sistema de potencia y posee una curva característica V-I, mostrada en la Figura 1-1, donde se indica que el SVC se comporta, en su zona de control lineal, como una fuente de tensión con pendiente positiva de manera que pueda regular la tensión. Este modo de operación está definido por dos límites máximos de corriente: capacitiva (α_{\max}) e inductiva (α_{\min}) [6] [2].

En estos puntos máximos el SVC pierde la capacidad de control y funciona simplemente como una impedancia con valores fijos, ya sea capacitiva (X_c) o inductiva ($X_L//X_c$).

Observando en la Figura 1-1, se tiene que el compensador en su zona lineal, es representado por:

$$V_{barras} = V_{ref}(\alpha_0) + X_{SL} \cdot I \quad (1-1)$$

Donde:

$$X_{SL} = \frac{V^{max} - V^{min}}{I_L^{max} - I_C^{max}} \quad (1-2)$$

Es el cociente entre el cambio en magnitud de la tensión, de la barra compensada, sobre el rango de control lineal de la corriente inyectada por el SVC, y:

$$V_{ref}(\alpha_0) = \frac{V^{max} \cdot I_L^{max} - V^{min} \cdot I_C^{max}}{I_L^{max} - I_C^{max}} \quad (1-3)$$

Representa una tensión de referencia, donde α_0 es el punto en que la corriente inyectada es nula, es decir, el punto para el cual $X_{SVC} \rightarrow \infty$, punto de resonancia.

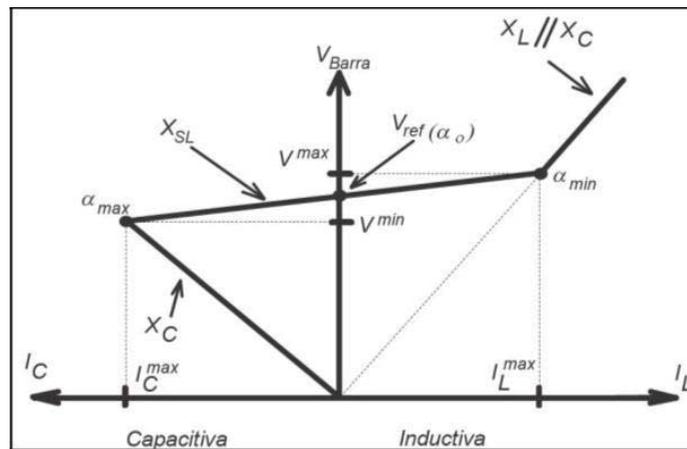


Figura 1-1 Característica V-I de un SVC.

1.3 SVC Condensador Fijo – Reactor Controlado a Tiristor (CF-TCR)

El SVC clásico mostrado en la Figura 1-3, se le denomina como compensador estático de reactivos (SVC) Condensador Fijo – Reactor Controlado a Tiristor (CF-TCR).

Está compuesto por un reactor controlado por tiristores o en inglés Thyristor Controlled Reactor (TCR) mostrado en la Figura 1-2 y un banco de condensadores (C) en paralelo, a su vez el TCR está formado por un inductor (L) de reactancia fija y un convertidor CA-CA debido a la disposición de tiristores en antiparalelo. Dependiendo del valor adquirido por el ángulo de disparo de este par de tiristores (θ), el SVC se puede apreciar como una reactancia equivalente variable ya sea inductiva o capacitiva, dependiendo de la compensación requerida por el sistema en ese instante [1].

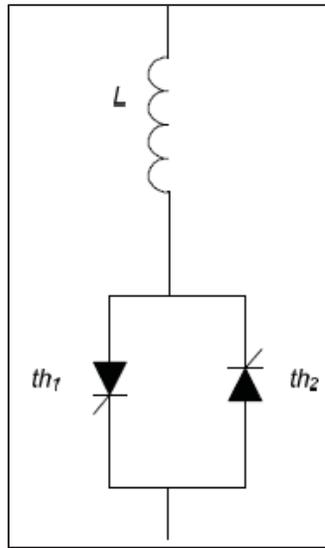


Figura 1-2 Reactor controlado por tiristores (TCR).

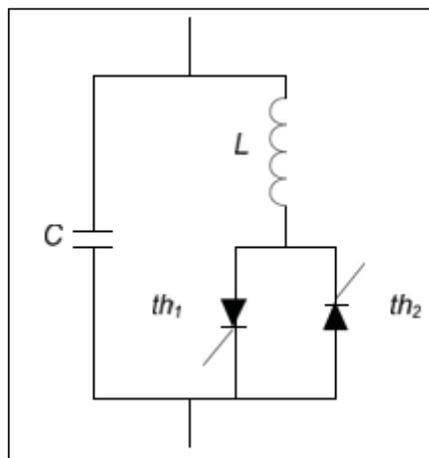


Figura 1-3 Célula de un SVC clásico (CF-TCR).

Si se considera el TCR conectado en sus extremos a una fuente sinusoidal se tienen las formas de onda de la Figura 1-4 El ángulo de disparo de los tiristores marcado como “ α ” es de sumo interés ya que determina la inductancia equivalente vista por el sistema.

Cabe señalar que su valor no puede exceder π ni ser menor que $\pi/2$, ya que en el primer caso no habría conducción mientras que en el segundo se tendría una inductancia fija conectada al sistema.

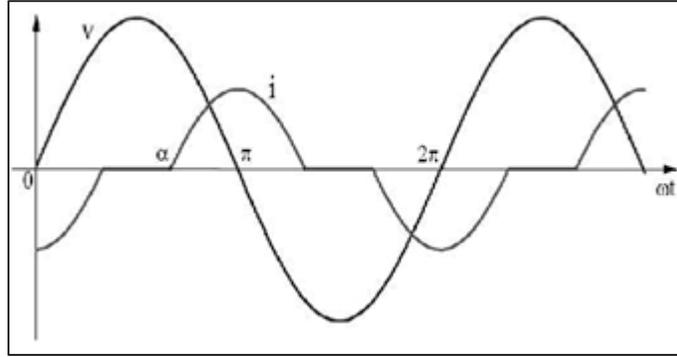


Figura 1-4 Principales Formas de Onda de un TCR.

El comportamiento del TCR puede ser descrito por la expresión [2]:

$$L_{eq}(\alpha) = \frac{\pi \cdot L}{2 \cdot (\pi - \alpha) - \sin(2 \cdot (\pi - \alpha))} \quad (1-4)$$

La asociación del TCR en paralelo con un condensador entrega la célula de compensación clásica Condensador Fijo – Reactor Controlado a Tiristor (CF-TCR) de la Figura 1-3, cuya capacitancia equivalente está dada por la expresión [2]:

$$C_{eq}(\alpha) = \frac{2 \cdot \pi - 2 \cdot \alpha + \sin(2 \cdot \alpha) - \pi \cdot \frac{X_L}{X_C}}{\omega \cdot \pi \cdot X_L} \quad (1-5)$$

1.4 Problemática del SVC CF-TCR

El principal problema del SVC CF-TCR es que se comporta como una carga no lineal que produce la circulación de corrientes cuya forma de onda no es sinusoidal, que son consideradas como la superposición de corrientes de diferentes frecuencias (múltiplos de la fundamental), que originan distorsiones en las corrientes del sistema y eventualmente en las tensiones dependiendo del sistema de potencia en el cual esté instalado.

Debido a que la forma de onda de la corriente a través del TCR no es puramente sinusoidal, es decir no es a imagen y semejanza de la forma de onda de tensión que esta impuesta en el TCR, como se muestra en la Figura 1-4, pudiéndose afirmar que el SVC, como la mayoría de los convertidores estáticos, es realmente una fuente generadora de armónicos al sistema de potencia.

El contenido armónico inyectado al sistema es variado, dependiendo del valor que adquiera ángulo de disparo de los tiristores del TCR. Una vez que aumenta el ángulo de disparo, la forma de onda de corriente se torna más pulsada lo que con lleva a una mayor distorsión armónica total (THD).

Cabe destacar que estos armónicos producidos son a su vez de baja frecuencia, debido a que los tiristores deben ser accionados a frecuencias bajas, es decir cercanas a la fundamental de la red. [2]

1.5 SVC conmutado a alta frecuencia (CER-CAF)

Como se dijo en 1.4 el principal problema del SVC CF-TCR es la contaminación armónica en baja frecuencia principalmente en corriente, para lo cual es necesario conectar filtros para mitigar estos armónicos, por lo que en trabajos anteriores [1] [3] [6], se ha trabajado con el Compensador estático de reactivos (SVC) con conmutación a alta frecuencia (CER-CAF) basado en el convertidor DC-DC tipo Buck de la Figura 1-5.

En el cual a partir de una tensión de entrada continua (V_e) se genera una tensión de salida (V_o) cuya magnitud media es siempre de menor valor que V_e , producto de la interacción entre los elementos que pertenecen al convertidor; el condensador (C), el diodo (D), el transistor (T) y en inductor (L) y donde la magnitud de V_o depende esencialmente de la fracción de tiempo que el transistor se encuentre encendido conmutado a una cierta frecuencia.

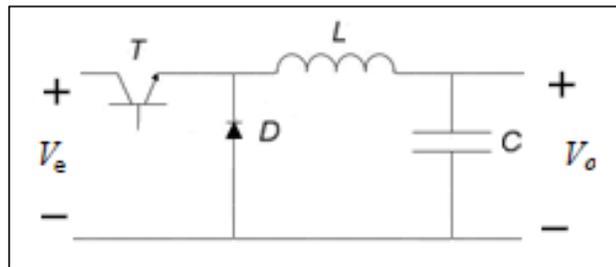


Figura 1-5 Convertidor DC-DC tipo buck o reductor.

Luego como se puede observar en la Figura 1-6 se procede a retirar el condensador C cortocircuitando sus terminales. Se instala un condensador fijo (C_o) que forma parte del convertidor, que actúa como filtro de armónicos de corriente y que representa el valor máximo de la capacitancia equivalente del convertidor.

Finalmente para que el convertidor funcione en corriente alterna se substituyen los semiconductores por dos interruptores (S_1) y (S_2) que deben conmutar complementariamente y ser bidireccionales en corriente, dado que el convertidor se debe insertar en un sistema de potencia, funcionando en cada semiciclo de la tensión en su entrada. Produciendo de esa manera que el convertidor se comporte como una reactancia equivalente vista a la frecuencia de la red.

La representación práctica del circuito de la Figura 1-6 se muestra en la Figura 1-7. Cada interruptor corresponde a la conexión en serie de dos transistores bipolares de puerta aislada o en inglés Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT), con su correspondiente diodo (D) en anti paralelo, para formar cada interruptor bidireccional.

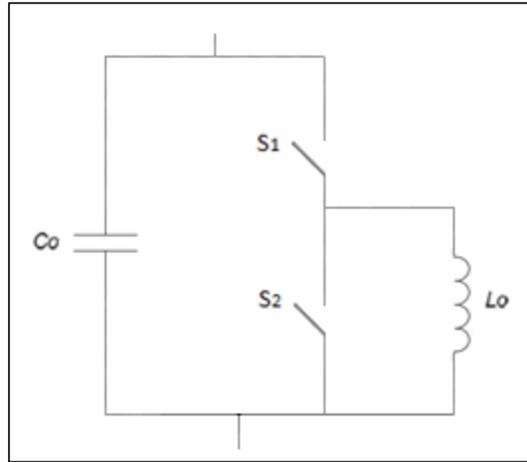


Figura 1-6 Esquema de la célula de Compensación tipo buck (CER-CAF) Simplificada.

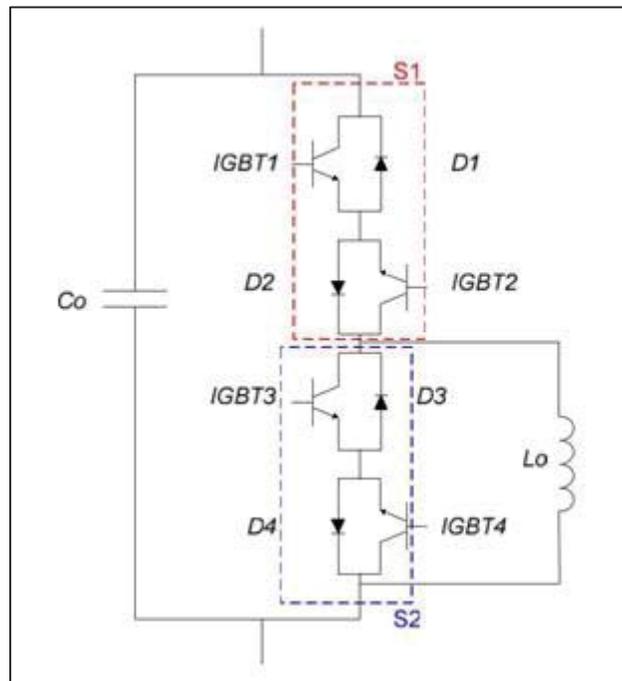


Figura 1-7 Célula de Compensación tipo buck (CER-CAF)

Se utilizan IGBT debido a que por necesidad de diseño estos componentes consiguen ser un semiconductor de características intermedias, entre los transistores de efecto de campo, en particular los de metal-óxido-semiconductor (MOSFET) y los tiristores. Por un lado los IGBT pueden soportar mayores tensiones que los transistores MOSFET sin conmutar a tan alta frecuencia pero si son superiores a los tiristores en este aspecto sin poder soportar tan altas corrientes como estos últimos, tal como se menciona en la Tabla 1-1 [7].

1 Introducción a los compensadores estáticos de potencia reactiva SVC

Tabla 1-1 Condiciones de uso de los semiconductores

Dispositivo	Frecuencias	Tensiones	Corrientes
Tiristores	50-60 [Hz]	Hasta 8000 [V]	Hasta 15000 [A]
MOSFET	Hasta 10 [MHz]	Hasta 1500 [V]	Hasta 400 [A]
IGBT	Hasta 75 [kHz]	Hasta 6500 [V]	Hasta 3600 [A]

Siendo una topología que no requiere de filtros armónicos ni de un bus de corriente continua, ya que es una impedancia variable con mínima inyección de armónicos, producto la combinación entre la alta frecuencia de conmutación de los interruptores y el condensador fijo (C_o) que actúa como filtro. Siendo una generalización del SVC convencional, es decir, este compensador puede operar exactamente igual a un SVC CF-TCR si se conmuta a baja frecuencia.

El parámetro denominado razón cíclica (D), es decir, el porcentaje de tiempo en un periodo de conmutación en el cual están encendidos los interruptores, es de sumo interés ya que determina la reactancia equivalente para la frecuencia fundamental vista por el sistema.

Si se considera como al inductor fijo L_o en asociación con los interruptores como un inductor equivalente $L_{eq}(D)$ visto por el sistema como Figura 1-8:

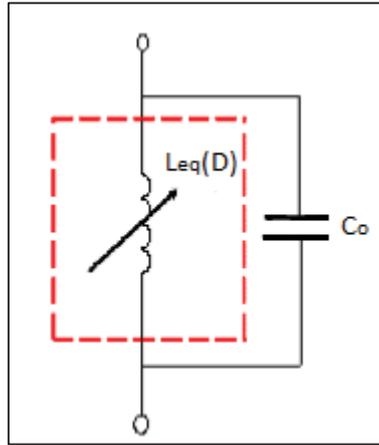


Figura 1-8 Representación de Inductancia equivalente del CEF-CAF tipo buck

Este inductor equivalente con el condensador fijo en paralelo entrega la célula de compensación CER-CAF, cuya capacitancia equivalente en función de la razón cíclica (D) está dada por la expresión [3]:

$$C_{eq}(D) = C_o - \frac{D^2}{\omega^2 \cdot L_o} \quad (1-6)$$

1.6 Problemática del CER-CAF tipo buck

Como desventaja el CER-CAF tipo buck tiene que producto de la mayor frecuencia de conmutación respecto al SVC basado en tiristores, los semiconductores están más expuestos a ese tipo de pérdidas a través de ellos, disminuyendo de esa forma la eficiencia total del circuito en un sistema real.

La configuración de esta célula es más compleja que la basada a tiristores por el uso de elementos activos rápidos.

Si se aprecia la ecuación 1-6 el condensador C_0 debe ser estimado para ser un valor máximo que depende de la estructura donde el SVC va a ser instalado y el inductor L_0 debe ser estimado para la operación resonante, es decir para un punto de operación donde no se requiera compensación, a través de una razón cíclica máxima que se elige convenientemente para ser el máximo punto donde se compensen disminuciones de tensión en la línea producto de una carga de comportamiento inductivo y el mínimo donde se compensen posibles aumentos de la tensión de la línea producto de una carga que se comporte capacitivamente.

2 SVC conmutado a alta frecuencia tipo buck-boost (CER-CAF-BB)

2.1 Introducción al CER-CAF-BB

El principal problema del CER-CAF ilustrado en el capítulo 1, es que a pesar de que no es necesario conectar filtros para mitigar contaminación armónica en corriente, como se puede apreciar en la ecuación (1-6), la capacitancia equivalente del convertidor, sólo puede disminuir a partir del valor del condensador fijo es decir la capacitancia equivalente se comporta como la tensión de salida de un convertidor tipo buck o reductor.

Producto de esto nace la alternativa del Compensador estático de potencia reactiva con conmutación a alta frecuencia tipo buck-boost el CER-CAF-BB que reúne las características de este tipo de conmutación y el comportamiento del convertidor como una reactancia equivalente que puede aumentar o disminuir a partir de un valor de reactancia fija para la frecuencia fundamental de la red, tal como sucede en el comportamiento de la tensión en un convertidor tipo buck-boost.

2.2 Antecedentes: Convertidor Buck-Boost (Reductor-Elevador)

La topología del CER-CAF propuesta nace del Convertidor DC-DC Buck-Boost el cual se presenta en la Figura 2-1.

En el cual a partir de una tensión de entrada continua (V_e), se produce una tensión de salida (V_o) cuya magnitud media, puede ser de mayor o menor magnitud que la de " V_e " producto de la interacción entre los elementos que pertenecen al convertidor; el condensador (C), el diodo (D), el transistor (T) y en inductor (L), al igual que en todos los convertidores DC-DC la magnitud de " V_o " depende esencialmente de la fracción de tiempo en que el transistor se encuentre encendido conmutado a una cierta frecuencia, siendo en este caso " V_o " de polaridad inversa de " V_e ".

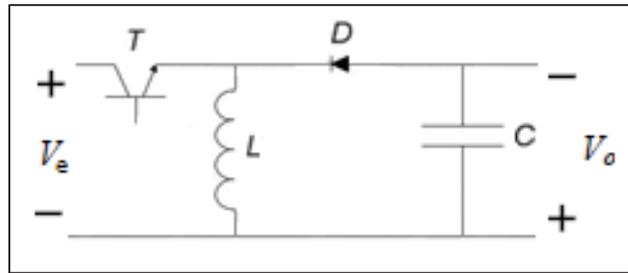


Figura 2-1 Convertidor DC-DC tipo buck-boost o reductor-elevador.

Luego al igual que en la Figura 1-6 del capítulo 1 se substituyen los semiconductores por dos interruptores (S_1) y (S_2), mostrándose el resultado en la Figura 2-2.

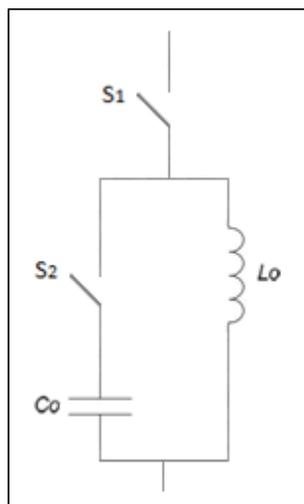


Figura 2-2 Célula de Compensación tipo buck-boost (CER-CAF-BB) simplificada sin filtro.

Se observa que para este caso el condensador “C” es parte fundamental del convertidor, debido a que representa el condensador fijo de la estructura y es representado por “ C_o ” en la Figura 2-2 que muestra a la célula de compensación sin ningún tipo de filtro.

Finalmente, del mismo modo que en la Figura 1-7 del capítulo 1, en la Figura 2-3 se muestra la representación práctica del circuito de la Figura 2-2.

Donde cada interruptor corresponde a la conexión en serie de dos transistores bipolares de puerta aislada (IGBT), con su correspondiente diodo en anti paralelo, para formar cada interruptor bidireccional y de esa manera satisfacer las condiciones de operación en corriente alterna, expuestas en la sección 1.5.

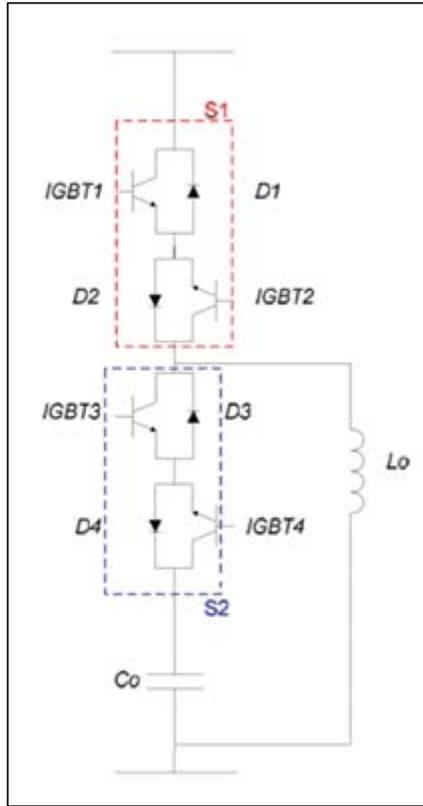


Figura 2-3 Célula de Compensación tipo buck-boost (CER-CAF-BB) sin filtro.

2.3 Análisis cuantitativo de la configuración buck-boost

En primer término se debe hallar una expresión del condensador equivalente que produce convertidor Buck-Boost. Para ello se impone una tensión sinusoidal en la entrada y se debe realizar un análisis al circuito mostrado en la Figura 2-4.

