

**CONTROL DEL COMPENSADOR ESTÁTICO PARA SISTEMAS DE
DISTRIBUCIÓN (D-STATCOM) BAJO TENSIONES DESBALANCEADAS Y
DISTORSIONADAS**

JOSÉ ALIDES ROMERO CÁRDENAS



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA
ELÉCTRICA
BUCARAMANGA
2015**

**CONTROL DEL COMPENSADOR ESTÁTICO PARA SISTEMAS DE
DISTRIBUCIÓN (D-STATCOM) BAJO TENSIONES DESBALANCEADAS Y
DISTORSIONADAS**

JOSÉ ALIDES ROMERO CÁRDENAS

Proyecto de grado para optar el título de
**ESPECIALISTA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA
ELÉCTRICA**

Directora

MARÍA ALEJANDRA MANTILLA VILLALOBOS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA
ELÉCTRICA
BUCARAMANGA
2015**

*“Cuida tus pensamientos porque se volverán actos.
Cuida tus actos porque se harán costumbre.
Cuida tus costumbres porque formarán tu carácter.
Cuida tu carácter porque formará tu destino.
Y tu destino será tu vida”.*

Mahatma Gandhi (1869-1948)

AGRADECIMIENTOS

*A mi Dios, Jehova, quien me dio la fe, la fortaleza, la salud
y la esperanza para terminar este trabajo.*

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. GENERALIDADES	20
1.1. CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA	20
1.2. PERTURBACIONES DE LA SEÑALES DE TENSIÓN Y/O CORRIENTE	21
1.3. DISPOSITIVOS DE COMPENSACIÓN	24
2. COMPENSADOR ESTÁTICO PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN (D-STATCOM)	26
2.1. PRINCIPIO DE OPERACIÓN	26
2.2. ESTRUCTURA DEL D-STATCOM	27
2.2.1. Convertidor de potencia	28
2.2.2. Control del convertidor de potencia	29
3. ANÁLISIS DE LA POTENCIA INSTÁNTANEA DEL COMPENSADOR	32
3.1. ANÁLISIS DE LA POTENCIA CON TENSIONES IDEALES DEL SISTEMA	32
3.2. ANÁLISIS DE LA POTENCIA CON TENSIONES DESBALANCEADAS Y/O DISTORSIONADAS DEL SISTEMA	32
3.2.1. Componentes simétricas	33
3.2.2. Ejemplo de una carga trifásica resistiva y tensiones del sistema con un quinto armónico	35
4. ALGORITMOS PARA CALCULAR LA CORRIENTE DE COMPENSACIÓN DEL D-STACOM	40
4.1. TEORÍA EN EL SISTEMA A-B-C	40
4.2. TEORIA P-Q TRIFÁSICA EN SISTEMAS DE TRES HILOS	42
4.3. TEORÍA P-Q MODIFICADA	43
4.4. TEORÍA D-Q-0	44

4.5. TEORÍA P-Q-R	46
4.6. FILTRO KALMAN	48
5. SIMULACIONES DE LOS MODELOS DEL D-STATCOM	56
5.1. PARÁMETROS DEL D-STATCOM, ESTRATEGÍAS DE CONTROL Y ESCENARIO DE COMPENSACIÓN	57
5.1.1. Simulación del D-STATCOM como compensador bajo tensiones balanceadas	58
5.1.2. Simulación del D-STATCOM como compensador bajo tensiones desbalanceadas y distorsionadas	67
6. CONCLUSIONES	78
BIBLIOGRAFÍA	81
ANEXO	84