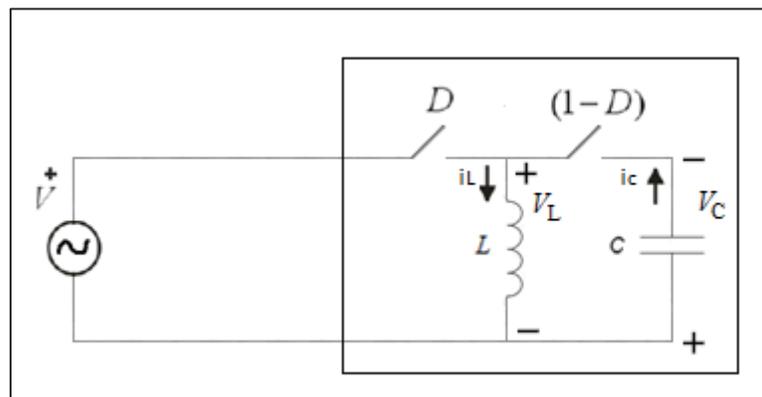


Figura 2-4 Análisis cuantitativo al condensador buck-boost.

Donde al igual que en el caso del CER-CAF del capítulo 1 es fundamental el parámetro razón cíclica (D), para determinar la reactancia equivalente para la frecuencia fundamental vista por la fuente de tensión de entrada.

Para realizar y simplificar este análisis, se toma como supuesto que el valor de la tensión que recae en el inductor es constante durante el periodo de conmutación. Esto es debido a que la frecuencia de conmutación de los interruptores es mucho más elevada que la frecuencia de red (50Hz).

Por lo que los valores de tensiones y corrientes durante la conmutación se denominan como valores medios instantáneos [3] y pueden ser utilizados como si fueran los valores medios en un convertidor DC-DC ideal [8].

Entonces dada una entrada como fuente sinusoidal $V(t)$:

$$V(t) = V_p * \text{Sin}(\omega t) \quad (2-1)$$

La tensión media instantánea en el inductor $V_{Lmi}(t)$:

$$V_{Lmi}(t) = D \cdot V(t) \quad (2-2)$$

La tensión media instantánea en el condensador $V_{Cmi}(t)$:

$$V_{Cmi}(t) = \frac{V_L(t)}{(1-D)} \quad (2-3)$$

A su vez se sabe que la corriente media instantánea por el condensador $i_{Cmi}(t)$:

$$i_{Cmi}(t) = C \cdot \frac{dV_{Cmi}(t)}{dt} \quad (2-4)$$

Luego si corriente media instantánea por el inductor $i_{Lmi}(t)$ es:

$$i_{Cmi}(t) = (1 - D) \cdot i_{Lmi}(t) \quad (2-5)$$

Se desea la corriente de entrada $i(t)$ que es:

$$i(t) = D \cdot i_{Lmi}(t) \quad (2-6)$$

Reemplazando las ecuaciones desde (2-1) a (2-5) en (2-6)

$$i(t) = \frac{C \cdot D^2 \cdot V_p \cdot \omega \cdot \text{Cos}(\omega t)}{(1 - D)^2} \quad (2-7)$$

Y como el convertidor es una reactancia equivalente para la frecuencia fundamental X_{eq} que forma un condensador equivalente (C_{eq}) a la frecuencia de la red de la siguiente manera:

$$X_{eq} = \frac{|V(t)|}{|i(t)|} = \frac{1}{\omega \cdot C_{eq}} \quad (2-8)$$

2 SVC conmutado a alta frecuencia tipo buck-boost (CER-CAF-BB)

Por lo que la expresión de condensador equivalente en función de la razón cíclica D " $C_{eq}(D)$ ":

$$C_{eq}(D) = \left(\frac{D}{1-D}\right)^2 \cdot C \quad (2-9)$$

En la Figura 2-5 se muestra la expresión 2-9 en por unidad (pu) donde " C_{base} " es el condensador fijo " C ", apreciando que el condensador equivalente actúa de la misma manera que la tensión de salida de un convertidor DC-DC buck-boost es decir para $D < 0.5$ la capacitancia equivalente es menor a la fija, es decir modo buck o reductor y para $D > 0.5$ la capacitancia equivalente es mayor a la fija, es decir modo boost elevador.

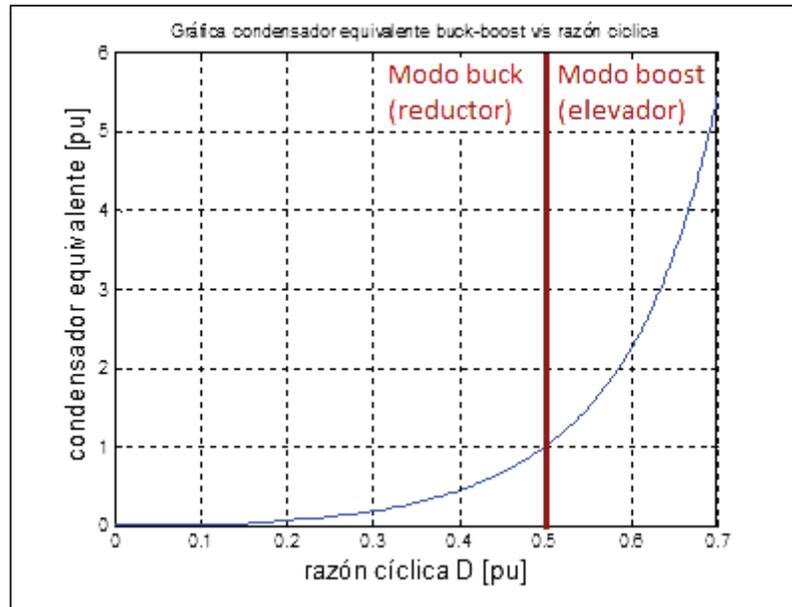


Figura 2-5 Condensador equivalente en pu tipo buck-boost en función de la razón cíclica sin filtros.

Como se puede apreciar en la ecuación (2-9) el condensador $C_{eq}(D)$ no depende del inductor fijo L . Éste se estima utilizando una expresión similar a la que se obtiene de un convertidor DC-DC buck boost es decir [9]:

La inductancia (L) es:

$$L = \frac{V_E \cdot t_{on}}{\Delta I_L} \quad (2-10)$$

Donde " V_E " es la magnitud de la tensión de entrada al convertidor, " t_{on} " es el tiempo donde los interruptores están encendidos, " F_s " es la frecuencia de conmutación de los semiconductores y " ΔI_L " es la ondulación de corriente sobre el inductor por lo que se define " K_I " como una fracción de la magnitud la corriente de entrada " I_E " definiéndose estos factores de la siguiente manera:

$$\Delta I_L = K_I \cdot I_E \quad (2-11)$$

$$t_{on} = \frac{D}{F_S} \quad (2-12)$$

Como:

$$X_{eq} = \frac{V_E}{I_E} \quad (2-13)$$

Reemplazando las ecuaciones desde (2-11) a (2-12) en (2-10), la inductancia L es:

$$L = \frac{D}{F_S \cdot K_I \cdot \omega \cdot C_{eq1}(D)} \quad (2-14)$$

Siendo finalmente la expresión (2-14) reemplazada por (2-9), siendo la inductancia (L) queda definida como:

$$L = \frac{D}{F_S \cdot K_I \cdot \omega \cdot \left(\frac{D}{1-D}\right)^2 \cdot C} \quad (2-15)$$

La inductancia (L) debe ser lo suficientemente grande para que pueda almacenar la energía que le pide el condensador, por lo que "D" se impone en un valor lo suficientemente alto por ejemplo en 0.7 y "K_I" factor que representa la ondulación de corriente aceptada por el inductor "L", en la literatura este factor se acepta de 0,3 [8] y de esa forma sea lo suficientemente pequeño para que en 50 [Hz] se comporte como un cortocircuito.

2.4 Simplificación para el Análisis de la Compensación

Para un primer análisis se aborda la aplicación de un sistema de transmisión básico el cual se representa a través de un sistema de potencia de dos máquinas como el mostrado por la Figura 2-6.

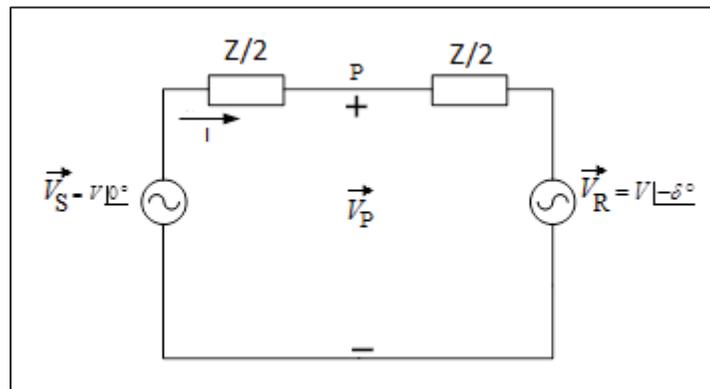


Figura 2-6 Sistema a compensar con SVC.

2 SVC conmutado a alta frecuencia tipo buck-boost (CER-CAF-BB)

Sistema compuesto por una fuente emisora (V_s) alimenta una carga a través de una línea de transmisión modelada como corta. La carga es representada por una máquina conectada en el extremo receptor del sistema (V_R), donde se inserta CER-CAF-BB para poder realizar un análisis de la Compensación simplificado.

En la Figura 2-6 es mostrado el punto “p” que representa un punto medio 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).

Z Impedancia de la línea

V Tensión eficaz

δ Angulo de carga

Ya que se tienen las expresiones matemáticas para su comportamiento en tal lugar [10]. Este punto de aquí en adelante, se llamará indistintamente “punto P” o “punto de compensación”.

Para hacer compensación de reactivos, a través de un SVC no convencional en el punto “P”, en primer término se requiere de un cálculo teórico del sistema sin compensación.

Para el desarrollo de este cálculo el resultado es tanto del módulo $|\vec{V}_p|$ como del ángulo δ_p quedan en función del ángulo de carga δ .

En primer lugar se define \vec{V}_{psc} como el fasor de la tensión en el punto “P” sin compensar. Donde la expresión de la tensión sin compensar en el punto “P” viene dada por [2]:

$$\vec{V}_{psc} = \frac{V \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{1 + \text{Cos}[\delta]}}{2} \angle -\delta/2^\circ \quad (2-16)$$

Entonces el debido a que se define como el módulo máximo de \vec{V}_{psc} como $|\vec{V}_{psc}|_{max}$:

$$|\vec{V}_{psc}|_{max} = \sqrt{2} \cdot |\vec{V}_{psc}| \quad (2-17)$$

Desde la ecuación (2-16) se obtiene:

$$|\vec{V}_{psc}|_{max} = V \cdot \sqrt{1 + \text{Cos}[\delta]} \quad (2-18)$$

Y el ángulo de la tensión en el punto “P” sin compensar δ_{psc} :

$$\delta_{psc} = -\delta/2 \quad (2-19)$$

2 SVC conmutado a alta frecuencia tipo buck-boost (CER-CAF-BB)

Donde las expresiones (2-18) y (2-19) son graficadas en las Figuras 2-7 y 2-8 respectivamente y cuyos rangos en esta primera oportunidad dada la referencia [3]

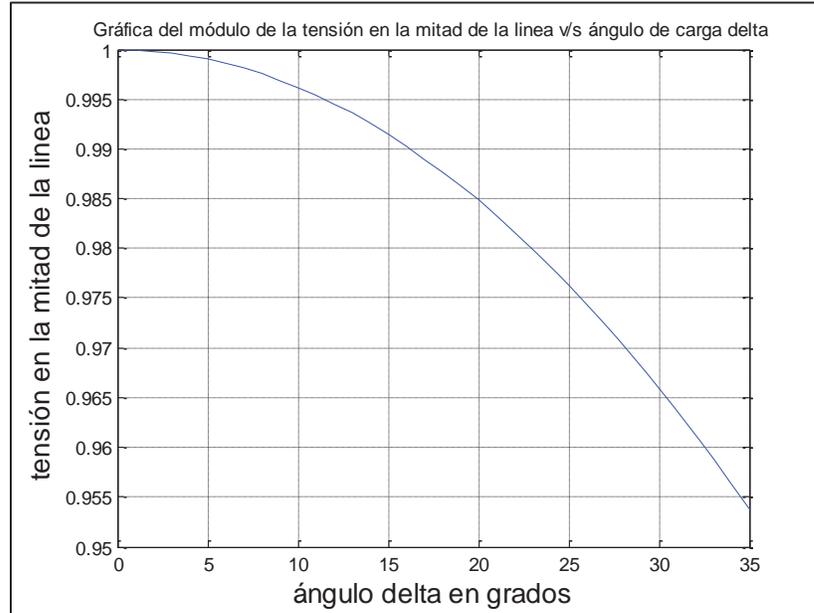


Figura 2-7 Tensión en la mitad de la línea $|\overline{V}_{psc}|_{max}(\delta)$ sin compensador en p.u.

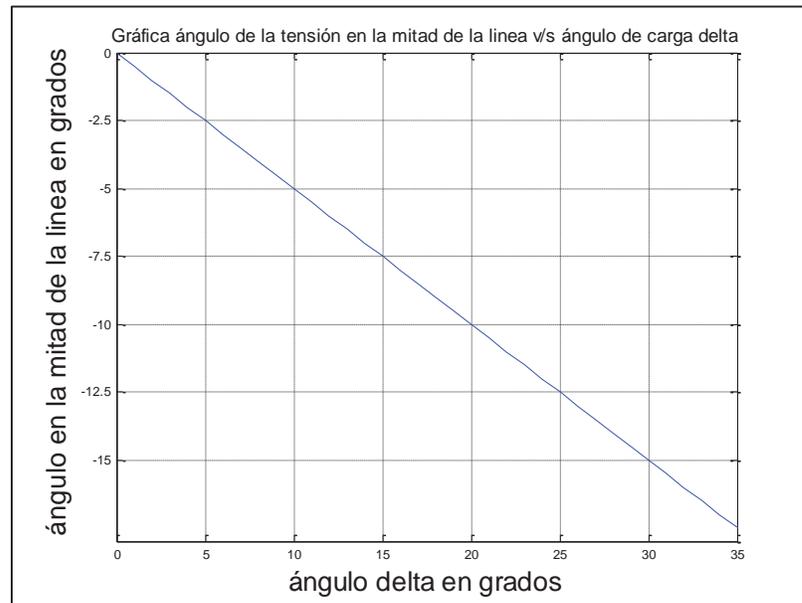


Figura 2-8 Gráfica de ángulos de la tensión en la mitad de la línea.

El SVC o compensador estático de reactivos es equivalente a un capacitor cuya capacitancia es variable, para compensar la potencia reactiva, imponiendo una tensión de igual módulo a la de los extremos emisor y receptor, conservando en ángulo de la tensión sin compensar.

2 SVC conmutado a alta frecuencia tipo buck-boost (CER-CAF-BB)

Primero se requiere encontrar el valor de la capacitancia variable (C_{eq}) como función del ángulo de la carga (δ) para posteriormente encontrar la razón cíclica (D) de los interruptores para cada caso, para ello se presenta el circuito para obtener la tensión a la mitad de la línea con compensación \vec{V}_{pc} , es decir la tensión sobre el capacitor, donde a través de los siguientes cálculos y despreciando la resistencia de la línea, es decir, $\vec{z} = j * X_L$, se obtiene la capacitancia variable que se aplica al modelo.

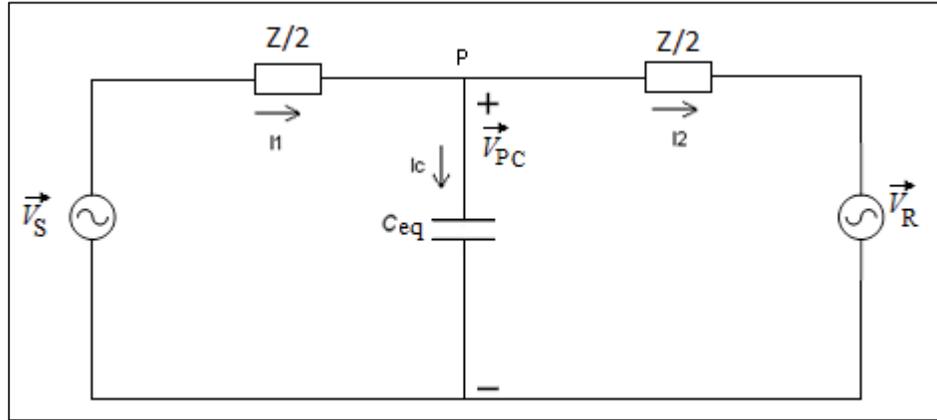


Figura 2-9 Sistema de dos máquinas para obtener la tensión en la mitad de la línea con compensación.

Se necesita de la expresión que relaciona la tensión sin compensar \vec{V}_{psc} y la tensión con compensación \vec{V}_{pc} en la mitad de la línea: [2]

$$\vec{V}_{pc} = \frac{2 \cdot \vec{V}_{psc}}{\left(2 - \frac{X_L}{2 \cdot X_c}\right)} \quad (2-20)$$

Donde se halla la capacitancia variable como función del ángulo δ ($C_{eq}[\delta]$), usando la expresión (2-18), sabiendo que $X_L = \omega * L$, $X_c = \frac{1}{\omega \cdot C_{eq}}$ y que $|\vec{V}_{pc}|_{max} = V \cdot \sqrt{2}$ producen reemplazando en (2-20) que:

$$C_{eq}[\delta] = \frac{1}{\omega^2 \cdot L/2} \cdot \left(2 - \sqrt{2} \cdot \sqrt{1 + \text{Cos}[\delta]}\right) \quad (2-21)$$

2.5 Ejemplo de proyecto n° 1

Se presenta en la Figura 2-10 el compensador instalado en la mitad de la línea que une a dos máquinas trabajando en lazo abierto y simulado en PSIM, denominado como circuito n° 1.

2 SVC conmutado a alta frecuencia tipo buck-boost (CER-CAF-BB)

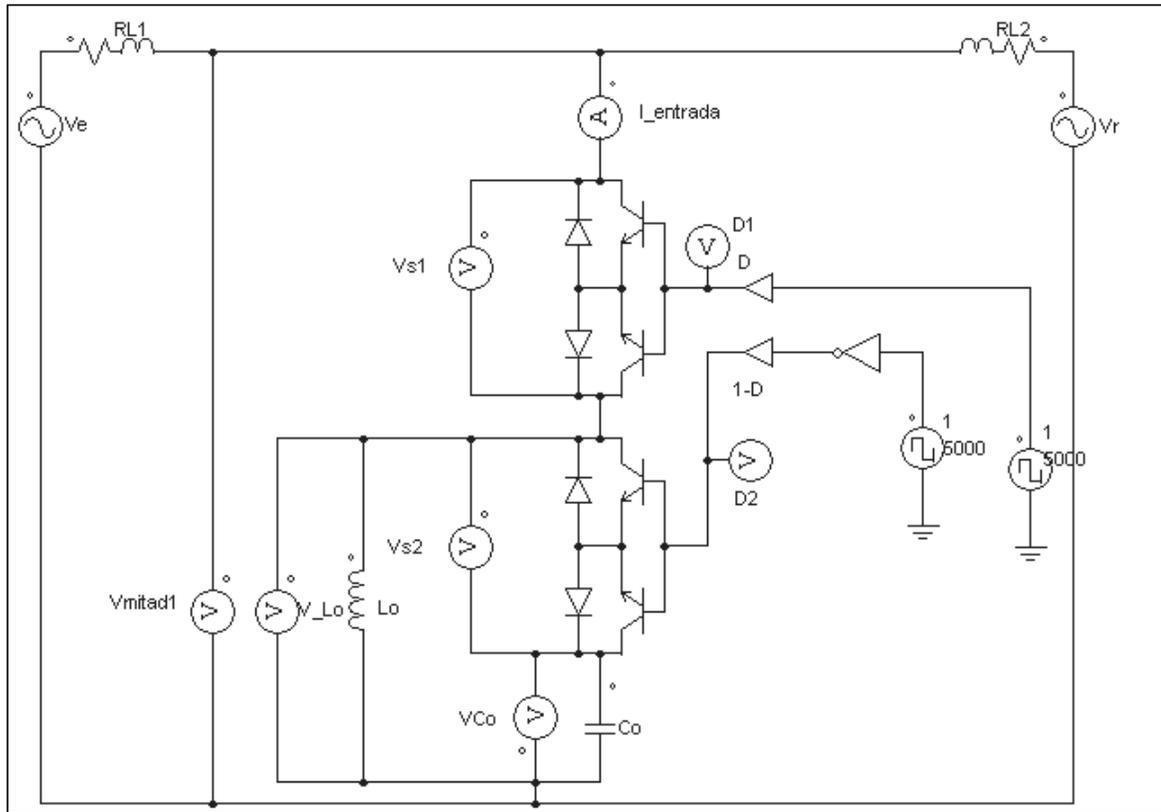


Figura 2-10 Circuito n° 1 simulado en PSIM.

Dados los siguientes datos

$$\vec{V}_E = 220_{RMS} \angle 0^\circ \text{ [V]}$$

$$\vec{V}_R = 220_{RMS} \angle -\delta^\circ \text{ [V]}$$

Parámetros de la línea $R=10[\text{m}\Omega]$ y $L=1800 \text{ [}\mu\text{H]}$

Frecuencia de conmutación $=5[\text{kHz}]$

Y se siguen los siguientes pasos para presenciar el comportamiento de este compensador:

1. Se presentan en las Figuras 2-11 y 2-12 las gráficas de las expresiones (2-9) y (2-21), respectivamente para el este caso, reemplazando al condensador fijo por uno de $100 \text{ [}\mu\text{F]}$, para mostrar los efectos de que el SVC funcione como condensador buck-boost, es decir, que la capacitancia equivalente pueda aumentar y disminuir en un rango de operación.

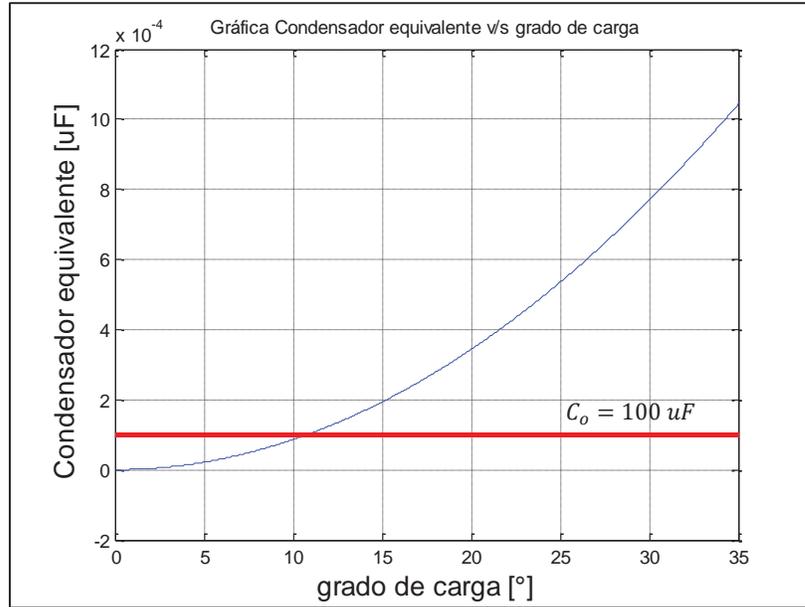


Figura 2-11 Gráfica del condensador equivalente $C_{eq}(\delta)$ para el caso del circuito n° 1.

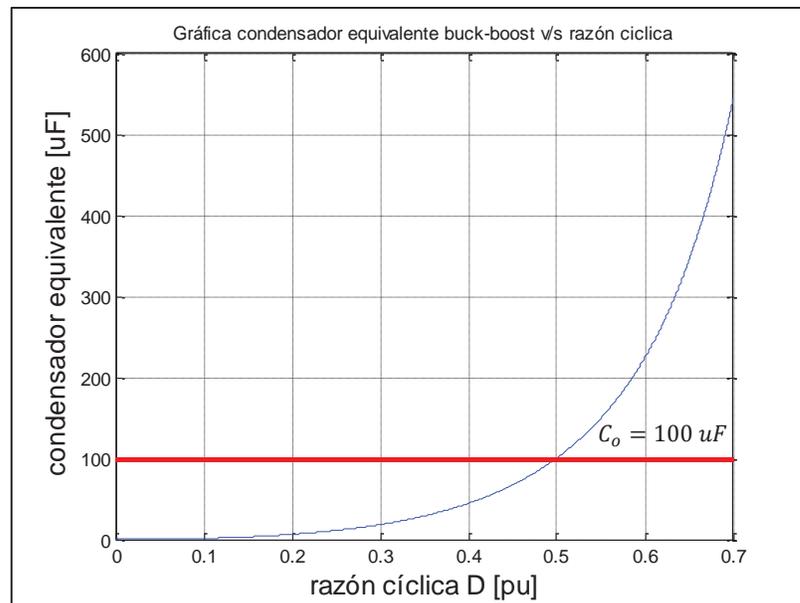


Figura 2-12 Gráfica del condensador equivalente $C_{eq}(D)$ para el caso del circuito n° 1.

2. Se reemplazan los valores en la ecuación (2-15) para encontrar $L_o = 2,7[mH]$.
3. Se presenta el comportamiento de la razón cíclica (D) como función del grado de carga δ para este caso reemplazando valores e igualando la ecuación (2-9) y (2-21):

$$D = \frac{\sqrt{\frac{2 - \sqrt{2} \cdot \sqrt{1 + \cos(\delta)}}{\omega^2 \cdot C \cdot L/2}}}{1 + \sqrt{\frac{2 - \sqrt{2} \cdot \sqrt{1 + \cos(\delta)}}{\omega^2 \cdot C \cdot L/2}}} \quad (2-22)$$

Reemplazando los datos y mostrando gráficamente el comportamiento de (2-22) en la Figura 2-13.

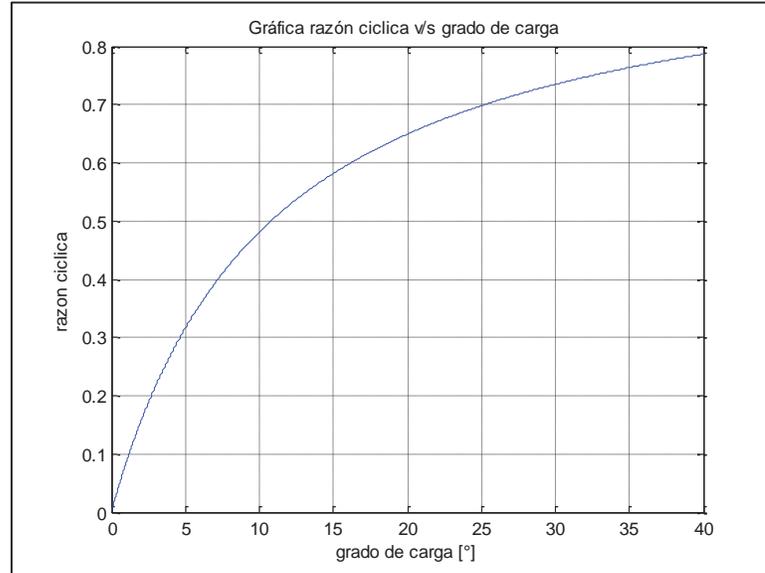


Figura 2-13 Gráfica de la razón cíclica D como función del grado de carga δ para el circuito n° 1.

En la Figura 2-13 se aprecia que al aumentar el grado de carga se requiere para conseguir la compensación de una razón cíclica (D) que se aproxima al valor máximo “uno” de manera asintótica, lo cual establece la importancia del límite de $D_{m\acute{a}x} = 0.7$ explicado en la sección 2.3 para el diseño de los componentes del compensador.

2.5.1 Simulaciones del circuito n° 1.

A continuación se presentan los resultados de la simulación del circuito de la Figura 2-10, para un caso arbitrario, donde según lo establecido en la sección 2.3 la razón cíclica (D) debe menor a 0.7.

Por la ecuación (2-22) para $\delta = 8^\circ$ $D = 0.4255$, produciendo la siguiente forma de onda de la tensión en la mitad de la línea en la Figura 2-14, seguida de sus respectivas formas de onda de tensión en los interruptores en la Figura 2-15.

2 SVC conmutado a alta frecuencia tipo buck-boost (CER-CAF-BB)

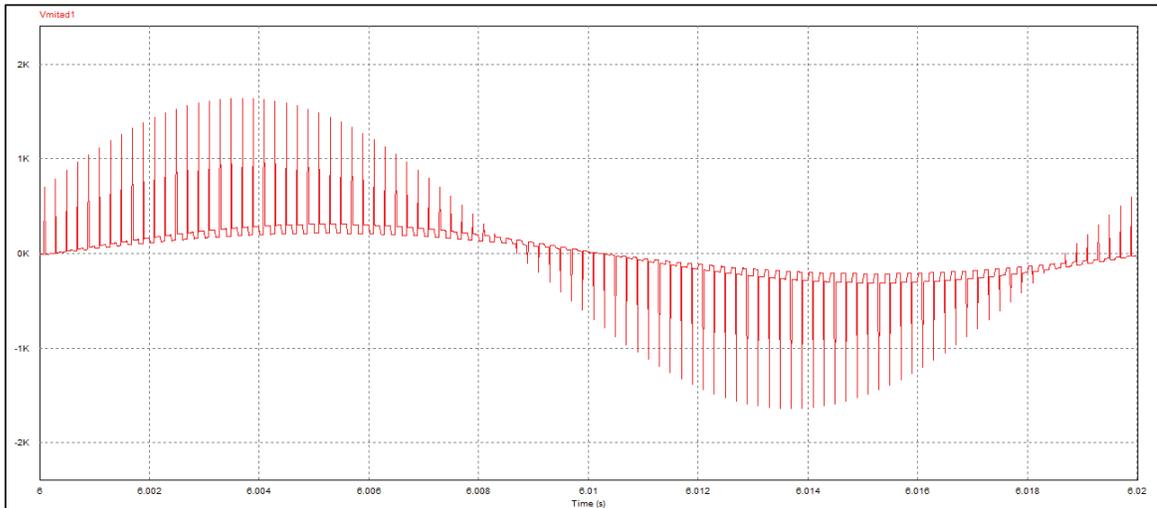


Figura 2-14 Forma de onda de la tensión en la mitad de la línea para el circuito n° 1.

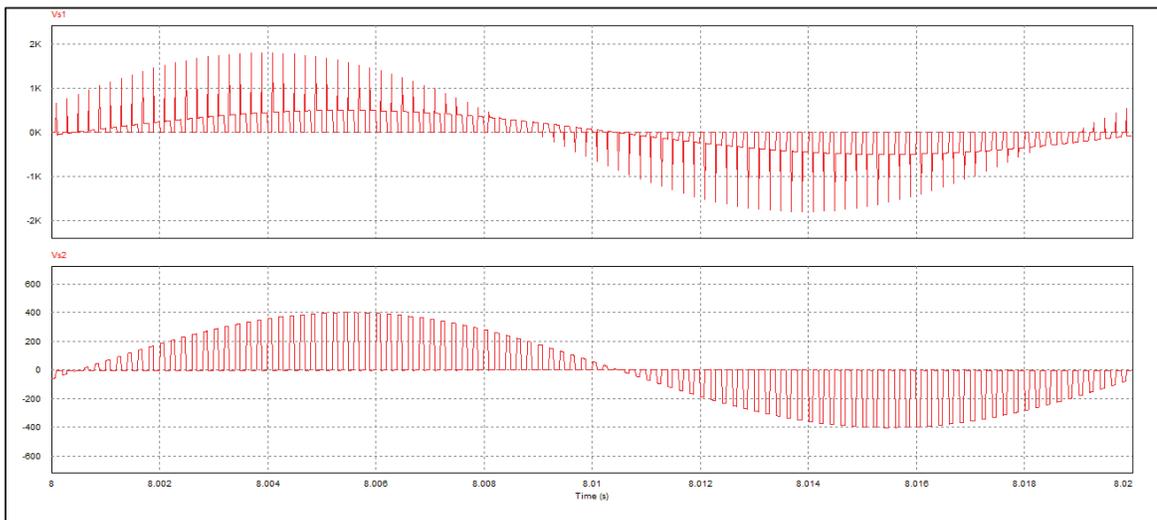


Figura 2-15 Formas de onda de tensión en los interruptores para el circuito n° 1.

En la Figura 2-14 se aprecia una sobretensión en la mitad de la línea, es decir, en la tensión que cae sobre el SVC, como producto de la tensión que cae en el interruptor S1 durante un pequeño intervalo de tiempo en la conmutación como se muestra en la Figura 2-15, este efecto se distingue mejor en la Figura 2-16, donde se realiza un zoom a las relevantes formas de onda para la conmutación en este circuito.

2 SVC conmutado a alta frecuencia tipo buck-boost (CER-CAF-BB)

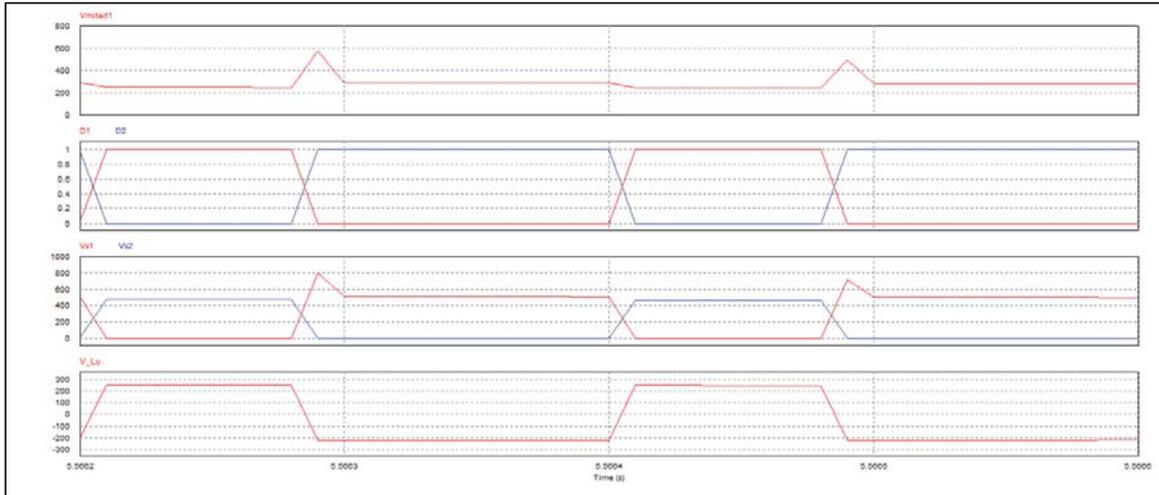


Figura 2-16 Conmutación del circuito n° 1.

En la Figura 2-16 se muestra que la sobretensión sucede cuando el interruptor S1 se apaga y cambia de polaridad la tensión sobre el inductor fijo, es decir, cada vez que se produce su proceso de descarga. Al no ser instantánea esta conmutación existe un ínfimo tiempo que atribuible al tiempo de paso de la simulación, que para todas las simulaciones es de 0.01 [ms], donde no se cierra el circuito inductivo y la descarga produce la sobretensión del convertidor.

Para apreciar mejor este efecto se presenta en la Figura 2-17 un acercamiento a la tensión y corriente producidas en el inductor durante la conmutación.

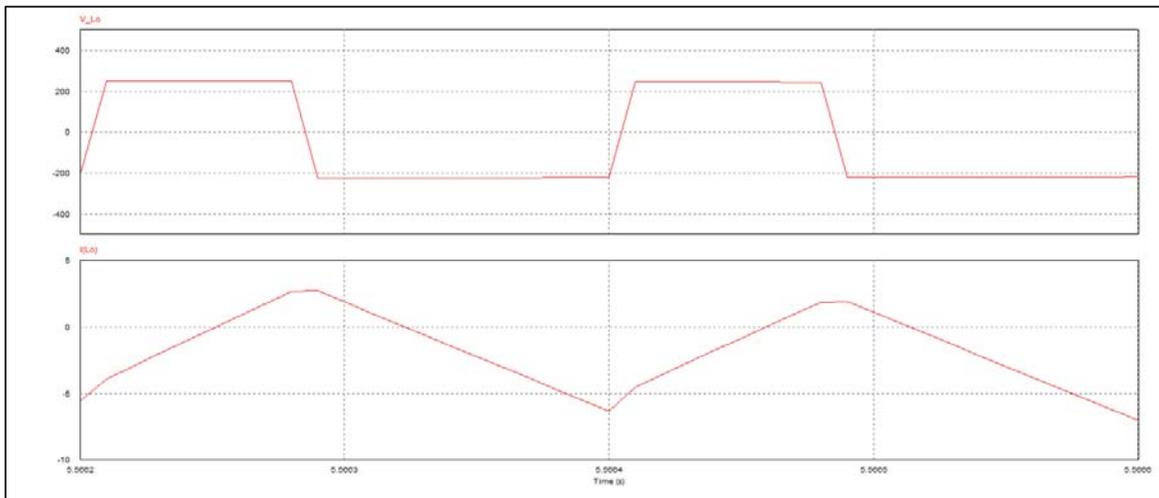


Figura 2-17 Zoom a la tensión y corriente por el inductor fijo durante la conmutación del circuito n° 1.

Dada la polaridad del voltímetro en el inductor de la Figura 2-10 se aprecia en la Figura 2-17 que la carga en el inductor se produce cuando la tensión es positiva y la descarga cuando la tensión es negativa, demostrando lo expuesto en Figura 2-16, debido a que la corriente no baja

instantáneamente en la conmutación sino que se mantiene constante durante el intervalo de 0.01 [ms].

Para eliminar este efecto se propone la instalación de un filtro que cierre todas las mallas posibles en todo intervalo de tiempo, por lo que se requiere establecer un nuevo módulo para que se produzca el adecuado funcionamiento de la configuración.

2.6 Módulo de Conmutación Propuesto

Debido a lo expuesto en 2.5.1 la topología del CER-CAF buck-boost propuesta requiere de instalar un filtro de armónicos, por lo que se introduce un filtro pasivo inductivo capacitivo "LC" a la estructura presentado en la Figura 2-18 por el condensador " C_{o2} " y por el inductor " L_{o2} ".

Luego al igual que en los casos anteriores, se substituye cada interruptor por dos IGBT y un diodo en antiparalelo a cada IGBT (interruptor bidireccional), mostrándose en la Figura 2-19.

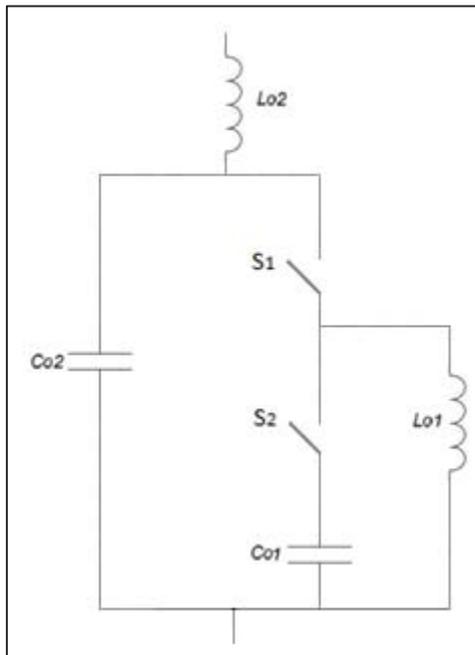


Figura 2-18 Nueva célula de Compensación tipo buck-boost (CER-CAF) simplificada.

Se observa que para este caso ambos condensadores fijos son fundamentales para una adecuada compensación de un sistema determinado y que a partir de estos se dimensionan los inductores del compensador de manera similar a lo mostrado en la sección 2.3.

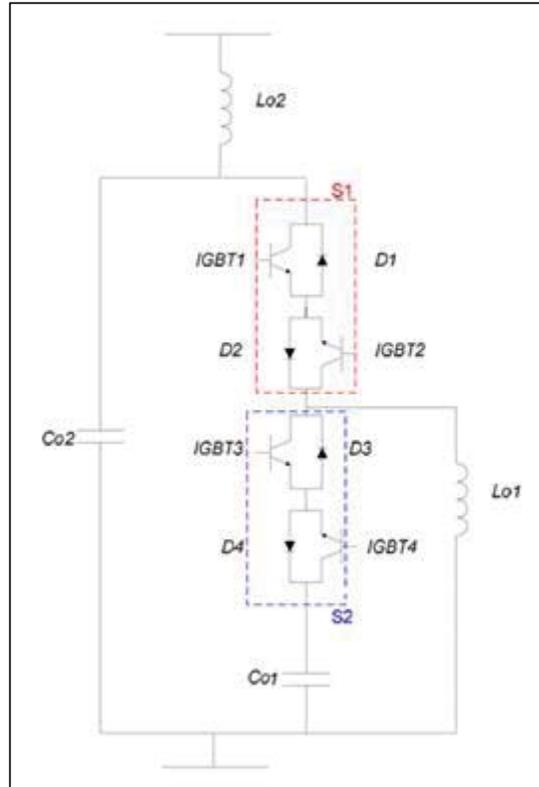


Figura 2-19 Nueva Célula de Compensación tipo buck-boost (CER-CAF-BB).

Cabe destacar que para que el convertidor funcione como un buck-boost tanto el condensador " C_{o2} " y por el inductor " L_{o1} ", no deben de afectar en mayor medida el valor de la reactancia equivalente del SVC para la frecuencia fundamental de la red, pero en el caso del condensador " C_{o2} " si o si va a aportar a la compensación por más pequeño que sea su valor por lo que la capacitancia equivalente de la ecuación (2-9) varía ligeramente a:

$$C_{eq}(D) = C_{o1} \cdot \left(\frac{D}{1-D} \right)^2 + C_{o2} \quad (2-23)$$

Por tanto los parámetros fijos se obtienen de la siguiente manera:

1. Condensador fijo " C_{o1} " depende del sistema donde se instale la estructura y para este trabajo en particular del modo de actuación del equivalente elevador o reductor.
2. Condensador fijo " C_{o2} " debe ser una fracción de " C_{o1} " y ambos condensadores deben responder a las ecuaciones de un sistema acondicionador de tensión AC-AC [11]:

$$C_{o1} = \frac{D}{F_S \cdot \gamma} \cdot \frac{P_S}{V_S^2} \quad (2-24)$$

2 SVC conmutado a alta frecuencia tipo buck-boost (CER-CAF-BB)

Donde " P_S " y " V_S " son la potencia activa y tensión a la salida del convertidor, " γ " es una fracción de la ondulación de tensión sobre el condensador " C_{o1} " y " F_S " es la frecuencia de conmutación de los interruptores.

Además el condensador fijo " C_{o2} " debe ser un comportarse como un filtro por ello:

$$C_{o2} = \frac{K * D^2}{\omega} \cdot \left(\frac{D}{1-D} \right)^2 \cdot \frac{P_S}{V_S^2} \quad (2-25)$$

Donde K es una fracción de la corriente RMS de entrada consumida por el condensador C_{o2} [11] y $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_{red}$.

Por lo que se puede obtener una fracción entre ambos condensadores fijos:

$$\frac{C_{o2}}{C_{o1}} = \frac{K \cdot D \cdot F_S \cdot \gamma}{2 \cdot \pi \cdot f_{red}} \cdot \left(\frac{D}{1-D} \right)^2 \quad (2-26)$$

3. Inductor fijo " L_{o1} " se obtiene de la ecuación (2-15).
4. Inductor fijo " L_{o2} " debe comportarse como una impedancia muy baja para la frecuencia de la red para no afectar al capacitor equivalente y el sistema debe percibirlo como un filtro pasa bajos.

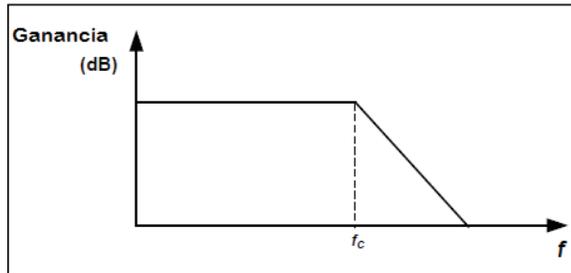


Figura 2-20 Ganancia de un filtro pasa bajos

Por lo que " L_{o2} " debe responder a la ecuación (2-27):

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{o2} \cdot C_{o2}}} \quad (2-27)$$

Es decir

$$L_{o2} = \frac{1}{(2\pi \cdot f_c)^2 \cdot C_{o2}} \quad (2-28)$$

Donde la frecuencia de corte (f_c) debe ser una década menor, que la frecuencia de los interruptores, es decir, 10 veces menos [8] [12].