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Componentes armónicas de una señal de tensión y el espectro en frecuencia de la señal	22
Figura 2. Desbalance de Tensión	24
Figura 3. Esquema de la estructura general del D-STATCOM	26
Figura 4. Esquema de control de lazo cerrado del convertidor de potencia	29
Figura 5. Control por modulación delta	30
Figura 6. Balance de potencia entre la red, la carga y el compensador bajo tensiones balanceadas	32
Figura 7. Balance de potencia entre la red, la carga y el compensador bajo tensiones desbalanceadas y/o distorsionadas	33
Figura 8. Carga resistiva trifásica y tensiones del sistema con armónicos	36
Figura 9. Esquema del D-STATCOM con el uso del Filtro Kalman	48
Figura 10. Proceso de estimación usando el filtro de Kalman lineal	51
Figura 11. Esquema del D-STATCOM como compensador	56
Figura 12. Tensiones, corrientes por fase en el PCC de una carga no lineal desbalanceada y espectro en frecuencia de la corriente	58
Figura 13. Corriente de compensación de la carga no lineal de la fase A	60
Figura 14. Corriente por el neutro durante la compensación de la carga no lineal	61
Figura 15. Corriente de líneas antes y después de la compensación	61
Figura 16. Tensión en el bus de DC del D-STATCOM en la compensación	62
Figura 17. Potencia consumida por la carga y entregada por el D-STATCOM durante la compensación	63
Figura 18. Espectro en frecuencia antes y después de la compensación del D-STATCOM	65
Figura 19. Tensiones, corriente por fase en el PCC de una carga no lineal desbalanceada y espectro en frecuencia de la corriente	68

Figura 20. Tensiones de entrada y salida del filtro Kalman	69
Figura 21. Error de tensión a la salida del filtro de Kalman fase B	69
Figura 22. Corriente de compensación de la carga no lineal de la fase A	70
Figura 23. Corriente por el neutro durante la compensación de la carga no lineal	71
Figura 24. Corrientes de líneas antes y después de la compensación	72
Figura 25. Tensiones en el bus de DC del D-STATCOM en la compensación	73
Figura 26. Potencia consumida por la carga y entregada por el D-STATCOM durante la compensación	74
Figura 27. Espectro en frecuencia antes y después de la compensación del D-STATCOM	75

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Distorsión armónica total antes y después de la compensación fase A	66
Tabla 2. Factores de desbalance de corriente antes y después de la compensación del D-STATCOM	67
Tabla 3. Distorsión armónica total antes y después de la compensación fase A	76
Tabla 4. Factores de desbalance de la corriente antes y después de la compensación del D-STATCOM	77

LISTA DE ANEXO

	Pág.
Anexo A. Esquema de carga no lineal	84

ABREVIATURAS

ATP	Programa de simulación (<i>Alternating Current</i>)
BJT	Transistor de unión bipolar (<i>Bipolar Junction Transistor</i>)
CSI	Inversor tipo fuente de corriente (<i>Current Source Inverter</i>)
DC	Corriente directa (<i>Direct Current</i>)
D-STATCOM	Compensador estático de potencia para sistemas de distribución (<i>Distribution Estatic Compensator</i>)
FLFB	Inversor de cuatro ramas en puente completo (<i>Four-Leg Full-Bridge</i>)
GTO	Tiristor de desactivación por compuerta (<i>Gate Turn-Off Thyristor</i>)
Hz	Hertz
IEEE	Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos (<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>)
IEC	Comisión electrotécnica internacional (<i>International Electrotechnical Commission</i>)
IGBT	Transistor bipolar de compueta aislada (<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>)
NTC	Norma Técnica Colombiana
PCC	Punto de Conexión Común
PWM	Modulación por ancho de pulsos (<i>Pulse With Modulation</i>)
RMS	Valor eficaz (<i>Root Mean Square</i>)
TBFW	Inversor de tres puentes completos de cuatro hilos (<i>Three- Bridge Four-Wire</i>)
THD	Distorsión armónica total (<i>Total Harmonic Distortion</i>)
TLFB	Inversor de tres ramas en puente completo (<i>Three-Leg Full-Bridge</i>)
TLSC	Inversor de tres ramas en puente completo (<i>Three-Leg Split-Capacitor</i>)

SIMBOLOGÍA

f	Frecuencia
T	Periodo
C	Capacitor del bus de DC
L	Inductancia de acople
K	Kilo
Δ	Delta o cambio de una señal
XL	Reactancia de Acople
$^\circ$	Angulo en Grados
p	Potencia Activa
q	Potencia no activa
pc	Potencia del compensador
i_l	Corriente de la carga
i_s	Corriente del sistema
i_c	Corriente de compensación
K_p	Constante proporcional
K_i	Constante integral
$\ v\ $	Norma euclidiana de la tensión
i_{perd}	Corriente de pérdidas
V_{dc}	Tensión promedio del bus de DC
V_{dcr}	Tensión de referencia del bus de DC
$v_{a,b,c}$	Tensiones de fase en a-b-c
$i_{a,b,c}$	Corrientes de línea en a-b-c
$T_{\alpha,\beta,0}$	Matriz de transformación de Clarke
A	Matriz de transformación de Park
$v_{\alpha,\beta,0}$	Tensiones de fase en $\alpha - \beta - 0$
$i_{\alpha,\beta,0}$	Corrientes de líneas en $\alpha - \beta - 0$
$i_{d,q,0}$	Corrientes de líneas en $d - q - 0$