2.7 Ejemplo de proyecto n° 2

El nuevo compensador instalado en la mitad de la línea que une a dos máquinas, denominado como circuito n° 2.

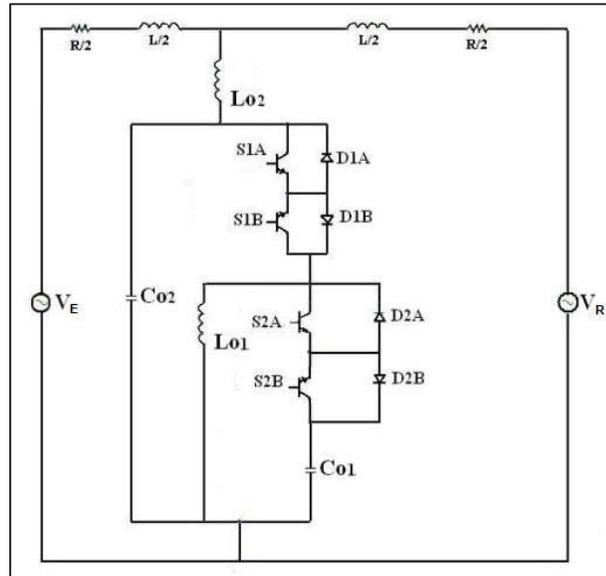


Figura 2-21 Esquema del circuito n° 2.

Mismos datos que en el ejemplo de proyecto n°1, es decir:

$$\vec{V}_E = 220_{RMS} \angle 0^\circ \text{ [V]}.$$

$$\vec{V}_R = 220_{RMS} \angle -\delta^\circ \text{ [V]}.$$

Parámetros de la línea $R = 10[\text{m}\Omega]$ y $L = 1800 [\mu\text{H}]$.

Frecuencia de conmutación=5[kHz].

Donde se simula para 2 casos uno en modo buck o reductor y otro Modo boost o elevador de la capacitancia fija C_{o1} , siguiendo los siguientes pasos, para presenciar el comportamiento de este compensador:

1. Cálculo de parámetros fijos:
 - A. Condensador fijo " C_{o1} ": mismo caso que en el circuito 1 igual a 100 [uF], para demostrar los efectos de que el SVC funcione como condensador buck-boost.
 - B. Condensador fijo " C_{o2} ": Se reemplazan en la ecuación (2-26) los siguientes valores: $K = \gamma = 5\%$ [11] y $D = D_{max} = 0.7$ [8]

Por lo que se puede obtener una fracción entre ambos condensadores fijos:

$$C_{o2} = 0.15 * C_{o1} = 15 \text{ [}\mu\text{F]} \quad (2-29)$$

C. Inductor fijo " L_{o1} ": mismo caso que en el circuito n°1 $L_{o1} = 2.7 \text{ [mH]}$.

D. Inductor fijo " L_{o2} ": reemplazando valores en la ecuación (2-28)

$$L_{o2} = 6.8 \text{ [mH]}.$$

2. Reemplazando los datos se muestra gráficamente en la Figura 2-22, el comportamiento de la ecuación (2-21) incorporando los puntos de operación a utilizar para poder compensar los reactivos de la línea, junto con el hecho que $C_{base} = C_{o1}$ al igual que en el caso del circuito 1. Donde se proponen los siguientes casos:

Caso 1: Grado de carga $\delta_1 = 8^\circ$, que representa el modo buck o reductor debido a que $C_{eq}(\delta)$ es menor a 1 pu en este caso.

Caso 2: Grado de carga $\delta_2 = 15^\circ$, que representa el modo boost o elevador debido a que $C_{eq}(\delta)$ es mayor a 1 pu en este caso.

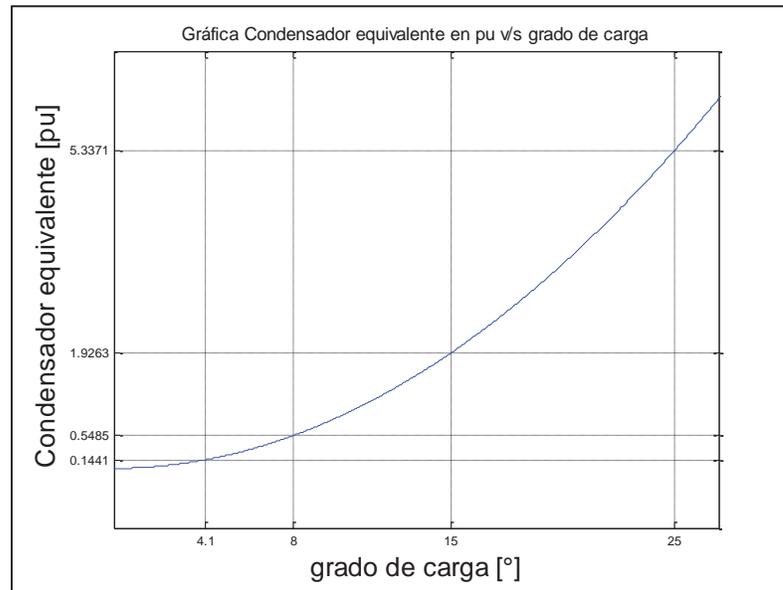


Figura 2-22 Gráfica de los puntos de operación del condensador equivalente $C_{eq}(\delta)$ para el circuito n°2.

3. Se requiere del comportamiento de la razón cíclica D requerida como función del grado de carga δ , para este caso reemplazando valores e igualando las ecuaciones (2-21) y (2-23) se aprecia la ecuación (2-30) en la Figura 2-23.

$$D(\delta) = \frac{\sqrt{\frac{2 * (2 - 2 \cdot \cos[\delta/2])}{\omega^2 \cdot L \cdot C_{o1}} - \frac{C_{o2}}{C_{o1}}}}{1 + \sqrt{\frac{2 \cdot (2 - 2 \cdot \cos[\delta/2])}{\omega^2 \cdot L \cdot C_{o1}} - \frac{C_{o2}}{C_{o1}}}}} \quad (2-30)$$

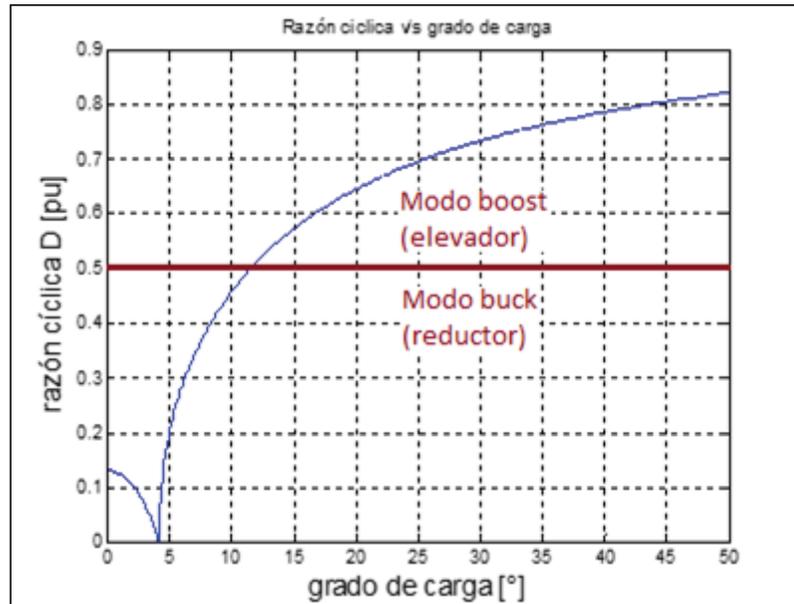


Figura 2-23 Gráfica de la razón cíclica D como función del grado de carga δ para el circuito n° 2.

En la Figura 2-23 además de apreciarse que al igual que en la Figura 2-13 al aumentar el grado de carga se requiere para conseguir la compensación de una razón cíclica (D) que se aproxima al valor máximo “uno” de manera asintótica, se deben tener en cuenta los modos de operación del circuito n° 2.

Estableciendo límites en los grados de carga, para que el compensador funcione de manera correcta, producto de las magnitudes de sus componentes, especialmente de los condensadores fijos.

Finalmente se presenta en la Figura 2-24 una gráfica donde aparecen los puntos de operación a simular de la razón cíclica (D) como función del grado de carga δ para diferentes casos en el circuito n° 2.

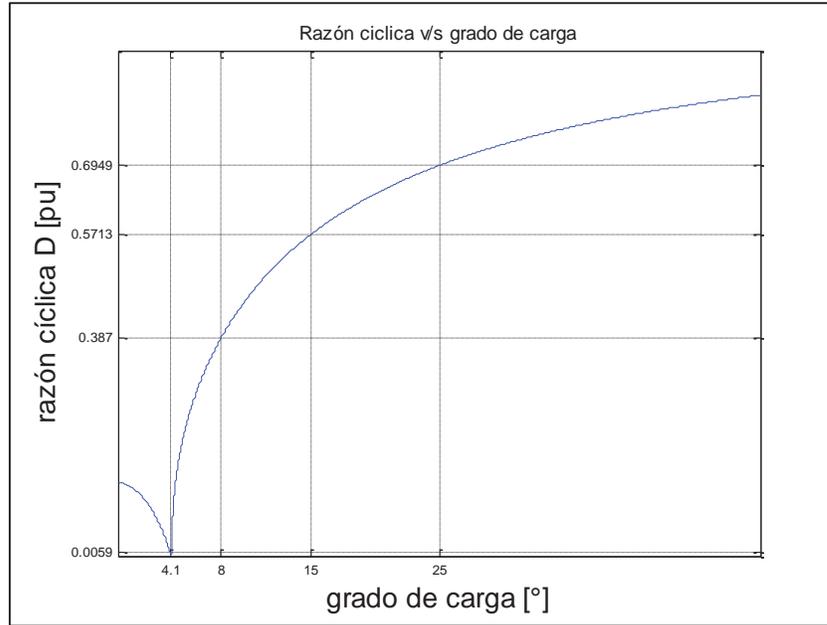


Figura 2-24 Gráfica de los puntos de operación a simular de la razón cíclica D como función del grado de carga δ para circuito n° 2.

La Figura 2-24 indica que existe un rango de compensación que comienza alrededor de los 4° y termina en la razón cíclica 0.7 es decir alrededor de los 25°.

2.7.1 Control de la magnitud de la tensión.

En el caso de este sistema se puede aprovechar el hecho del comportamiento del ángulo de la tensión en la mitad de línea es impuesto por la ecuación (2-19) esté o no compensado el sistema, por lo que se pueden tomar muestras de tensión en el programa PSIM a través del circuito de la figura y usando el bloque Math Function, que calcula automáticamente la razón cíclica que se requiera para la compensación utilizando la ecuación (2-30).

Realizando un control en lazo cerrado, debido a que si la salida que es la tensión en la mitad de la línea cambia, mediante la entrada que es la razón cíclica de los interruptores, la regula para que esté en el valor adecuado, pero la respuesta en estados transitorios depende directamente de los bloques del programa computacional y sobre todo del paso de simulación por lo que sólo se garantiza que realiza un adecuado disparo de los interruptores en régimen permanente.

La conmutación de los semiconductores se realiza mediante la modulación PWM en la cual se compara la razón cíclica valor constante en régimen permanente con una señal diente de sierra cuya magnitud máxima es “uno” que posee la frecuencia de conmutación, para generar los adecuados disparos, presentando en la Figura 2-25 el circuito de control monofásico en PSIM.

2 SVC conmutado a alta frecuencia tipo buck-boost (CER-CAF-BB)

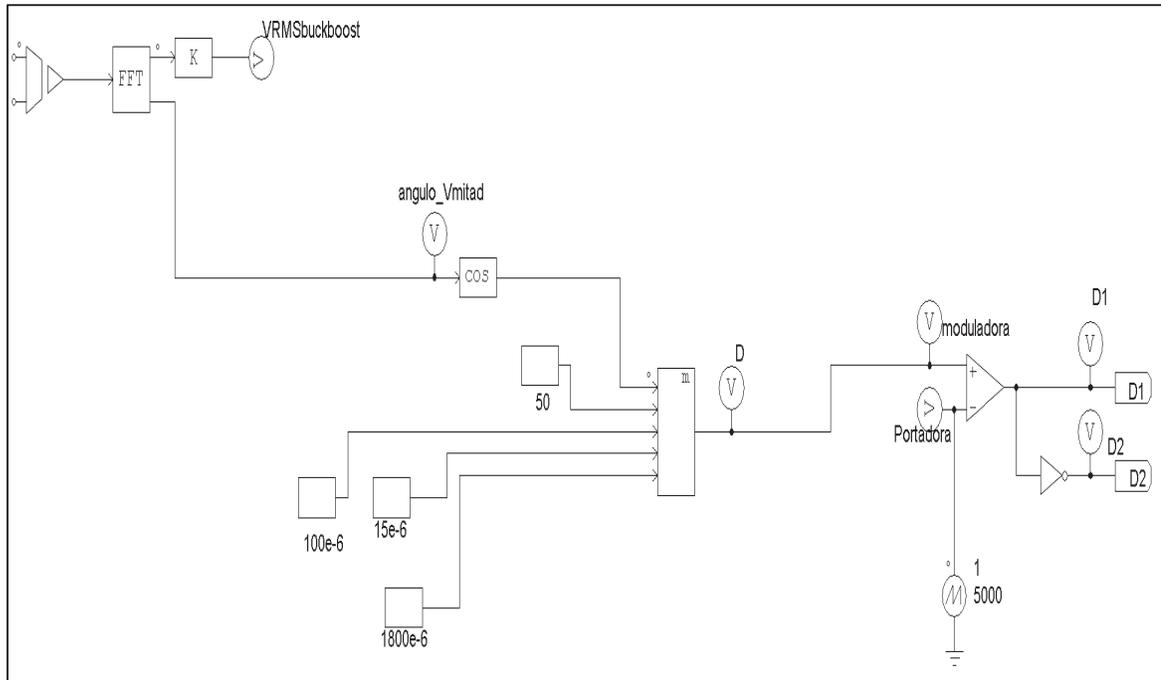


Figura 2-25 Circuito de control monofásico en PSIM

D1 y D2 representan dos puntos de conexión del programa, utilizando la herramienta “label” del simulador PSIM, es decir si en el circuito existen dos “label” iguales quiere decir que estos puntos se encuentran conectados.

El elemento de la Figura 2-26 es el denominado “voltage sensor”, permite tomar muestras de la tensión conectándolo en paralelo a una red, facilitando el uso del bloque de la transformada rápida de Fourier o en inglés Fast Fourier Transform (FFT) mostrado en la Figura 2-27 que posee a través de sus dos salidas la facultad de descomponer la señal que ingresa al bloque, mostrando por la salida de arriba la amplitud máxima de la componente sinusoidal fundamental de la señal de entrada y por la salida de abajo el ángulo de esa señal fundamental en grados.

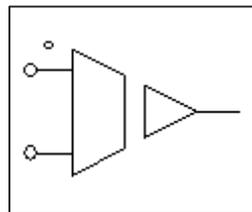


Figura 2-26 Bloque “Voltage Sensor” de PSIM

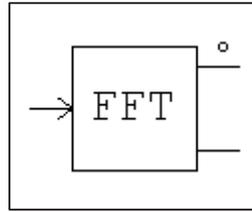


Figura 2-27 Bloque “Fast Fourier Transform” (FFT) de PSIM

El bloque “K” (Proportional) mostrado en la Figura 2-28 multiplica la señal que ingresa por una ganancia en este caso la divide por raíz de dos, para en cada simulación cerciorarse que la señal de salida sea el valor eficaz de la sinusoidal fundamental requerida.

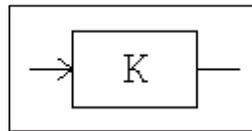


Figura 2-28 Bloque “Proportional” de PSIM

El bloque “cos” (Cosine) mostrado en la Figura 2-29 arroja a su salida el valor del coseno de la señal a su entrada que debe estar en grados, para facilitar el uso del bloque el bloque Math Function presentado en la Figura 2-3. En este caso posee 5 entradas, donde cada una de ellas es una señal, las cuales se combinan en una función de salida, que particularmente es cada razón cíclica (D) requerida y cuya ecuación es representada en (2-30).

Se ingresan cuatro constantes mediante cuatro bloques “constant”: la frecuencia de la red, los condensadores fijos " C_{o1} " y " C_{o2} " y la inductancia de la línea, para apreciar el circuito de control en la Figura 2-25.

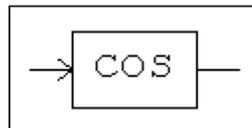


Figura 2-29 Bloque “Cosine” de PSIM

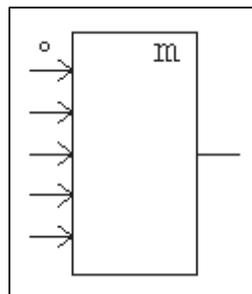


Figura 2-30 Bloque “Math function” de PSIM

2.7.2 Simulaciones del circuito n° 2

En la Figura 2-31 se presenta el denominado circuito n° 2 en PSIM, donde se simula el esquema de la Figura 2-21 utilizando el control de la Figura 2-25.

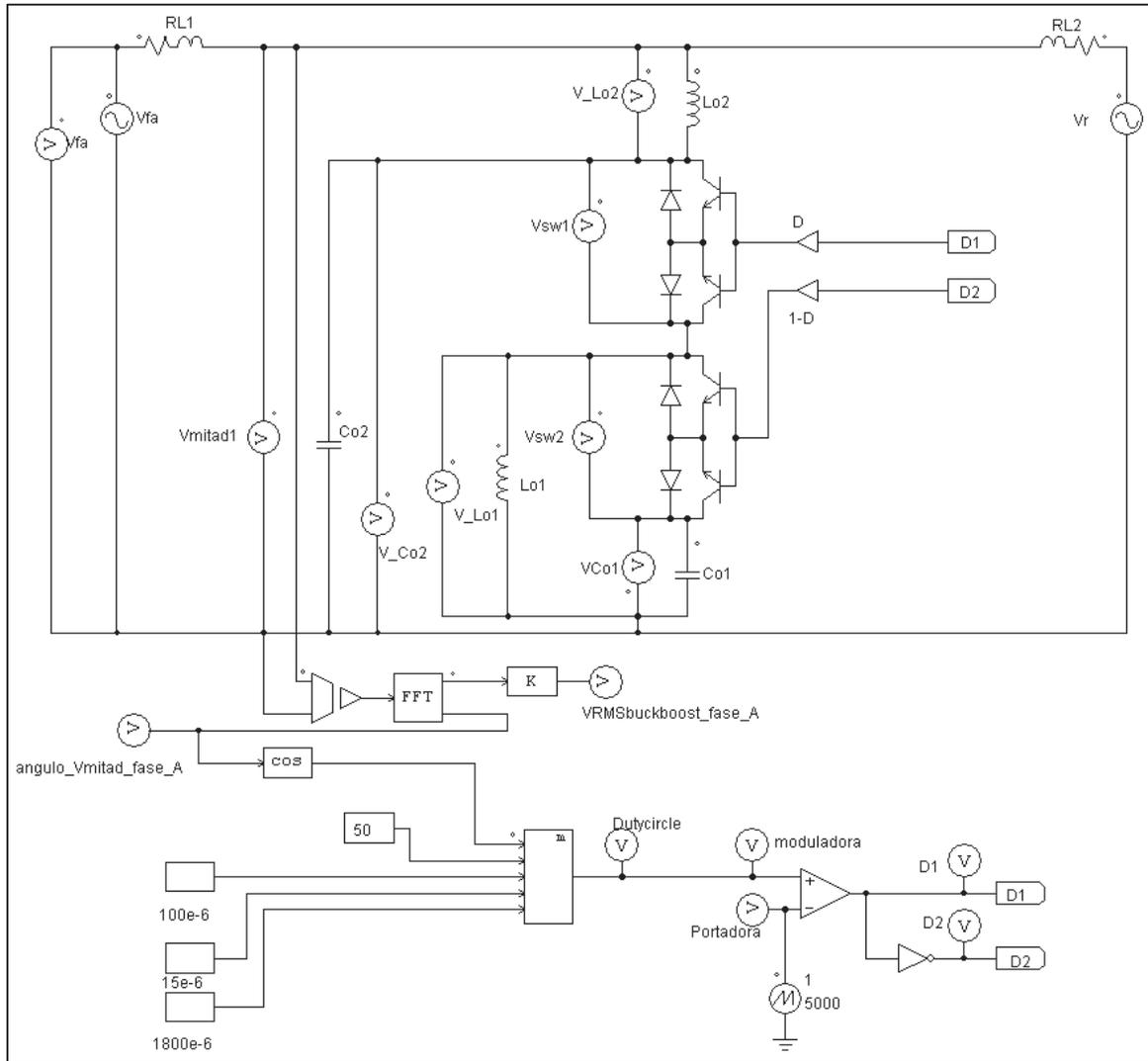


Figura 2-31 Circuito n° 2 en PSIM

En la Figura 2-32 se muestra la forma de onda de la tensión en la mitad de la línea comparándola con la de la fuente emisora para el caso n° 1, es decir, $\delta_1 = 8^\circ$, modo buck (reductor) en régimen permanente.

Además en la Figura 2-33 se presenta la tensión en los interruptores, apreciándose que se soluciona el problema de las sobretensiones indeseadas.

2 SVC conmutado a alta frecuencia tipo buck-boost (CER-CAF-BB)

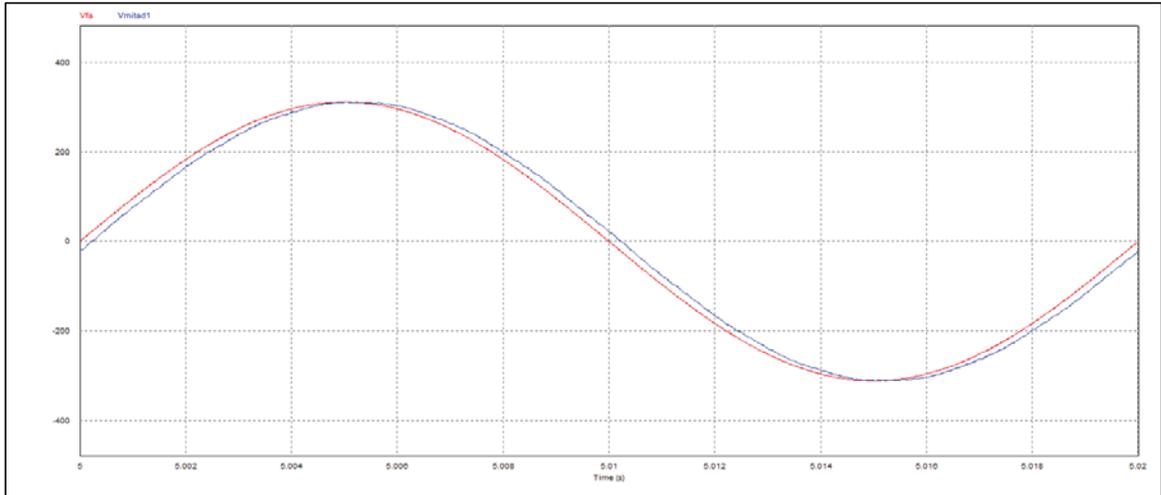


Figura 2-32 Formas de onda de tensión en la mitad de la línea y en la fuente emisora para el circuito n° 2 en modo buck.

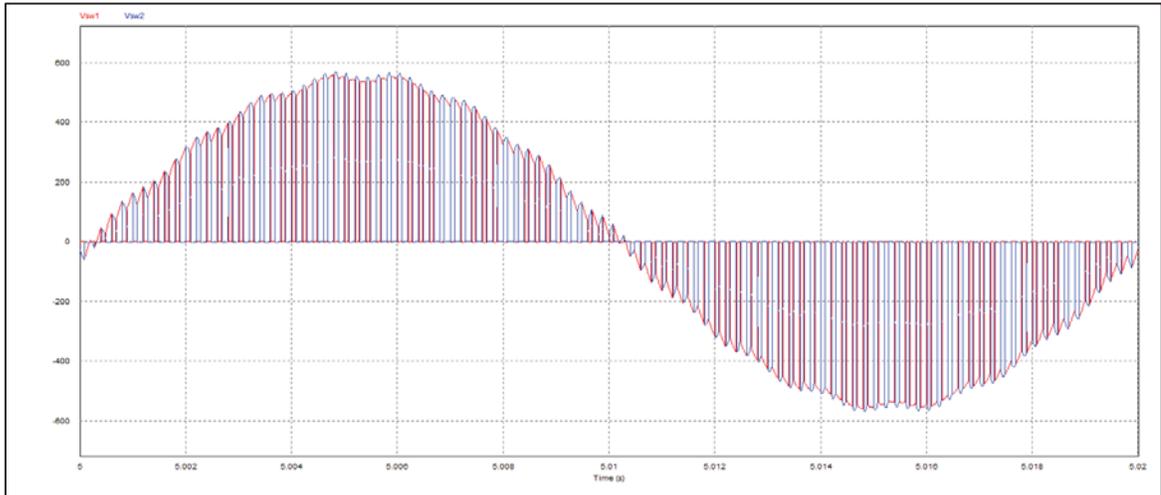


Figura 2-33 Formas de onda de tensión en los interruptores para el circuito n° 2 en modo buck.

Además utilizando la herramienta FFT de PSIM se conoce la amplitud máxima y el ángulo de la componente fundamental de las tensiones tanto en el extremo emisor como en la mitad de la línea.

Tabla 2-1 Componente fundamental de la tensión en la fuente y en la mitad de la línea para el caso n° 1 del circuito n° 2.

Frecuencia [Hz]	$ V_{fa_max} $ [V]	$\angle V_{fa}$ °	$ V_{mitad_max} $ [V]	$\angle V_{mitad}$ °
50	311.204	-0.090	311.354	-4.097

2 SVC conmutado a alta frecuencia tipo buck-boost (CER-CAF-BB)

Luego se presentan en las Figuras 2-34 y 2-35 las mismas formas de onda de tensión que en el caso n° 1, para el caso n° 2 con $\delta_2 = 15^\circ$, es decir, para modo boost en régimen permanente del circuito n° 2, apreciándose que al igual que en el modo buck se soluciona el problema de las sobretensiones indeseadas en este modo de funcionamiento.

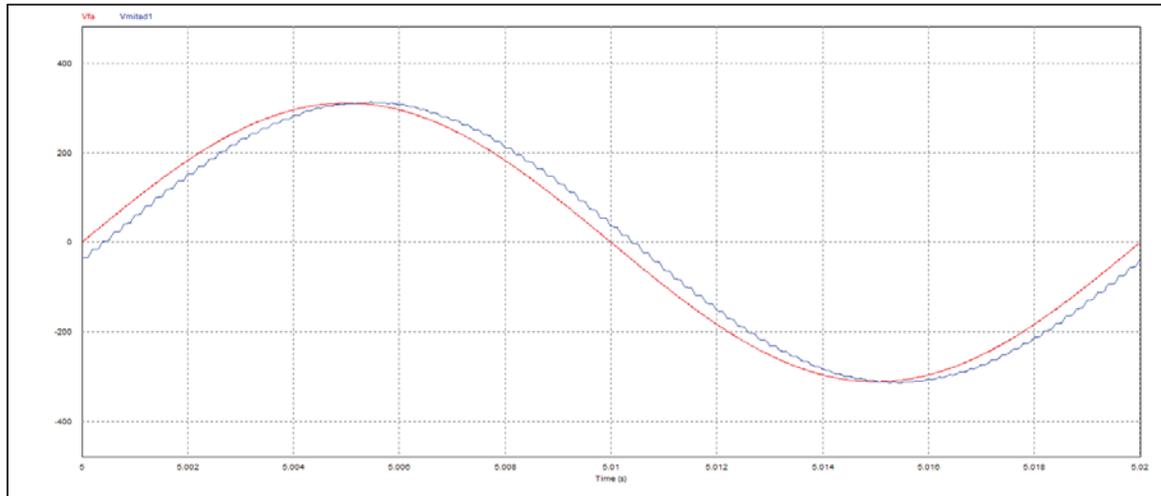


Figura 2-34 Formas de onda de tensión en la mitad de la línea y en la fuente emisora para el circuito n° 2 en modo boost.

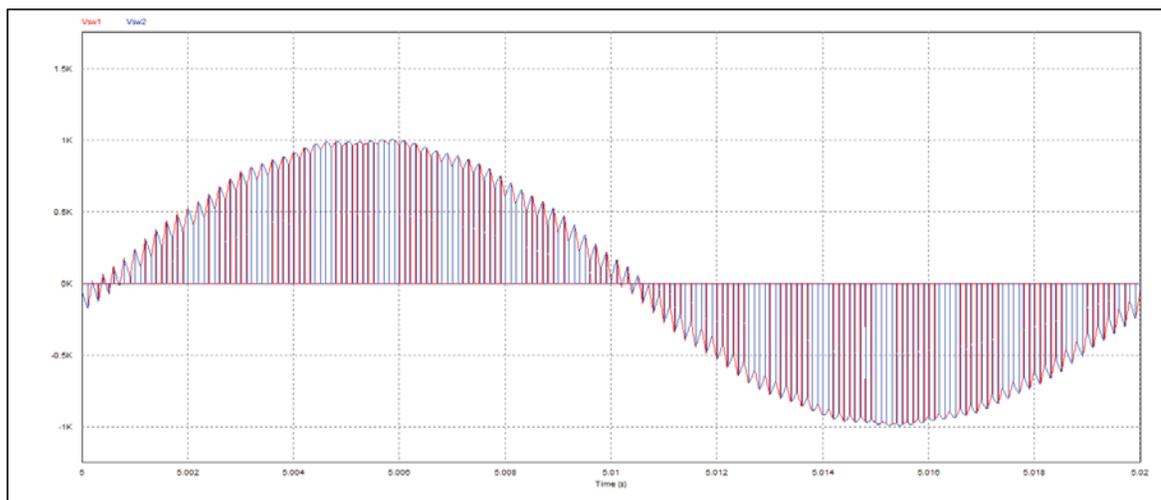


Figura 2-35 Formas de onda de tensión en los interruptores para el circuito n° 2 en modo boost.

Además al igual que en el caso n° 1, se utiliza la herramienta FFT de PSIM para conocer la amplitud máxima y el ángulo de la componente fundamental, tanto en la tensión del extremo emisor como en la mitad de la línea.

2 SVC conmutado a alta frecuencia tipo buck-boost (CER-CAF-BB)

Tabla 2-2 Componente fundamental de la tensión en la fuente y en la mitad de la línea para el caso n° 2 del circuito n° 2.

Frecuencia [Hz]	$ V_{fa_max} $ [V]	$\angle V_{fa}^\circ$	$ V_{mitad_max} $ [V]	$\angle V_{mitad}^\circ$
50	311.121	0.267	312.448	-7.246

Cabe destacar que se presentan las tensiones en los interruptores en las Figuras 2-33 y 2-35 para mostrar que producto del funcionamiento del convertidor como buck boost, éstos deben soportar tensiones mayores que la impuesta en la entrada, al igual como ocurre en un convertidor DC-DC [9]. Esta tensión es fundamental a la hora de proyectar cuales son los semiconductores que deben utilizarse, para compensar cualquier sistema de potencia y que posee componentes armónicas de alta frecuencia que no interfieren en demasía en la forma de onda que interesa que corresponde a la de tensión en la mitad de la línea, cuya forma es prácticamente sinusoidal en ambos casos.

Además dado los valores de las Tablas 2-1 y 2-2, se comprueban tanto la magnitud como la fase de la tensión fundamental correspondientes, es decir, se produce el efecto deseado al instalar el compensador.

2.8 Extensión trifásica del circuito.

En la Figura 2-36 se presenta la extensión trifásica del circuito a compensar donde se requieren de tres compensadores que pueden ser conectados en delta o estrella en el punto de compensación, que como en todos los casos es en la mitad de la línea.

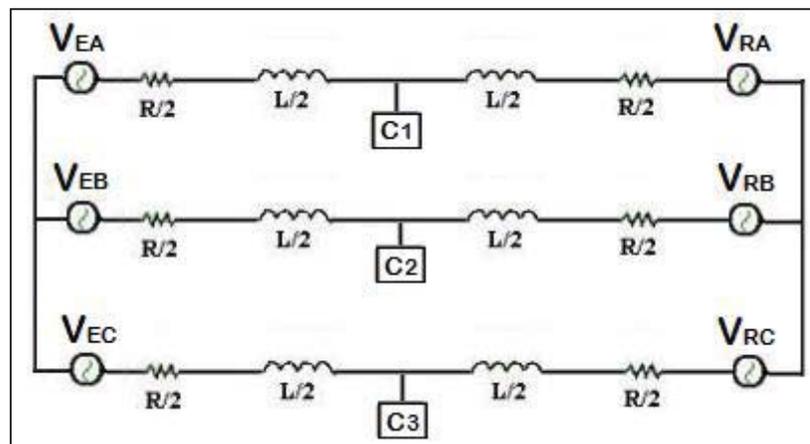


Figura 2-36 Extensión trifásica a compensar.

Se usan los mismos datos que en el ejemplo de proyecto n°2, para la fase “a” es decir:

$$\vec{V}_{EA} = 220_{RMS} \angle 0^\circ \text{ [V]}$$

$$\vec{V}_{RA} = 220_{RMS} \angle -\delta^\circ \text{ [V]}$$

Otras fuentes misma magnitud de tensión y 120° de desfase entre las fuentes de cada fase de cada extremo.

Parámetros de la línea $R=10[\text{m}\Omega]$ y $L=1800 [\mu\text{H}]$

Frecuencia de conmutación= $5 [\text{kHz}]$.

2.8.1 Compensador conectado en estrella.

En la Figura 2-37 se presenta la extensión trifásica del circuito a compensar conectado en estrella en el punto de compensación.

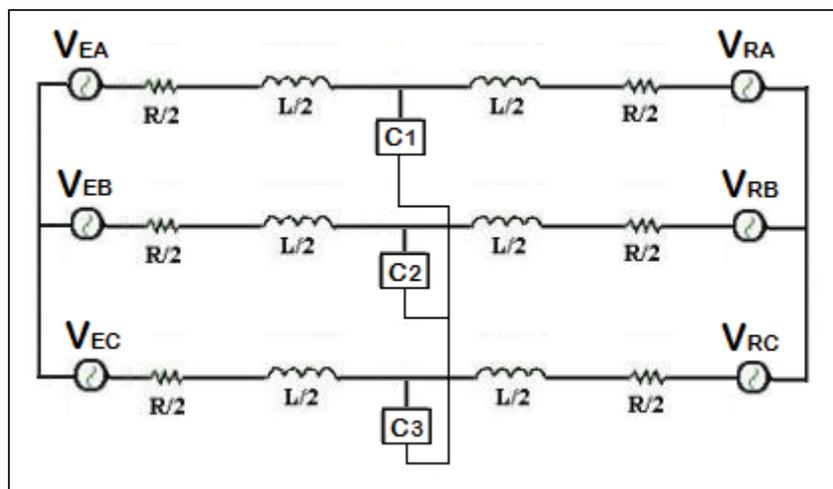


Figura 2-37 Circuito trifásico con los compensadores conectados en estrella.

Cada compensador del banco posee igual capacitancia y se obtienen mediante un equivalente monofásico idéntico al utilizado en el circuito n° 2, es decir sigue siendo $D(\delta)$ regida por la ecuación 2-30 donde para el caso $\delta^\circ = 15^\circ D(\delta) = 0.5713$.

2.8.2 Simulaciones del circuito n° 3.

En la Figura 2-38 se presenta el denominado circuito n° 3 en PSIM, donde se simula el esquema de la Figura 2-37, para el caso $\delta^\circ = 15^\circ D(\delta) = 0.5713$.

Se debe hacer hincapié que sólo se toman muestras de tensión en la fase “a” para accionar todos los interruptores debido a que el sistema es equilibrado y para disminuir el tiempo que demora el programa en simular. En la realidad se debe utilizar un control distinto para cada fase.

Además se aprecia que los SVC no están conectados al neutro de la fuente, ni el sistema se encuentra puesto a tierra, debido a que el simulador sólo posee una tierra y esto puede provocar problemas entre el circuito de control y el circuito de potencia.

2 SVC conmutado a alta frecuencia tipo buck-boost (CER-CAF-BB)

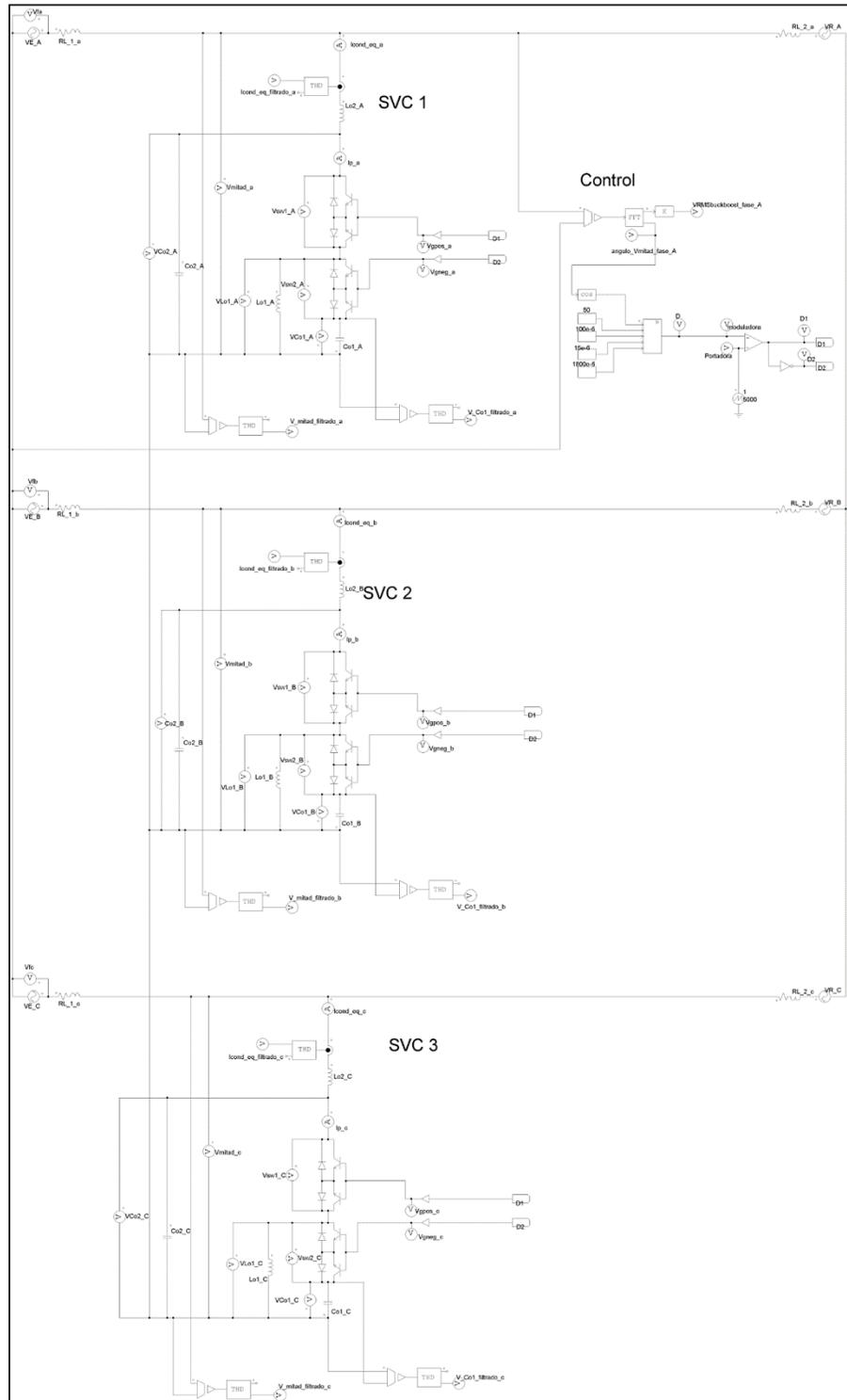


Figura 2-38 Circuito completo n° 3 en PSIM.

2 SVC conmutado a alta frecuencia tipo buck-boost (CER-CAF-BB)

En la Figura 2-39 se presentan las formas de onda de tensión en la mitad de la línea por fase del circuito n° 3 para el punto de operación cuyo valor corresponde a los 220 [Vrms] igualándose al de la fuente emisora en estrella, apreciándose una ligera distorsiones, es decir el compensador realiza su trabajo convenientemente.

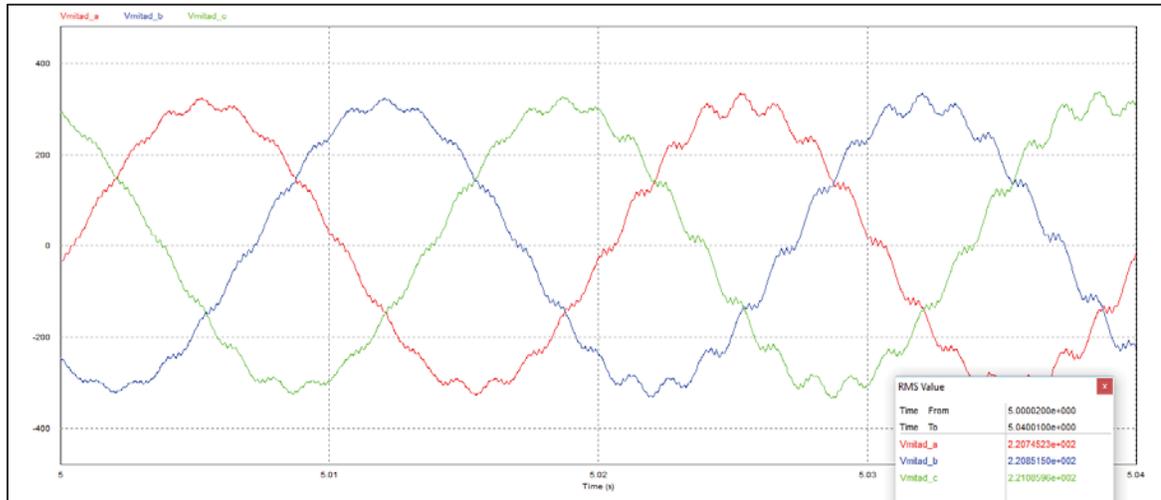


Figura 2-39 Formas de onda de tensión en la mitad de la línea por fase del circuito n° 3 para el punto de operación.

En la Figura 2-40 se presentan las corrientes que circulan a la entrada de cada SVC, donde se aprecia que el filtro realiza un buen trabajo debido a que las corrientes tienden a ser sinusoidales a pesar de producirse unas ligeras distorsiones de altas frecuencias por lo que este efecto es despreciable.

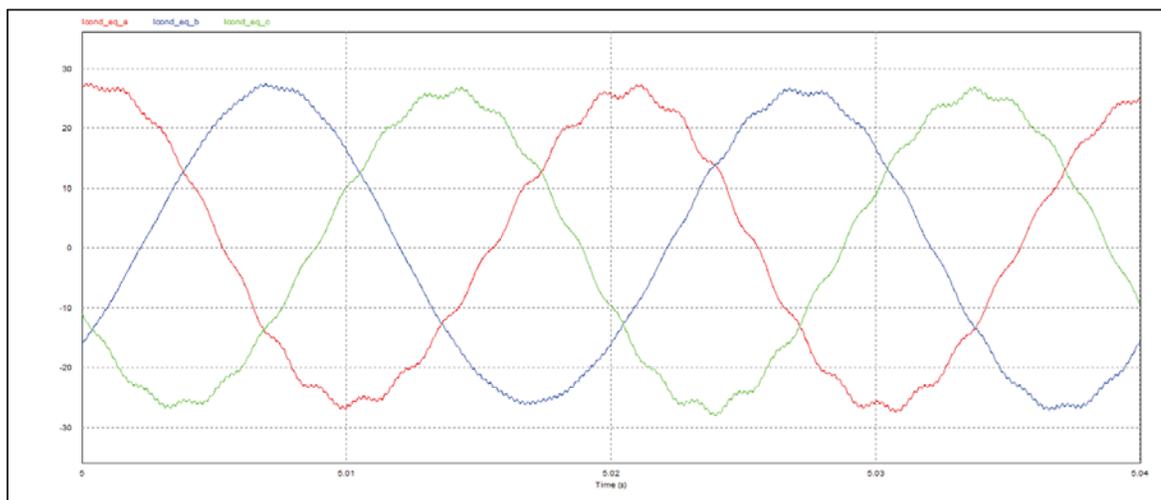


Figura 2-40 Formas de onda de las corrientes que circulan en la entrada de cada fase del SVC en el circuito n° 3.