$i_{p,q,r}$	Corrientes de líneas en $p - q - r$
$p_{3\varphi}$	Potencia activa trifásica
p_0	Potencia de secuencia cero
\bar{x}	Cantidad correspondiente a la parte DC
\tilde{x}	Cantidad correspondiente a la parte oscilatoria

RESUMEN

TITULO: CONTROL DEL COMPENSADOR ESTÁTICO PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN (D-STATCOM) BAJO TENSIONES DESBALANCEADAS Y DISTORSIONADAS*.

AUTORES: JOSÉ ALIDES ROMERO CÁRDENAS**.

PALABRAS CLAVE: calidad de la energía eléctrica, compensación, desbalance, distorsión armónica, factor de potencia, filtro Kalman, perturbaciones, teoría de la potencia reactiva instantánea p-q.

DESCRIPCION:

El presente trabajo, está centrado en el análisis y control del Compensador Estático para Sistemas de Distribución (D-STATCOM, *Distribution Static Compensator*) bajo tensiones desbalanceadas y/o distorsionadas.

Este documento muestra los elementos que conforman el D-STATCOM constituido principalmente por una fuente inversora, un elemento de acople con la red, un elemento almacenador de energía y los algoritmos de control. Entre la revisión de los algoritmos de control del D-STATCOM incluye tres lazos de control; un lazo de control que genera la secuencia de conmutación de los transistores en el inversor, otro lazo de control que regula la tensión del condensador y los algoritmos para calcular las señales de referencia de la corriente de compensación. Cuando las tensiones de la red de distribución presenten perturbaciones como armónicos y/o desbalances se utiliza un algoritmo de sincronización debido a que los algoritmos utilizados para calcular las señales de referencia de la corriente de compensación funcionan bajo tensiones sinusoidales y balanceadas. Para evaluar el funcionamiento del compensador se realizaron modelos del D-STATCOM en la herramienta de simulación ATP (*Alternative Transient Program*) frente a una carga no lineal bajo tensiones desbalanceadas y/o distorsionadas y se verificaron sus opciones de compensación para mitigar la distorsión armónica, el desbalance y bajo factor de potencia. En todas las simulaciones presentadas en este trabajo se tuvieron en cuenta los mismos parámetros de la red de distribución y del compensador estático para sistemas de distribución.

* Monografía

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Especialización en Sistemas de Distribución de la Energía Eléctrica. Directora M. Sc. María Alejandra Mantilla Villalobos.

ABSTRACT

TITLE: DISTRIBUTION STATIC COMPENSATOR CONTROL SYSTEMS (D-STATCOM) UNDER UNBALANCED VOLTAGES AND DISTORTED*.

AUTHORS: JOSE ALIDES ROMERO CÁRDENAS**.

KEYWORDS: Quality of electrical energy, compensation, imbalance, harmonic distortion, power factor, Kalman filter, disturbance, power theory instantaneous reactive p-q.

DESCRIPTION:

This present work is focused on the analysis and Distribution Static Compensator Control Systems (D-STATCOM, Distribution Static Compensator) under unbalanced voltages and distorted.

This document shows the elements that shapes The D-STATCOM it consists principally for a source inverter, an element of couple with the network, an element energy of buffer, and the control algorithms, between the review of the control algorithms for D-STATCOM include three control loops; a loop that generates switching sequence of transistors in the inverter, another control loop that regulates the condenser voltage and the algorithms for to calculate reference signals of the current compensation, when the voltages of the distribution network submit disturbances as harmonic or unbalanced used a synchronization algorithm because the algorithms used for to calculate the reference signals of the current compensation operate under sinusoidal voltages and balanced. For evaluate the performance compensator models were made of D-STATCOM in the simulations tools ATP (Alternative Transient Program) facing a load not linear under unbalanced voltages and distorted and were checked its options of compensation to mitigate the atomic distortion, imbalance and under voltages factor. In all the simulations presented in this work were considered the same parameters of the distribution network and the distribution static compensator systems.