2 SVC conmutado a alta frecuencia tipo buck-boost (CER-CAF-BB)

En Figura 2-41, se realiza un análisis de armónicos de las corrientes de la Figura 2-40, mediante la herramienta FFT del software PSIM, apreciándose las magnitudes correspondientes a cada armónico hasta una frecuencia de 2500 [Hz] (armónico número 50) que es el último que requiere de análisis según la norma [13], mostrando que prácticamente la corriente no posee armónicos en baja frecuencia.

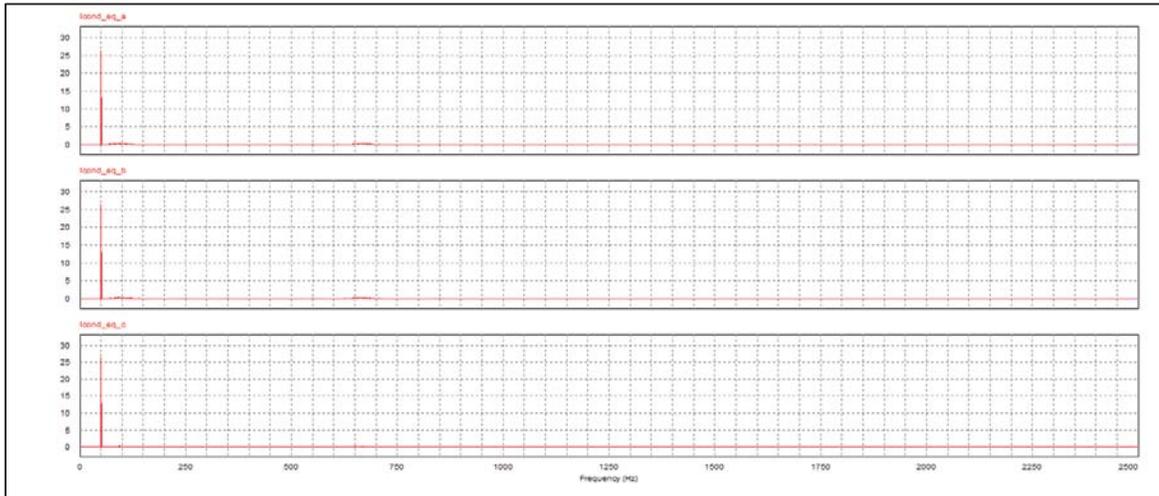


Figura 2-41 Espectro armónico de la corriente de entrada en los SVC del circuito n° 3.

Para finalizar el análisis de este caso se presenta en la Figura 2-42 las tensiones en los interruptores correspondientes a la fase “a” del circuito n° 3, donde se aprecia que al igual que en el caso del circuito n° 2, que corresponde a la Figura 2-35, no se altera en demasía en la forma de onda sinusoidal por tramos que es de interés para la formación de tensión en la mitad de la línea que es prácticamente sinusoidal, mostrada en Figura 2-39.

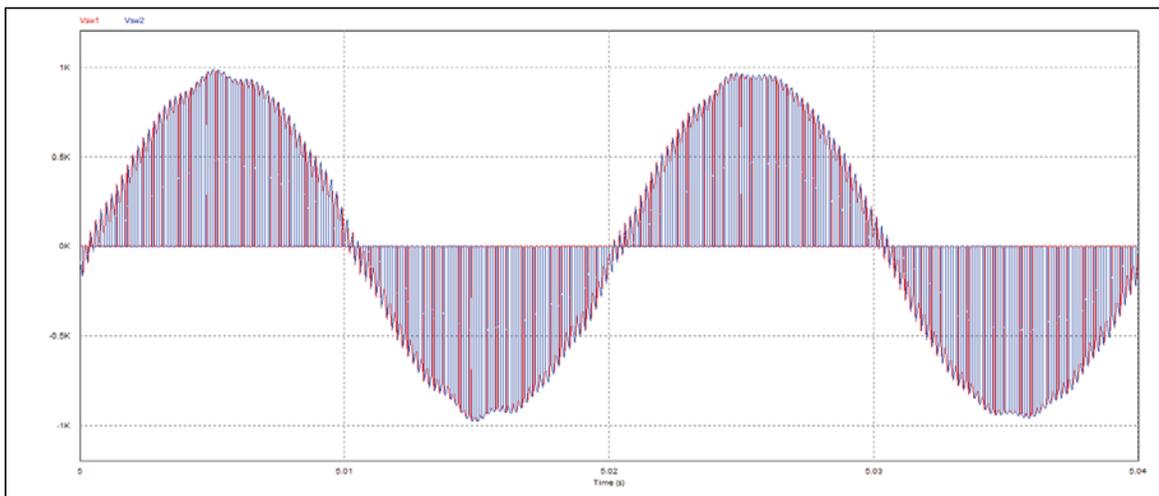


Figura 2-42 Tensiones en los interruptores en la fase “a” del circuito n° 3.

2.8.3 Compensador conectado en delta.

En la Figura 2-43 se presenta la extensión trifásica del circuito a compensar conectado en delta en el punto de compensación.

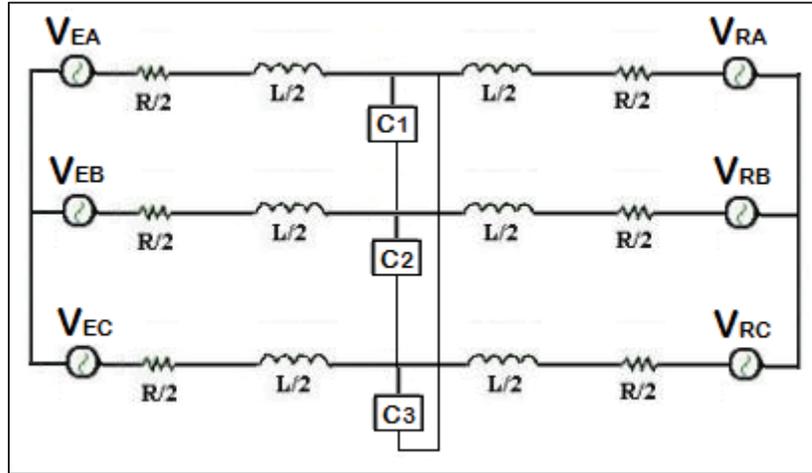


Figura 2-43 Esquema del Compensador conectado en delta

Un condensador conectado en delta equivale a 3 veces el conectado en estrella por lo que para producir el mismo efecto del banco anterior, cada condensador equivalente debe reducirse 3 veces por lo que ahora la ecuación 2-30 cambia a:

$$D(\delta) = \frac{\sqrt{\left(\frac{1}{3}\right) \cdot \frac{2 \cdot (2 - \sqrt{2} \cdot \sqrt{1 + \cos[\delta]})}{\omega^2 \cdot L \cdot C_{o1}} - \frac{C_{o2}}{C_{o1}}}}{1 + \sqrt{\left(\frac{1}{3}\right) \cdot \frac{2 \cdot (2 - \sqrt{2} \cdot \sqrt{1 + \cos[\delta]})}{\omega^2 \cdot L \cdot C_{o1}} - \frac{C_{o2}}{C_{o1}}}} \quad (2-31)$$

Por lo que ahora el disparo de los interruptores en Caso $\delta^\circ = 15^\circ$ es $D(\delta) = 0.4123$.

Además dado el efecto anterior, el inductor L_{o2} debe modificarse y ser 3 veces mayor para que actúe correctamente como filtro corriente, dado que el condensador equivalente es 3 veces menor.

2.8.4 Simulaciones del circuito n°4

En la Figura 2-44 se presenta el esquema de la Figura 2-43 de la simulación en el programa PSIM, destacando que como cambia la función $D(\delta)$ según ecuación (2-31), se decide realizar esta simulación únicamente en lazo abierto, para el punto de operación indicado en 2.8.3, presentando las mismas formas de onda que para el caso del circuito n° 3.

2 SVC conmutado a alta frecuencia tipo buck-boost (CER-CAF-BB)

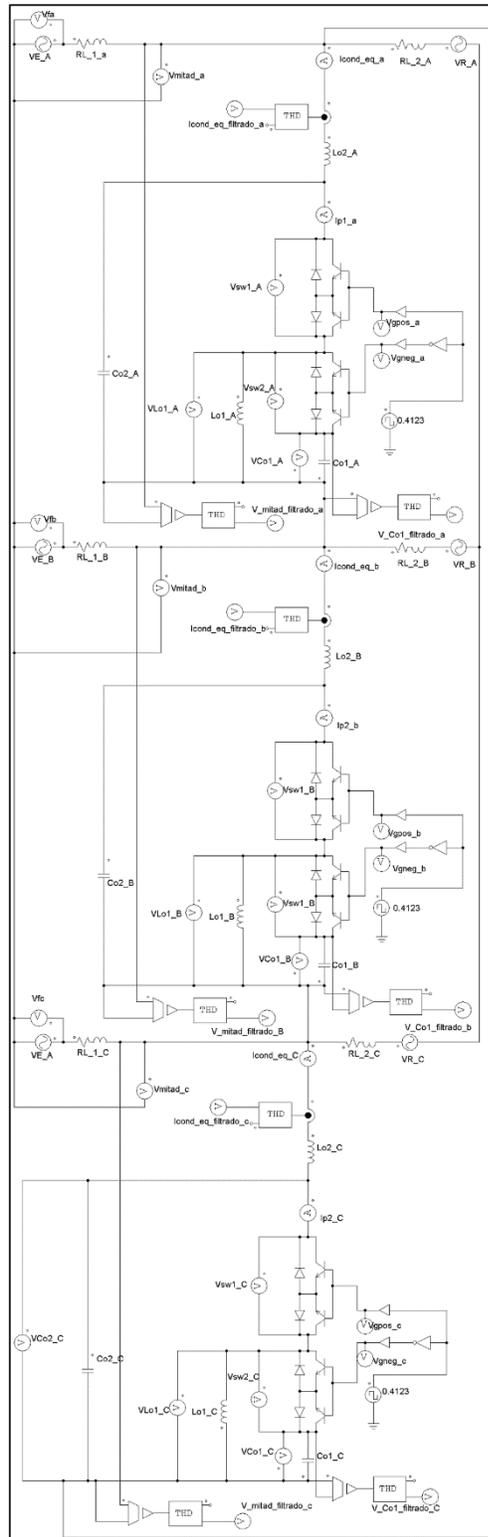


Figura 2-44 Circuito completo n° 4 en PSIM

2 SVC conmutado a alta frecuencia tipo buck-boost (CER-CAF-BB)

En la Figura 2-45 se presentan las formas de onda de tensión en la mitad de la línea por fase del circuito n° 4 para el punto de operación cuyo valor corresponde a los 220 [Vrms] igualándose al de la fuente emisora en estrella.

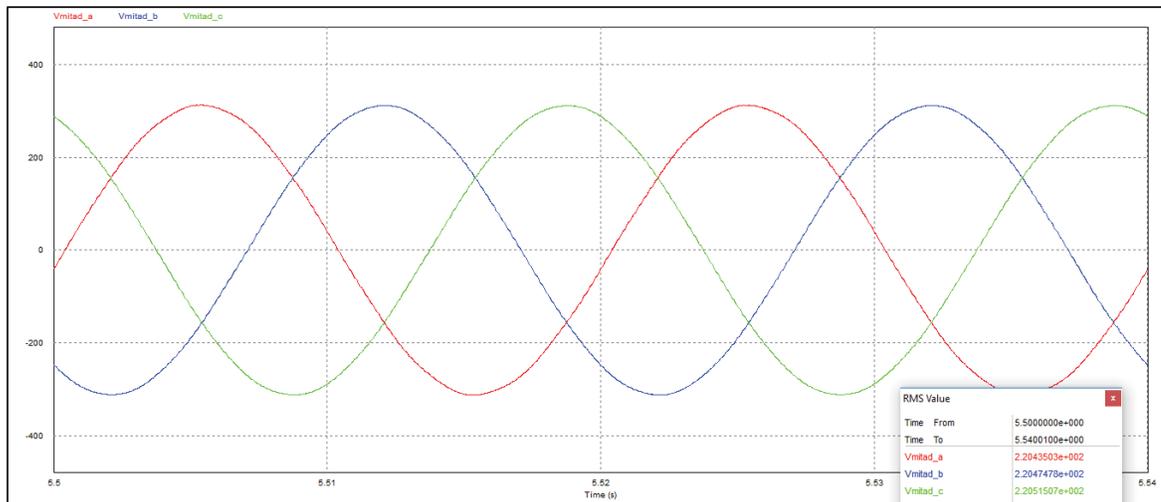


Figura 2-45 Formas de onda de tensión en la mitad de la línea por fase del circuito n° 4 para el punto de operación.

En la Figura 2-46 se presentan las corrientes que circulan a la entrada de cada SVC, donde se aprecia que las corrientes están ligeramente distorsionadas, dado que posee componentes en altas frecuencias, tendiendo a ser menos sinusoidales que en el caso conectado en estrella mostrados en la Figura 2-40.

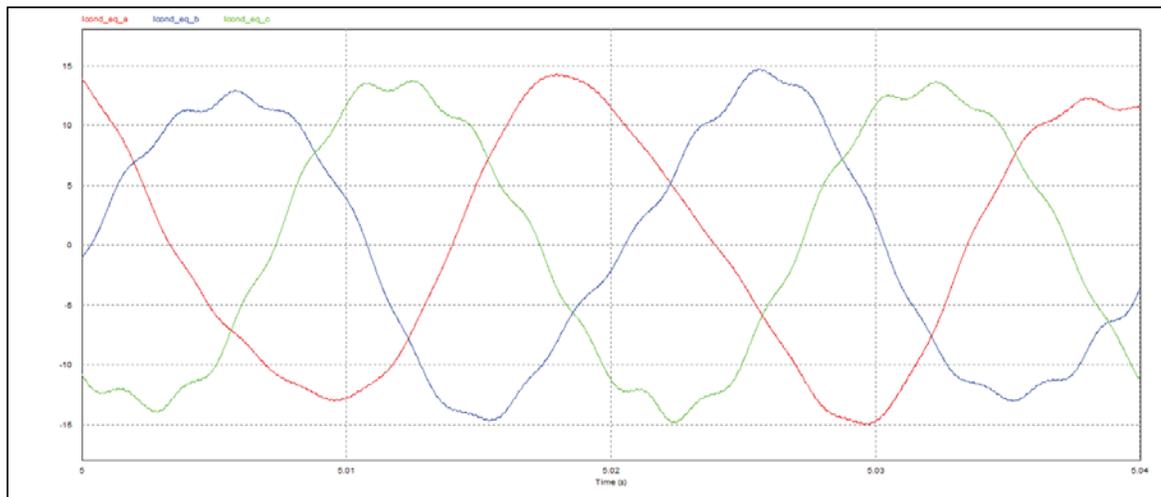


Figura 2-46 Formas de onda de las corrientes que circulan en ingresan a cada SVC en el circuito n° 4.

Para una mejor percepción de la distorsión de las corrientes de la Figura 2-46, en Figura 2-47 se muestran las magnitudes de los armónicos mediante la herramienta FFT del software PSIM hasta

2 SVC conmutado a alta frecuencia tipo buck-boost (CER-CAF-BB)

la misma frecuencia 2500 [Hz] (armónico número 50) que en el análisis de la Figura 2-41, mostrando el mismo efecto de que la corriente prácticamente no posee armónicos en baja frecuencia.

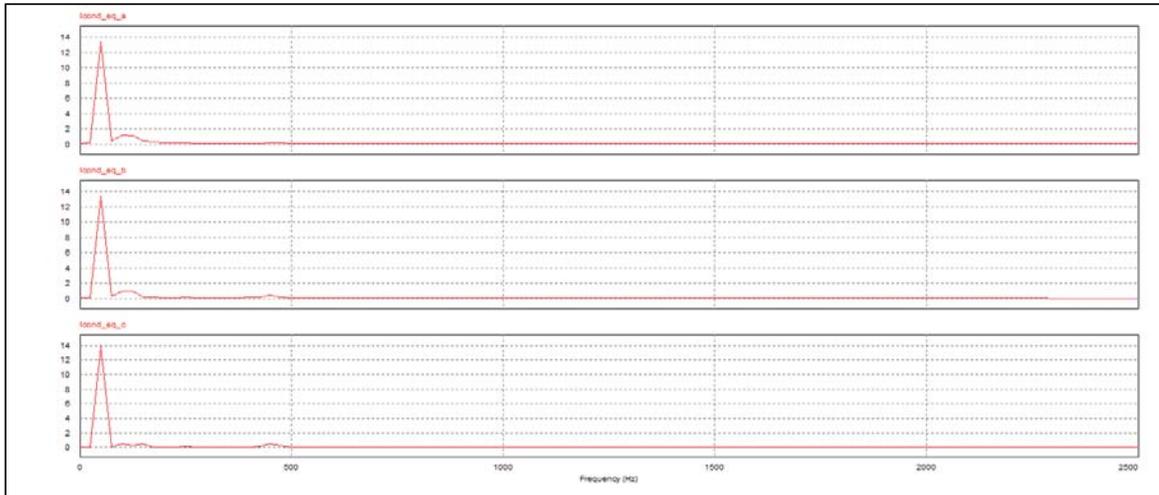


Figura 2-47 Espectro armónico de la corriente de entrada en los SVC del circuito n° 4.

Para finalizar el análisis de este caso se presenta en la Figura 2-48, las tensiones en los interruptores correspondientes a la fase “a” del circuito n°4, observando que del mismo modo que en la Figura 2-42 la forma de onda es sinusoidal por tramos por lo que se forma la tensión sinusoidal en la mitad de la línea en la Figura 2-45.

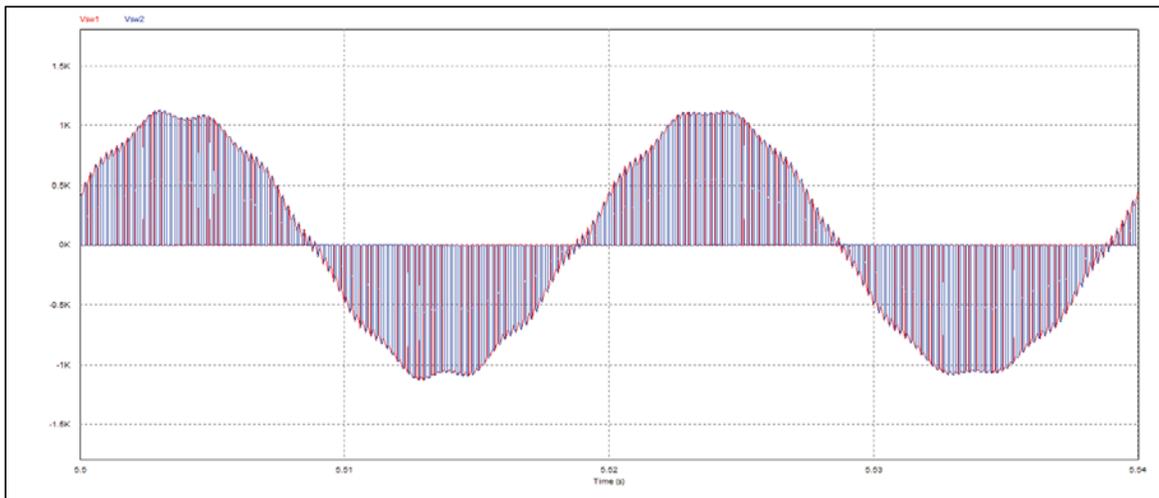


Figura 2-48 Formas de onda de tensión en los interruptores de la fase “a” para el punto de operación.

Observando que las diferencias entre que el compensador esté conectado en delta o en estrella para generar la correcta compensación, se producen esencialmente en que los inductores de entrada a los convertidores L_{02} en cada fase mostrados tanto en las Figuras 2-38 y 2-44 deben

2 SVC conmutado a alta frecuencia tipo buck-boost (CER-CAF-BB)

aumentar su inductancia que es directamente proporcional a su volumen y comparando las Figuras 2-42 y 2-48 se aprecia que en caso del circuito en delta los interruptores deben soportar mayores tensiones, por lo que se recomienda conectarlo en estrella, a pesar de que trabajando en delta los interruptores requieren de un ciclo de trabajo menor para que se realice la compensación.

3 Inserción del CER-CAF buck boost a un sistema de distribución

3.1 Presentación de una carga variable para simulación

Para probar al compensador de reactivos insertado en un sistema de distribución, primero se presenta una carga variable arbitraria para simular en el software PSIM a través de módulos que son mostrados en la Figura 3-1. Cada módulo consta de una fuente sinusoidal de igual magnitud y de distinto desfase, mediante un accionamiento que produce la variación de la potencia que suministra un extremo emisor hacia un extremo receptor.