* Monograph

** Faculty of Engineerings Physical Mechanics. School of Engineering Electrical, Electronic and Telecommunications. Specialization in Distribution Electric Power Systems. Headmisstress M.Sc. María Alejandra Mantilla Villalobos.

INTRODUCCIÓN

Las redes de distribución de energía eléctrica alimentan cargas de diversas características, que hacen que se presenten perturbaciones tanto en las señales de corriente como en las señales de tensión de la red. Estas perturbaciones afectan directamente la calidad de la energía eléctrica suministrada a los usuarios y reducen considerablemente la capacidad de transporte de energía. Los problemas que afectan la calidad de la energía eléctrica se originan por diferentes causas, como por ejemplo la masiva utilización de cargas no lineales, cargas inductivas considerables, cargas desequilibradas, conexión y desconexión de transformadores, bancos de capacitores, entre otros.

Con el propósito de mitigar en gran medida estas perturbaciones que se presentan en las redes de distribución, se buscan alternativas de solución, que aporten al mejoramiento de la calidad de la energía que se transporta. Como resultado de esta búsqueda, se han desarrollado dispositivos de compensación llamados *Custom Power Devices* [2].

Una de las alternativas para dar solución a los problemas mencionados, es el D-STATCOM que es uno dispositivo *Custom Power*, el cual utiliza tecnología basada en electrónica de potencia y es utilizado para el mejoramiento de la calidad de la energía eléctrica ante perturbaciones en la red de distribución. Entre las principales opciones de compensación que el D-STATCOM puede ofrecer están: mitigación de la distorsión armónica y del desequilibrio en las corrientes que demanda la carga, mejoramiento del factor de potencia, entre otras.

Con base en lo anterior, se ha planteado el presente trabajo de grado, en donde se pretende avanzar en el conocimiento sobre las opciones de compensación y funcionamiento del D-STATCOM asumiendo una carga conectada a una red de distribución con tensiones desbalanceadas y distorsionadas.

Para la realización de este proyecto se usa la interfaz gráfica ATPDraw del programa ATP; el cual es un recurso informático de uso libre y cuya aplicación como simulador de sistemas de distribución de potencia, permite hacer un análisis apropiado del D-STATCOM.

1. GENERALIDADES

1.1. Calidad de la energía eléctrica

“La calidad de la energía eléctrica es el conjunto de características físicas de las señales de tensión y corriente, para un tiempo y lugar determinados, que tienen el propósito de satisfacer necesidades del cliente” [9].

Las perturbaciones que ocurren en el sistema eléctrico afectan la calidad de la energía eléctrica; las cuales son causadas por fallas, cargas no lineales, descargas atmosféricas y/o por cargas dinámicas de maniobra y operaciones en los sistemas aperturas o cierres de cargas considerables, entre otros. [4]

La Calidad del servicio de energía eléctrica se divide en tres aspectos:

- ✓ Continuidad del suministro: Se mide por el número y la duración de las interrupciones del servicio.
- ✓ Calidad de atención comercial al cliente: Se refleja en la capacidad de atención al cliente y en el suministro de información oportuna.
- ✓ Calidad de la energía eléctrica: Se evalúan principalmente los parámetros o características de las señales eléctricas.

Con la utilización del D-STATCOM se busca que las señales de corriente tengan las características [3]:

- ✓ Forma de onda: es la forma característica de una señal en el dominio del tiempo. La forma de onda ideal en los sistemas de distribución AC es la señal sinusoidal.
- ✓ Fase: es la parte constante del argumento de una señal sinusoidal.
- ✓ Amplitud de onda: la amplitud de una onda sinusoidal es el valor máximo, tanto positivo como negativo, que puede llegar a adquirir la onda sinusoidal.

- ✓ Frecuencia de la onda: la frecuencia (f) del movimiento ondulatorio se define como el número de oscilaciones completas o ciclos por segundo ($f=1/T$).

1.2. Perturbaciones de la señales de tensión y/o corriente

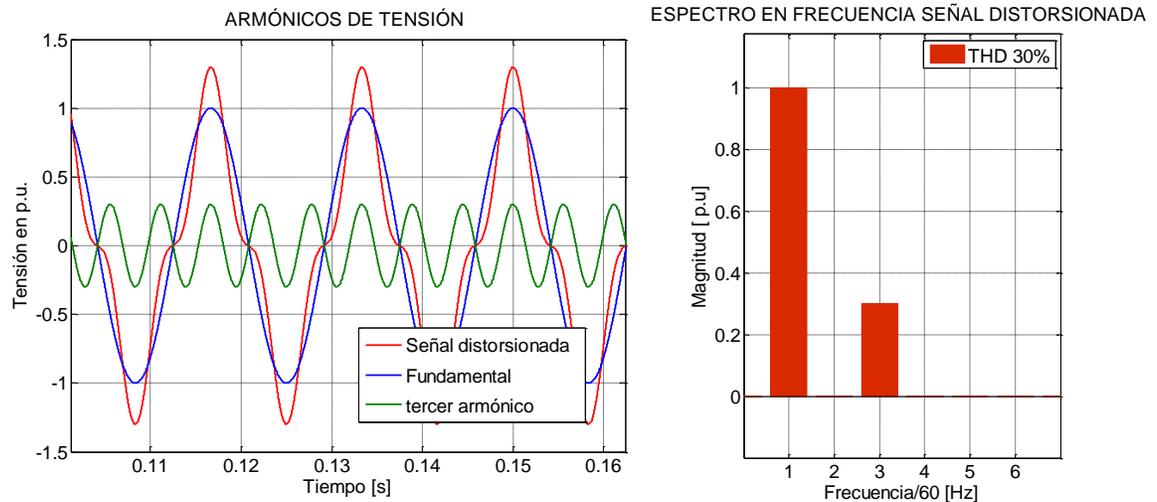
Las perturbaciones que se presentan en esta sección no son todas las que pueden existir en los sistemas de distribución. Solo se muestran algunas perturbaciones que afectan las señales de tensión y/o corriente y que se tendrán en cuenta para analizar el desempeño del D-STATCOM.

1.2.1. Armónicos

Los armónicos en tensión y/o corrientes son señales sinusoidales con frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia de operación del sistema eléctrico. A esta frecuencia de operación se le denomina frecuencia fundamental. La superposición de ondas de diferentes frecuencias a la fundamental se le conoce como ondas armónicas que producen distorsión a la onda de tensión y/o corriente [3].

Por ejemplo la forma de onda de la figura 1 es el resultado de la suma de una señal de frecuencia fundamental a 60 Hz y el tercer armónico cuya amplitud está definida como el 0,3 en por unidad (p.u.) del fundamental.

Figura 1. Componentes armónicas de una señal de tensión y el espectro en frecuencia de la señal



Tomado de la referencia [2]

Los niveles de distorsión armónica pueden ser caracterizados por el espectro armónico en magnitud y ángulos de fase de cada componente armónica individual. También es común el uso de la Distorsión Armónica Total o (THD por sus siglas en ingles *Total Harmonic Distortion*) como una medida de la magnitud de la distorsión [2].

Apartir de las siguientes ecuaciones se puede calcular la distorsión armónica en tensión y corriente:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n V_i^2}}{V_1} \quad (1.1)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n I_i^2}}{I_1}$$

Donde V_i, I_i, V_1, I_1 , corresponde a la magnitud de la componente armónica i -ésima de la tensión y corriente y la magnitud de la componente fundamental de la tensión y corriente respectivamente.

1.2.2. Desbalance

El desbalance está definido como la relación de la componente de secuencia negativa con respecto a la componente de secuencia positiva en un sistema trifásico y como la relación de la componente de secuencia cero con respecto a la secuencia positiva, expresada en forma porcentual. Por lo general, el desbalance de tensión trifásico debe ser inferior al 3% y el desbalance en corriente deber ser inferior al 30% [2]. Matemáticamente, el desbalance esta representado por la ecuación (1.2) y (1.3).