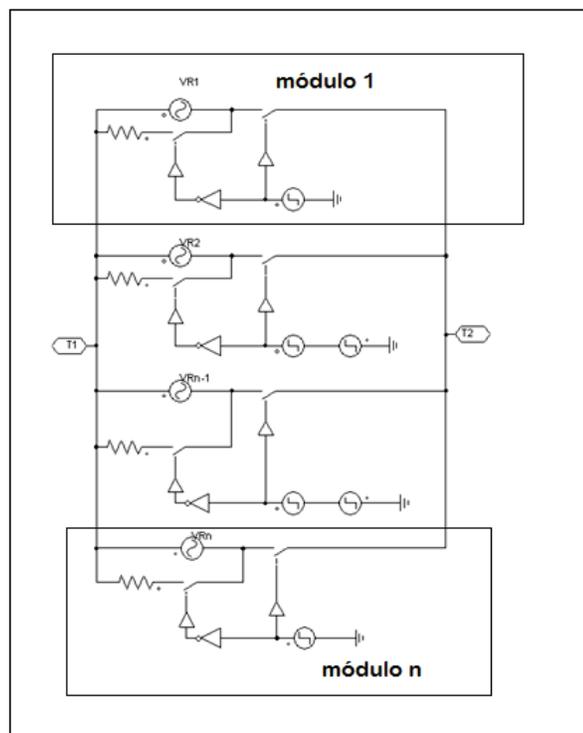


Figura 3-1 Módulos del sistema de distribución.

3 Inserción del CER-CAF buck boost a un sistema de distribución

Estableciéndose en la Figura 3-2, un ejemplo de puesta en funcionamiento de un conjunto de módulos (disparo de las fuentes) por separado en el extremo receptor, donde cada segundo representa a una hora.

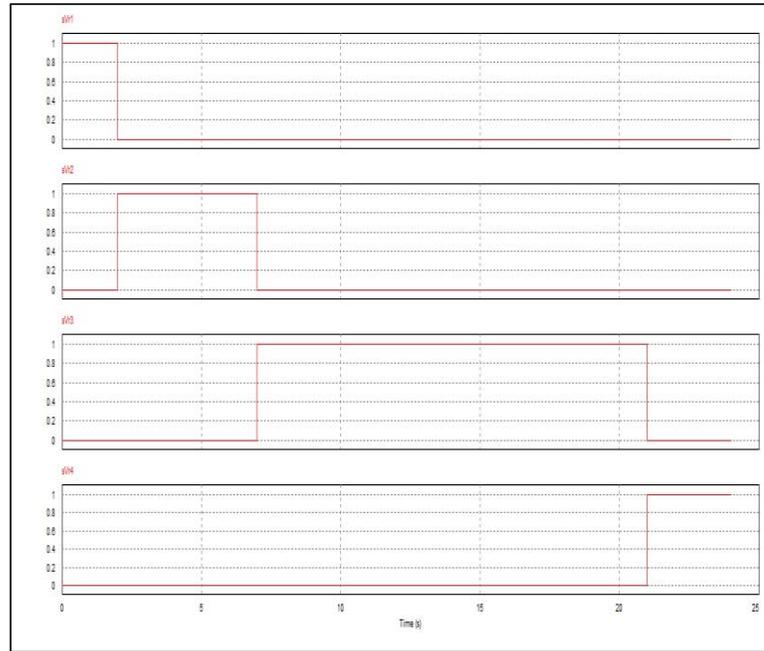


Figura 3-2 Ejemplo del disparo de fuentes.

3.2 Presentación del sistema de distribución

En la Figura 3-3 se establece un esquema de compensación para el sistema.

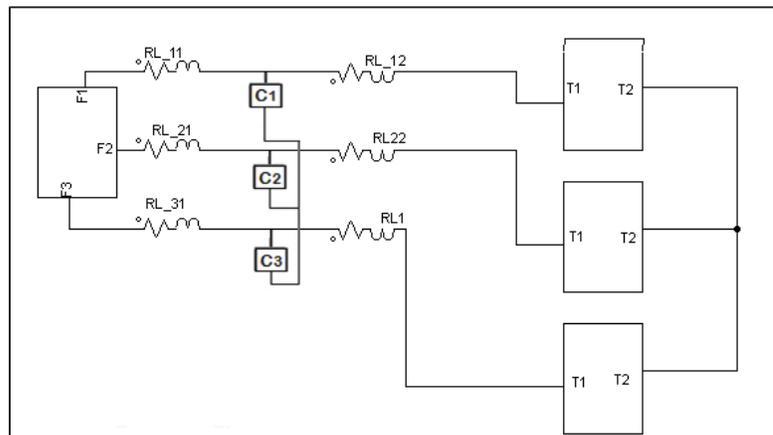


Figura 3-3 Esquema de compensación del sistema de distribución

Representado por:

1. Una fuente de tensión trifásica, conectada en estrella de 380 [V] RMS entre líneas, su frecuencia de trabajo es de 50 Hz.
2. Una línea de Distribución trifásica que se divide en partes iguales de inductancia total, $L = 1800 [\mu H]$ y de resistencia $R=10 [m\Omega]$ por fase, la misma utilizada en el capítulo 2.
3. La carga de consumo para simulación: Compuesta por 8 módulos de los presentados en la Figura 3-1 donde aprovechando la ecuación de transferencia de potencia a través de una línea ecuación 3-1 varía la potencia absorbida por el extremo receptor:

$$P = \frac{3 * V^2 * \sin(\delta)}{X_L} \quad (3-1)$$

Se presenta en la Tabla 3-1 donde se muestra como se presenta en el sistema de distribución la variación de la potencia activa trifásica.

Tabla 3-1 Variación de la potencia activa trifásica en el receptor según hora y ángulo de carga.

Módulo	Hora	Angulo de carga [°]	Potencia activa [kW]
1	0	9	40,17
2	0,75	6	26,84
3	6	15	66,46
4	13	13	57,76
5	15	14,5	64,29
6	16	13	57,76
7	19	16,3	72,07
8	23	9	40,17

3.3 Simulaciones del sistema de distribución

En la Figura 3-4 se presenta el circuito de simulación completo en PSIM, el cual en donde además de apreciarse las fuentes de tensión, líneas de distribución y las cargas de consumo para simulación descritas en la sección 3-2, aparecen los elementos del programa que ayudan a medir las diversas variables de interés de esta estructura como lo son sensores de tensión y corriente voltímetros, vatímetros y vármetros, entre otros.

Insertando cada compensador en la mitad de la línea de cada fase de manera que estén conectados en estrella y que el funcionamiento del control sea de manera de análoga a lo expuesto en la sección 2.8.2, es decir, sólo se toman muestras de tensión en la fase “a” para accionar todos los interruptores y que el conjunto de compensadores no están conectados al neutro de la fuente, ni el sistema se encuentra puesto a tierra.

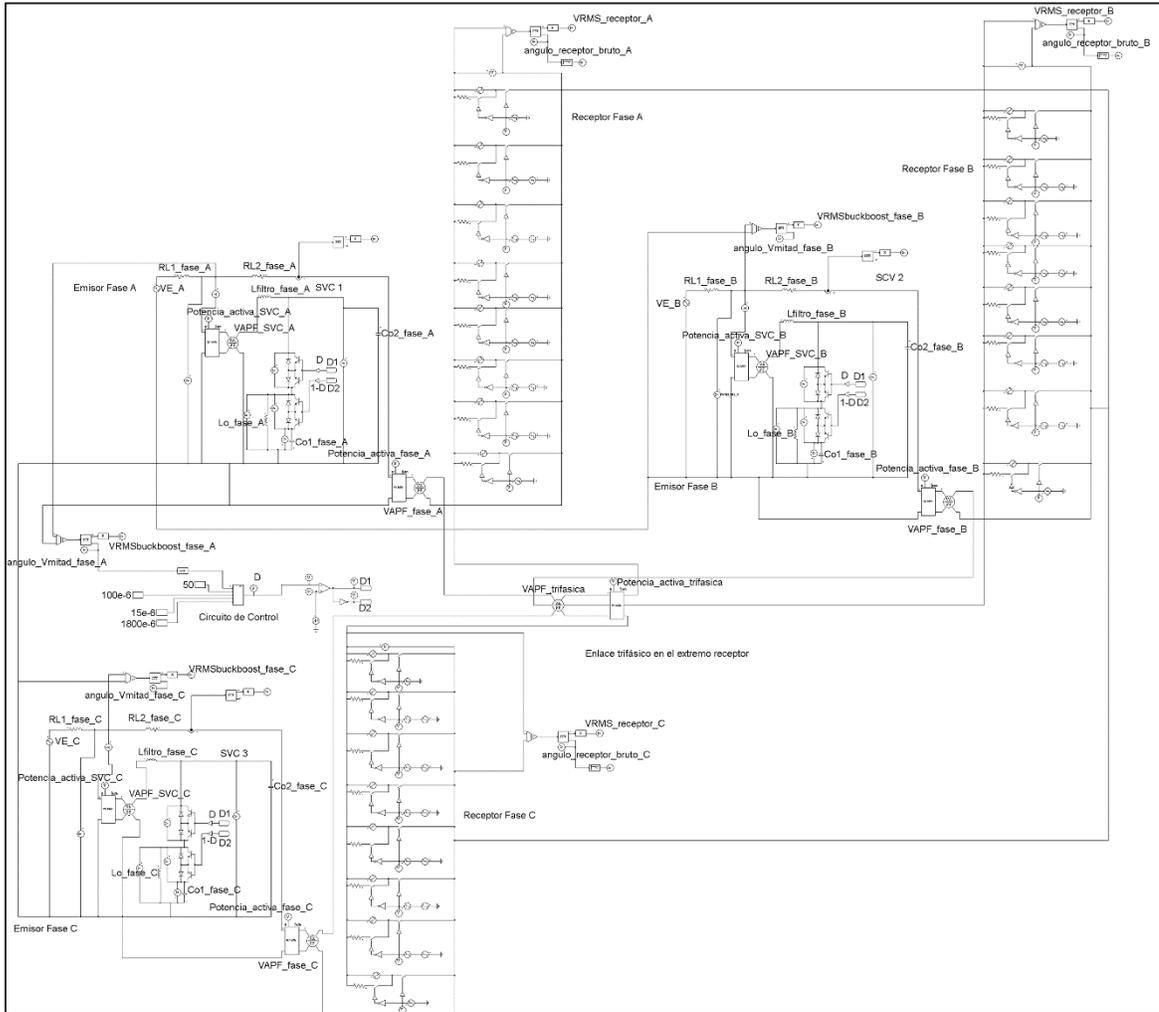


Figura 3-4 Sistema de distribución completo en PSIM.

3.3.1 Sistema de distribución sin compensar

Para el desarrollo de este caso se deshabilitan los compensadores por fase de la Figura 3-4, presentando en primer lugar en la Figura 3-5 una gráfica del ángulo en cada fase y de la potencia activa trifásica en el extremo receptor en función tiempo, según los valores mostrados en la Tabla 3-1, es decir, de la variación de la potencia activa trifásica en el receptor según hora (representados en simulación por segundos) y su ángulo de carga correspondiente.

Posteriormente en la Figura 3-6 se presenta una gráfica que compara las magnitudes de la potencia activa que debe suministrarse y de la potencia reactiva en el extremo receptor del sistema de distribución, la cual debe ser compensada al instalar los SVC.

3 Inserción del CER-CAF buck boost a un sistema de distribución

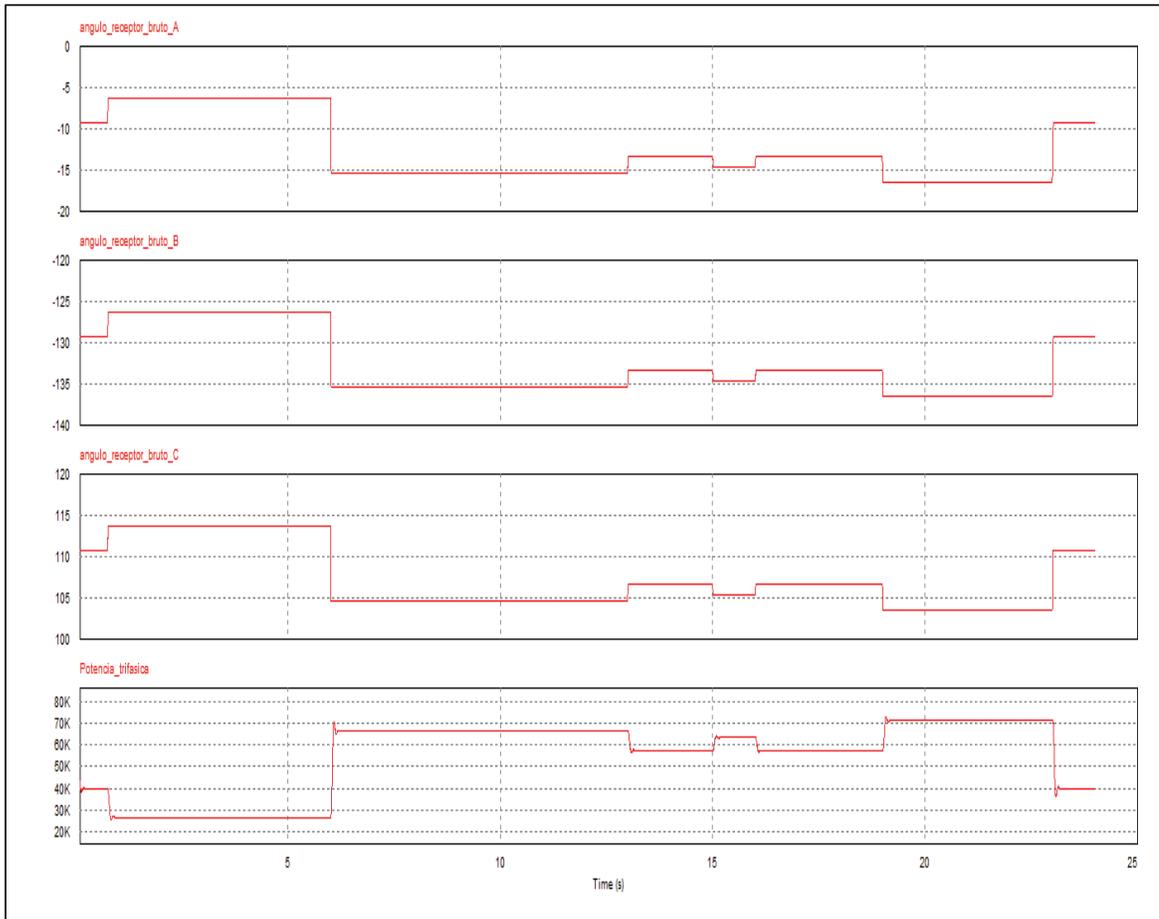


Figura 3-5 Variación del ángulo y de la potencia activa trifásica en el receptor en función tiempo.

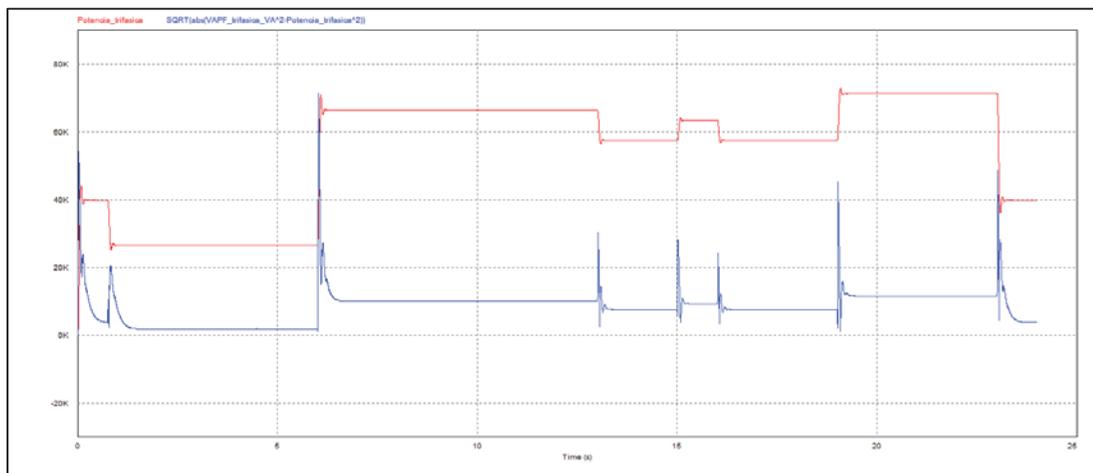


Figura 3-6 Potencia activa y reactiva trifásica en el extremo receptor.

En la Figura 3-5 y en Figura 3-6 se obtienen órdenes de magnitud de las potencias similares a proyectos anteriores [6].

3 Inserción del CER-CAF buck boost a un sistema de distribución

Luego en la Figura 3-7 se presenta como varía el valor eficaz la tensión en la mitad de la línea del sistema con los compensadores deshabilitados y en la Figura 3-8 como varía el ángulo de la Tensión línea-neutro en la mitad de la línea del sistema sin compensar.

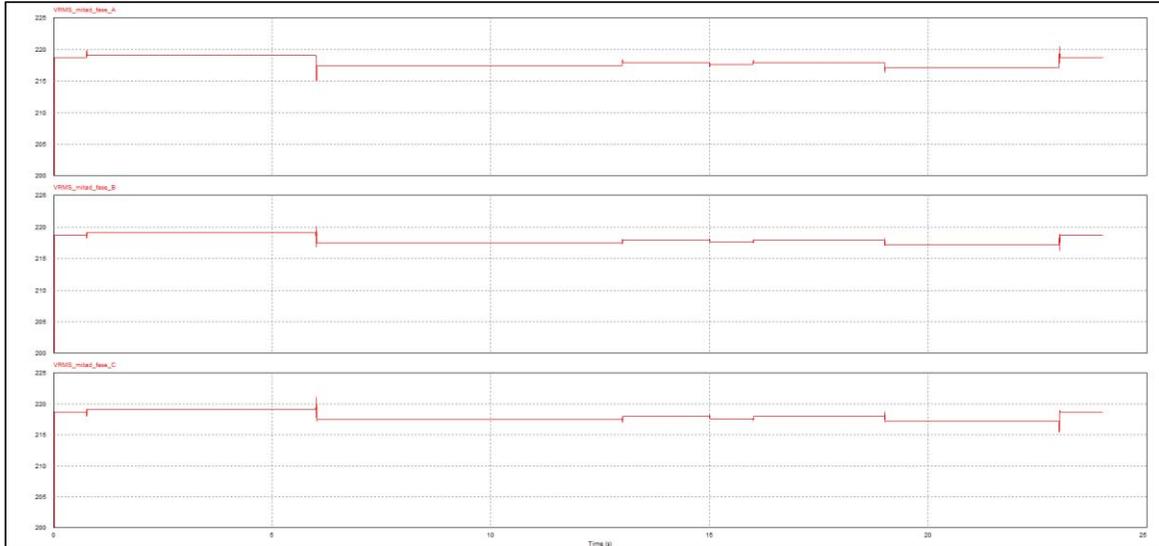


Figura 3-7 Tensiones línea neutro RMS en la mitad de la línea del sistema sin compensar.

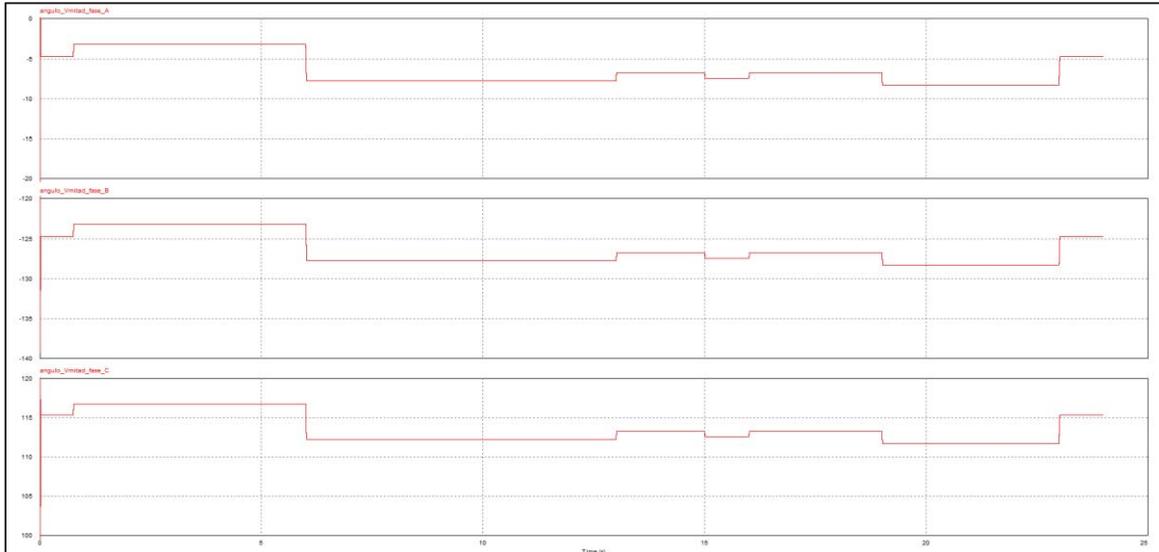


Figura 3-8 Ángulo de la Tensión línea-neutro en la mitad de la línea del sistema sin compensar.

Apreciándose que como es de suponer, ambos varían en el transcurso del tiempo, en particular en la Figura 3-7 la tensión en la mitad de la línea siempre es menor que la de ambos extremos y que el ángulo en la mitad de la línea siempre es la mitad del ángulo de la fuente del extremo receptor.

3.3.2 Sistema de distribución compensado

Cabe señalar que se establece este modelo para poder utilizar el mismo control y los mismos elementos fijos del compensador del circuito n° 3 del Capítulo 2, es decir el compensador es conectado en estrella para facilitar el control sobre todo por la instauración del bloque Math block del simulador PSIM.

En primer término en la Figura 3-9 se presenta el ángulo de la tensión línea-neutro en la mitad de la línea del sistema compensado, para demostrar éste no varía en relación al del sistema sin compensar, presentado en la Figura 3-8, siendo la condición imprescindible para conseguir la compensación.