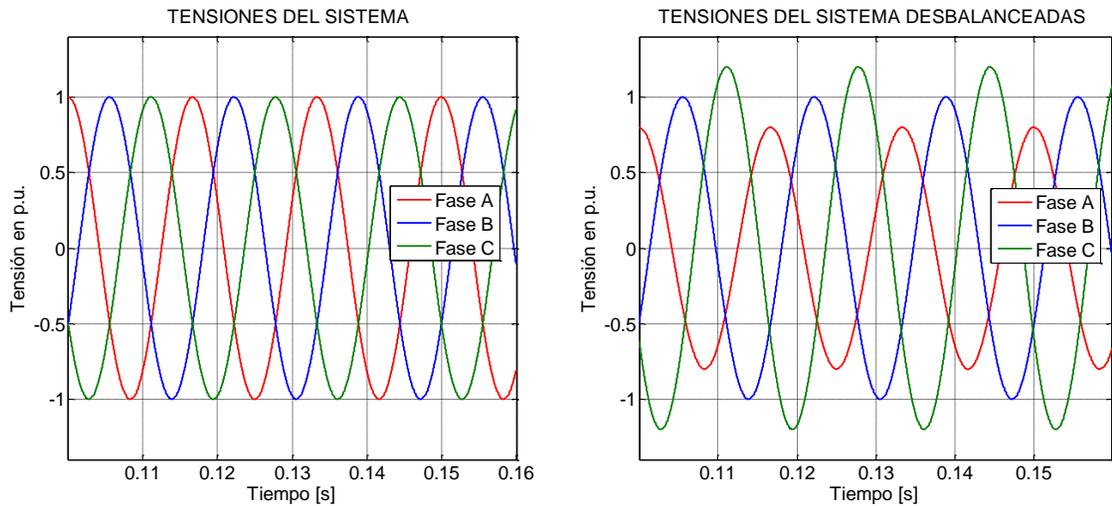
$$\%DesbalanceV^- = \frac{|V_{neg}|}{|V_{pos}|} \cdot 100\% \quad (1.2)$$

$$\%DesbalanceI^- = \frac{|I_{neg}|}{|I_{pos}|} \cdot 100\%$$

$$\%DesbalanceV^0 = \frac{|V_{cero}|}{|V_{pos}|} \cdot 100\% \quad (1.3)$$

$$\%DesbalanceI^0 = \frac{|I_{cero}|}{|I_{pos}|} \cdot 100\%$$

Figura 2. Desbalance de Tensión



Tomado de la referencia [3]

Un gráfico representativo de un desbalance de tensión puede observarse en la figura 2, donde se muestra la diferencia entre un sistema trifásico balanceado y un sistema desbalanceado.

1.3. Dispositivos de compensación

Con el fin de atenuar las perturbaciones que se presenta en una red de distribución se han desarrollado diversas soluciones que permite mantener altos niveles en cuanto a calidad de la energía se refiere. Dentro de estas soluciones se encuentra los dispositivos *Custom Power*, basados en tecnología de estado sólido que tienen como finalidad mantener un buen nivel en la calidad de la energía eléctrica que se transporta y mejorar la confiabilidad en los sistemas de distribución. Existen una gran variedad de dispositivos *Custom Power*, estos son conectados ya sea en paralelo, en serie o una combinación de ambos [6].

Los *Custom Power* pueden clasificarse en dispositivos de tipo reconfiguración y de tipo compensación.

Tipo reconfiguración:

- ✓ Limitador de Corriente de Estado Sólido (SSCL, *Solid State Current Limiter*),
- ✓ Interruptor de Estado Sólido (SSB, *Solid State Breaking*)
- ✓ Interruptor de Transferencia de Estado Sólido (SSTS, *Solid State Transfer Switch*)

Tipo compensación:

- ✓ Acondicionador Dinámico de Tensión (DVR, *Dynamic Voltage Restorer*)
- ✓ Compensador Estático de Potencia para Sistemas de Distribución (D-STATCOM, *Distribution Static Compensator*)
- ✓ Acondicionador Unificado de la Calidad de la Energía (UPQC, *Unified Power Quality Conditioner*) [5].

Los dispositivos de tipo compensación pueden ser colocados para regular las corrientes y tensiones del sistema de distribución o de una carga específica o en un parque comercial o industrial.

De acuerdo a la figura 3, la señal de referencia i_q , calculada a partir de la tensión y/o corriente de la red, junto con la señal de control de la tensión del bus de DC i_p , conforman la señal de compensación de referencia i_c^* ; esta señal se alimenta al control del convertidor para generar la secuencia de conmutación en el inversor que produce la corriente de compensación inyectada a la red i_c [5, 13].

El condensador del convertidor almacena la energía requerida para generar las corrientes de compensación, este se carga hasta un valor de tensión de referencia definido por un control de lazo cerrado que determina la tensión del bus de DC [5, 13].

El D-STATCOM tiene dos modos de operación, puede operar en modo corriente o en modo tensión, independiente del modo de operación, su funcionamiento se basa en algoritmos que permiten estimar las corrientes de compensación que deben inyectarse a la red con el fin de mitigar las perturbaciones de interés [5, 13].

La compensación que puede realizar el D-STATCOM, en modo corriente, incluye:

- ✓ Factor de potencia
- ✓ Armónicos de Corriente
- ✓ Desbalance de carga

2.2. Estructura del D-STATCOM

El D-STATCOM esta conformado por un convertidor de potencia que es el responsable de entregar las corrientes de compensación a la red. La inyección de corriente, se hace generalmente a través de bobinas de acople, que permiten la controlabilidad del compensador y reducen los armónicos de alta frecuencia presentes en las corrientes de compensación [13].

Los inversores de potencia, son equipos que utilizan configuraciones de interruptores electrónicos controlables para transformar una señal eléctrica en DC a otra en AC. Esto es posible, gracias al uso de una técnica de control que gobierna la conmutación de los interruptores en el inversor y a un algoritmo que permite controlar la tensión en el lado de DC del inversor. Independientemente del tipo de inversor seleccionado, todos usan interruptores electrónicos controlados, que pueden ser BJT, MOSFET, IGBT, GTO; siendo los IGBT's los mas usados [5, 13].

2.2.1. Convertidor de potencia

Los convertidores de potencia de DC en AC conocidos como inversores, suelen clasificarse de acuerdo al elemento almacenador de energía. Si se utiliza un condensador como elemento almacenador de energía, el convertidor es llamado inversor tipo fuente de tensión VSI (*Voltage Source Inverter*), o si se utiliza una bobina, entonces es llamado inversor tipo fuente de corriente CSI (*Current Source Inverter*).

2.2.1.1. Topologías

Los inversores de potencia pueden ser monofásicos, trifásicos de tres hilos y trifásico de cuatro hilos. La elección de la topología más adecuada para el convertidor de potencia depende del número de fases y de hilos que tiene el sistema al que se va a conectar; además de la capacidad y las opciones de compensación que puede ofrecer.

Las topologías más utilizadas en convertidores de potencias trifásicos son: inversor de tres ramas completo TLFB (*Three-Leg Full Bridge*), inversor de tres ramas con condensador partido TLSC (*Three-Leg Split-Capacitor*), inversor de cuatro ramas en puente completo FLFB (*Four-Leg Full Bridge*) y el inversor en

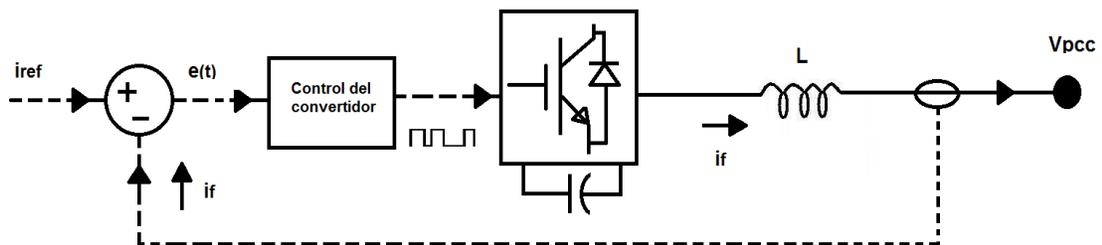
puente completo de cuatro hilos TBFW (*Three-Bridge Four Wire*). Para una mayor información sobre las topologías puede consultar la referencia [13].

En el trabajo que se está presentado, se utiliza la estructura VSI con la topología del inversor FLFB para realizar las simulaciones.

2.2.2. Control del convertidor de potencia

Cada rama del convertidor de potencia posee dispositivos semiconductores, estos dispositivos deben ser conmutados en un orden específico para generar una señal de corriente o tensión en AC. La secuencia de conmutación debe garantizar que la corriente inyectada por el D-STATCOM siga la señal de referencia. Los algoritmos de control pueden ser de lazo abierto o lazo cerrado [5, 13]. Para este trabajo se va a utilizar una técnica de lazo cerrado. En la figura 4 se muestra un esquema de un convertidor de potencia de conexión paralela con control de lazo cerrado conectado a un punto de conexión común (PCC).