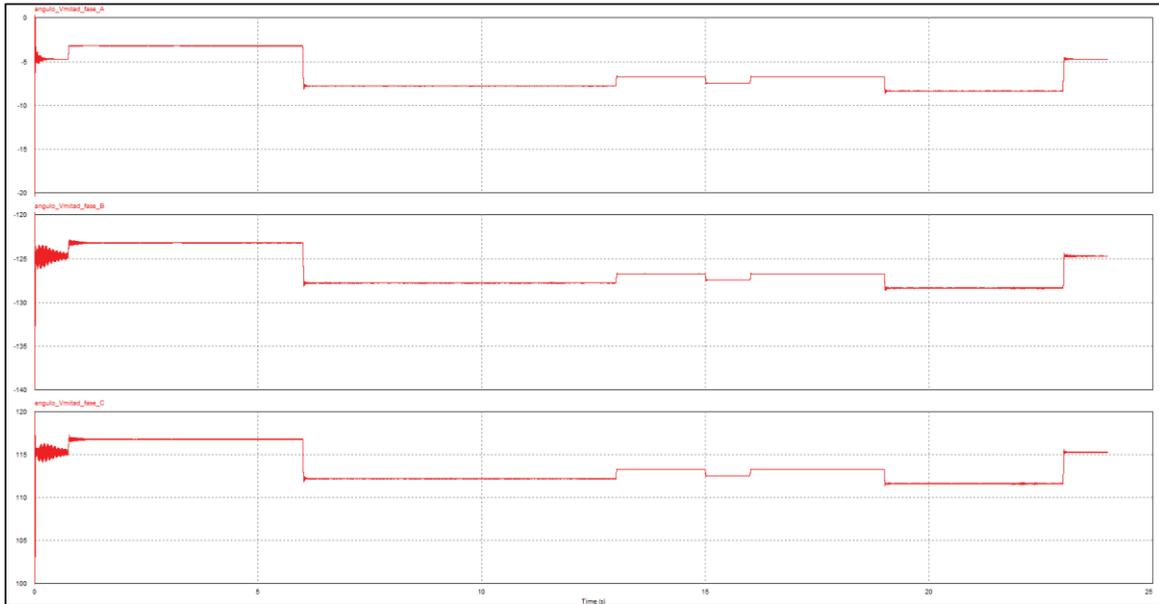


Figura 3-9 Ángulo de la Tensión línea-neutro en la mitad de la línea del sistema compensado.

En segundo término en la Figura 3-10 se presenta la variación de la razón cíclica (D) de los interruptores que se produce en el rango propuesto en la sección 2.7, para conseguir la adecuada compensación en cada fase, es decir, cada compensador es accionado según el comportamiento de la ecuación (3-2).

3 Inserción del CER-CAF buck boost a un sistema de distribución

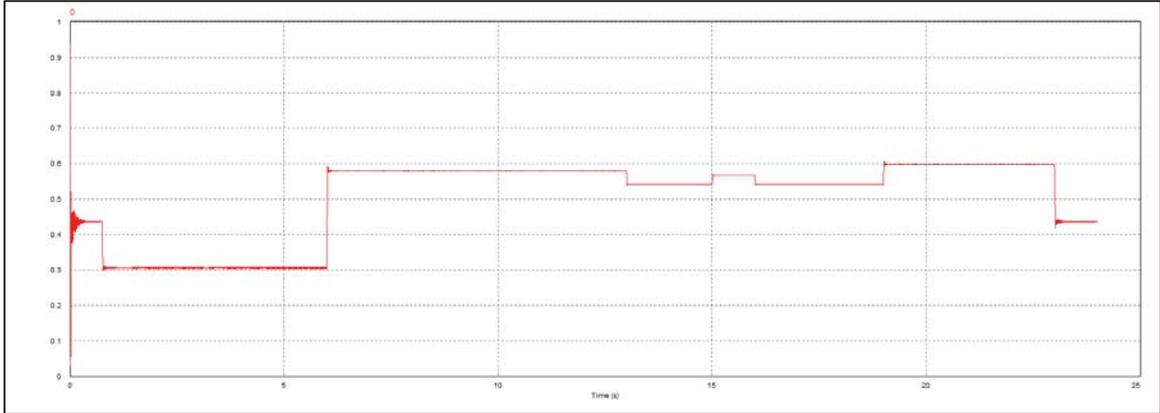


Figura 3-10 Variación de la razón cíclica de los interruptores.

En tercer término en la Figura 3-11 se presenta un zoom a las tensiones línea-neutro RMS en la mitad de la línea del sistema compensado, logrando el objetivo de la adecuada compensación, es decir, aumenta la tensión el punto donde se instala cada compensador al valor eficaz de ambos extremos.

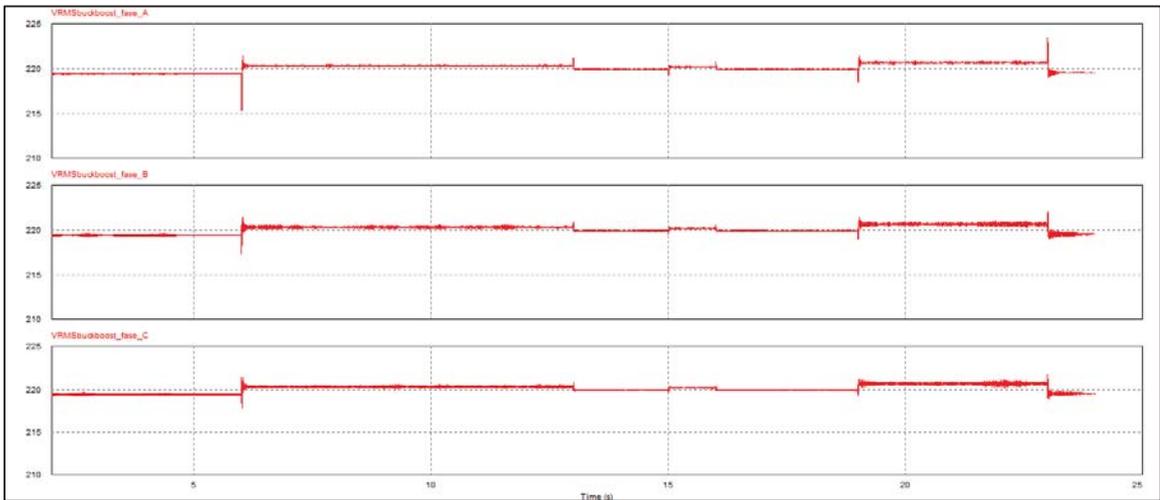


Figura 3-11 Zoom a las tensiones línea-neutro RMS en la mitad de la línea del sistema compensado.

Luego en cuarto lugar en la Figura 3-12 se presenta el factor de potencia de cada compensador por fase para comprobar que es cero, es decir, cada SVC no procesa potencia activa.

3 Inserción del CER-CAF buck boost a un sistema de distribución

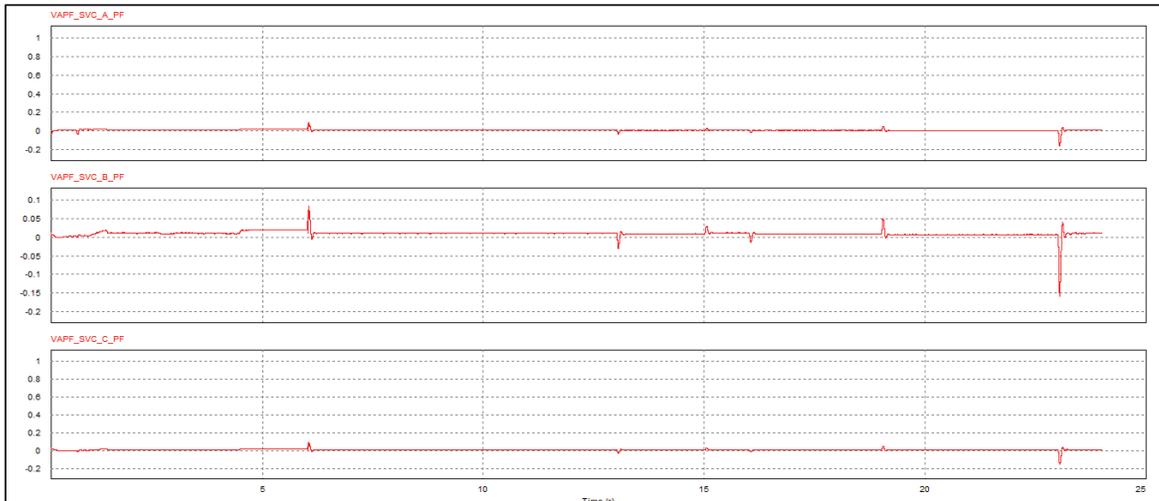


Figura 3-12 Factor de potencia de cada compensador por fase.

Dado que como aparece en la Figura 3-12 el factor de potencia de cada compensador por fase es igual a cero, se puede decir que la potencia aparente que inyecta cada SVC es reactiva presentándose las variaciones necesarias para satisfacer las necesidades del sistema en la Figura 3-13.

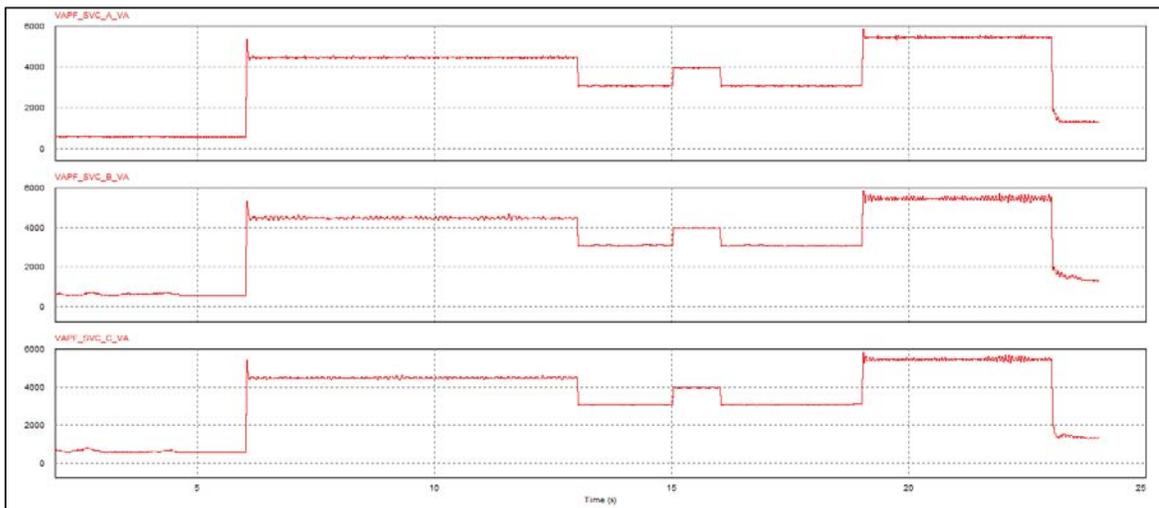


Figura 3-13 Potencia reactiva que inyecta cada compensador por fase.

Finalmente se presentan nuevamente las potencias activa y reactiva que llegan al receptor en la Figura 3-14, para corroborar que no existen pérdidas producto de cada convertidor y que existe una efectiva compensación de la potencia reactiva.

3 Inserción del CER-CAF buck boost a un sistema de distribución

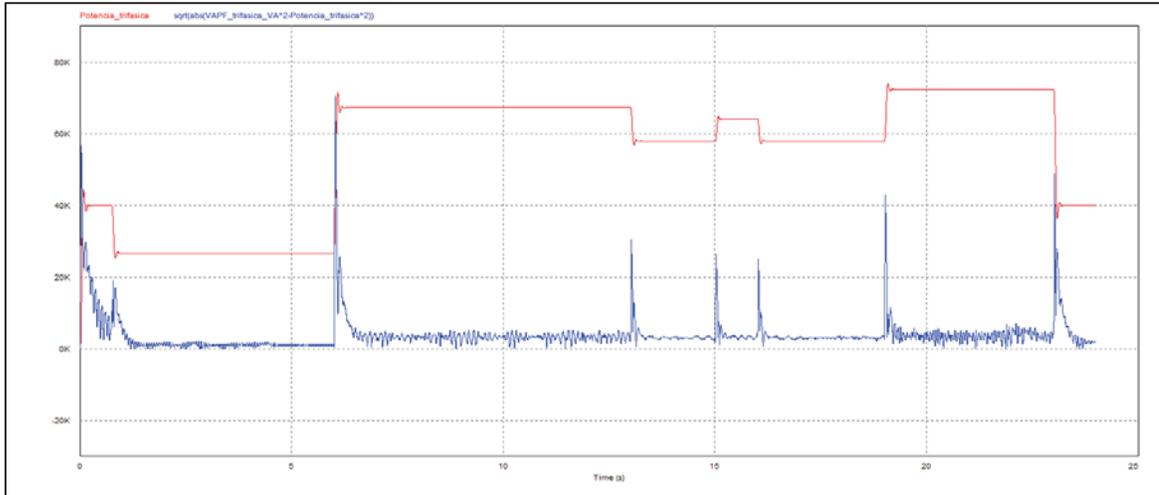


Figura 3-14 Consumo de Potencia de la Carga trifásica del sistema compensado.

Además se advierten sobresaltos producto del paso de simulación del programa PSIM sobre todo durante la conmutación, que si fuere suave no aparecerían las alzas de potencia reactiva y ésta tendería a cero, produciendo un factor de potencia que tiende al unitario en el extremo receptor, por lo que se deduce que el sistema no inyecta armónicos de corriente a la red, sobretodo en régimen permanente sinusoidal, tal como ocurre en el circuito n° 3 del capítulo 2.

Discusión y conclusiones

La realización de esta investigación acerca de un compensador basado en un condensador dinámico buck-boost, significa poder contar con antecedentes relevantes para su correcto dimensionamiento para un eficaz funcionamiento.

En primer término en la investigación se realiza una introducción hacia la evolución de los SVC, desde el cambio de semiconductores que funcionan como interruptores lentos, como son los tiristores, hacia su reemplazo por elementos activos rápidos que trabajan a una alta frecuencia de conmutación como lo son los transistores IGBT.

Para ello se enfocó hacia las ventajas y desventajas que tienen los CEF-CAF sobre los SVC tradicionales en particular del nuevo CER-CAF tipo buck-boost, elevador y reductor de capacitancias, que consigue poseer la característica de los SVC conmutados a alta frecuencia, es decir, inyectar un bajo contenido de armónicos de corriente a la red.

Si se compara entre los SVC conmutados a alta frecuencia, este condensador posee la característica de permitir elevar o en su defecto reducir la capacitancia que se requiere para compensar los reactivos de una línea por sobre la magnitud de una fija, lo que produce una innovación acerca de muchas de las topologías SVC estudiadas anteriormente.

Esta ventaja es relevante en el sentido de que en la industria por lo general los valores de los condensadores poseen valores específicos de capacidad por lo que el condensador fijo requerido se puede adaptar con mayor facilidad si se compara con el condensador fijo del CER-CAF tipo buck que requiere de ser el mayor posible para compensar en todo nivel de carga

Es relevante reconocer que el principal problema de un compensador de reactivos tipo buck-boost conmutado a alta frecuencia es que a diferencia del tipo Buck requiere de filtros armónicos si o si, por lo que éste requiere de ser bien dimensionado, debido a que como se pudo demostrar está ligado directamente a la correcta compensación de cualquier tipo de sistema, en el sentido de ayudar a la conmutación y generar una tensión sinusoidal, eso si no deben de afectar en mayor medida al valores eficaces que teoría debieran de aparecer.

Se aprecia una sobretensión que cae sobre el SVC, producido cuando uno de los interruptores empieza a dejar de conducir, produciendo la sobretensión no deseada, la solución propuesta fue

la instalación de un filtro, pero no hay que descartar otras soluciones más complejas como pudiera ser el uso de los denominados Circuitos de ayuda a la conmutación de transistores o popularmente conocidos por su nombre en inglés “snubbers” los cuales se incorporan al circuito de potencia del dispositivo semiconductor para reducir el estrés eléctrico generado durante las conmutaciones y asegurar que la tensión a la que está sometido el interruptor sea la deseada o por lo menos se forme una forma de onda de tensión acorde a la teoría.

Cabe destacar que debido al cálculo de los parámetros fijos del compensador con el filtro asociado, se ve limitado la compensación de reactivos a un rango de operación tanto de un límite superior como de un límite inferior esto es perfectamente natural en el comportamiento de un dispositivo buck-boost, debido a que como se pudo apreciar, las caídas de tensión en los interruptores poseen un comportamiento similar a lo que sería un convertidor DC-DC buck boost tradicional, es decir deben soportar tensiones mayores que su predecesores tipo buck para que en caso puede reducir y en otro aumentar la capacitancia equivalente, tal como lo hace el DC-DC con la tensión de salida.

Otra ventaja es que el inductor asociado al dispositivo buck.boost no interfiere en mayor medida en la compensación de reactivos del SVC tipo buck-boost, esto es debido al objetivo que posee al interior de la estructura que es mismo que un convertidor DC-DC que es el de almacenar y suministrar energía cuando el funcionamiento del sistema lo requiera.

También se concluye que el efecto de conectar el SVC trifásicamente en delta o en estrella para generar la correcta compensación, se generan diferencias en la tensiones que soportan los interruptores, por lo que si se realiza a altos niveles de tensión se recomienda conectar el compensador en estrella si los niveles de tensión son bajos se recomienda conectarlo en delta.

Una de las alternativas que ofrecen proyectos anteriores es la conexión de la célula de compensación en módulos para distribuir de esa manera la tensión de los interruptores y de esa manera evitar conectarlo a un transformador de modo de ahorrar costos.

Acerca del control vale destacar que la respuesta en estados transitorios depende directamente de los bloques del programa computacional y sobre todo del paso de simulación por lo que sólo se garantiza que realiza un adecuado disparo de los interruptores en régimen permanente, es decir sistema de respuesta es lo suficientemente larga para no dar a lugar a un comportamiento inestable ya que el sistema que no está siendo controlado para un tiempo de respuesta breve.

Acerca del simulador hay que notar que para establecer un sistema de distribución en el software computacional PSIM se requiere primero de establecer una carga variable que para este caso fue cambiando la potencia que suministra una red a un sistema mediante un accionamiento en el cual mantiene la tensión del extremo receptor constante debido a que se esa manera el control propuesto funciona sin inconvenientes.

También se debe hacer énfasis en que el programa PSIM está supeditado al tiempo de paso o en inglés “time step” que influye en el tiempo total de simulación, mientras más pequeño es el time

step, la simulación será más exacta pero demorará más e incluso en algunos casos los computadores no son capaces de almacenar en su memoria los resultados. Además supedita al cambio de estado en la conmutación de los semiconductores, por lo que además para facilitar las simulaciones trifásicas, sólo se toman muestras del ángulo de la tensión en la mitad de la línea de la fase “a” para accionar debidamente todos los interruptores, lo cual en la práctica no se realiza de esta manera debido a que los sistemas de distribución por lo general en alguna hora del día se encuentra desequilibrado y se producen perturbaciones de tensión de tensión tanto en el extremo receptor como en la mitad.

Muy relevante acerca de cada sistema simulado es que el circuito de potencia no se encuentra conectado a tierra debido a que el simulador sólo posee una tierra y esto puede ocasionar interferencias con el circuito de control que si está conectado a la tierra del programa.

Se concluye que aplicado a un sistema de distribución se consiguen óptimos resultados, pero se debe tener muy en consideración el rango de tiempo de accionamiento de cada uno de los interruptores.

El estudio de la topología propuesta genera importantes fuentes de información para el correcto dimensionamiento de equipos donde los modelos deben reflejar fielmente un mejoramiento del comportamiento de un sistema.

Para futuros trabajos se propone la implementación de este convertidor para un sistema real mediante un control para cada fase que reaccione ante contingencias indeseadas tales como cortocircuitos o desbalances en la carga, que produzcan mejoras en sistemas de transmisión o de distribución, en aspectos tales como la calidad de servicio entre emisores y receptores de energía eléctrica o ahorro económico para todos los sectores del mercado eléctrico.

Bibliografía

- [1] J. M. Llerena Medina, "Investigación de un compensador de reactivos obtenido a través de la conexión en cascada de tres compensadores que trabajan en alta frecuencia", PUCV, Valparaíso Chile, 2015.
- [2] D. Ruiz, "Controladores FACTS", Curso Optativo, PUCV, Valparaíso. Publicación Interna, 2014.
- [3] C. P. Santis Fuenzalida, "Estudio y Desarrollo de un Compensador de reactivos con mínima generación de armónicos, utilizando técnica de conmutación en alta frecuencia", PUCV, Valparaíso, Chile, 2007.
- [4] M. A. Sanchez Veneciano, "Estudio y simulación de un SVC aislado basado en inductancias no lineales", PUCV, Valparaíso, Chile, 2006.
- [5] C. E. Muñoz Catalán, "Estudio y simulación de un SVC aislado basado en la topología Mcvey- Weber", PUCV, Valparaíso, Chile, 2005.
- [6] E. L. Vidal Román, "Comparación de modelos de FACTS tipo SVC aplicados a redes de distribución de media tensión radiales", PUCV, Valparaíso, Chile, 2010.
- [7] C. Fernández, A. Barrado, A. Lázaro, M. Sanz, P. Zumel, "Electrónica de Potencia", Open Ware Course, Universidad Carlos III, Madrid, España: [En línea]. Available: <http://ocw.uc3m.es/tecnologia-electronica/electronica-de-potencia/material-de-clase-1/MC-F-002.pdf> [Último acceso: 4 October 2016], 2009.
- [8] O. Plasencia, "Modeling and Analysis of a Four-Switch Buck-Boost Dynamic Capacitor", San Luis Obispo: Faculty of California Polytechnic State University, December 2011.
- [9] D. Ruiz, "Electrónica de Potencia", Curso Obligatoria, PUCV, Valparaíso. Publicación Interna, 2014.

- [10] L. Gyugyi, "A Unified Power Flow Control Concept for Flexible AC Transmission Systems", IEEE Proc. Part C 139 (4) (1992) 323–331, 1992.
- [11] G. V. S. Srinivasan, "Design on of a Versatile Three-phase AC Line Conditioner", Industry Applications Conference: Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS '95., Conference Record of the 1995 IEEE (Volume:3), 1995.
- [12] R. Soto, "Estudio y proyecto de condensador dinámico a través de convertidores mutliniveles", PUCV, Valparaíso, Chile, 2015.
- [13] D. Ruiz, "Armónicas en baja tensión", Curso Optativo, PUCV, Valparaiso, Publicación Interna, 2016.