Figura 4. Esquema de control de lazo cerrado del convertidor de potencia

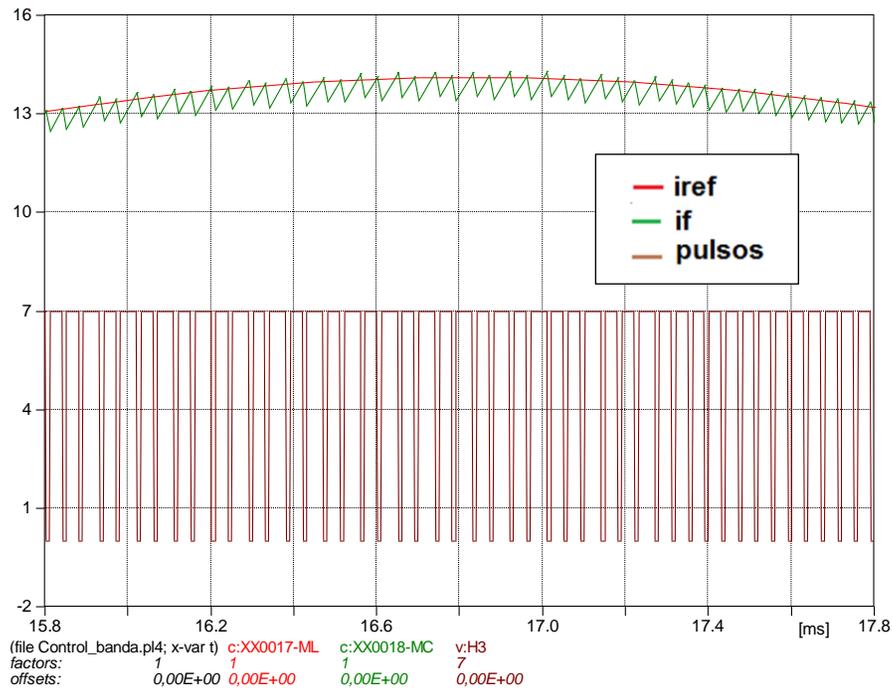


Fuente: [13]

2.2.2.1. Control de la secuencias de conmutación por modulación delta (MD)

Este control emplea una banda de histéresis de valor nulo a una frecuencia de conmutación constante. La lógica del funcionamiento del control se realiza de la siguiente manera: cada período de muestreo se compara teniendo la señal de referencia con la señal generada por el inversor, con el fin de conmutar los transistores tal que se genere una corriente de característica lineal creciente o decreciente, dependiendo de si se quiere aumentar o disminuir la corriente generada por el inversor. La variación de corriente inyectada por el inversor, depende del valor de la tensión y del valor de la inductancia que se usa para conectar el inversor a la red en el punto de conexión común. De esta manera, si se requiere un incremento positivo, la tensión en la bobina debe ser positiva o negativa en el caso contrario [13]. Ver figura 5.

Figura 5. Control por mudulación delta



Fuente: [autor]

2.2.2.2. Control del bus de continua del convertidor de potencia

El convertidor de potencia presenta pérdidas de potencia internas que tienden a modificar la tensión del bus de continua. El control del bus de continua se encarga de mantener la tensión en el condensador en torno a un valor establecido como referencia [12].

Para calcular las corrientes de pérdidas se requiere un algoritmo de control que calcule las corrientes de compensación. Una buena estimación para el cálculo de estas corrientes de pérdidas, se obtiene al calcular la potencia de pérdidas que demanda el convertidor del sistema eléctrico al que esta conectado. Un método para el cálculo de las corrientes de compensación i_{perd} a partir de la potencia de pérdidas, se muestra en la expresión (2.2) [12].

$$i_{perd} = \frac{\Delta P_{dc}}{\|v\|^2} v \quad (2.2)$$

En esta expresión, ΔP_{dc} es la potencia de pérdidas, v es la tensión en el PCC, $\|v\|$ representa el valor eficaz de la tensión de línea en condiciones balanceadas. La potencia de pérdidas del convertidor es, ΔP_{dc} y se calcula con un controlador PI. Las corrientes de referencia por fase, para la regulación de la tensión del bus de continua (DC) se calcula siguiendo (2.3). Para mayor información del control del bus de continua consulte la referencia [13].

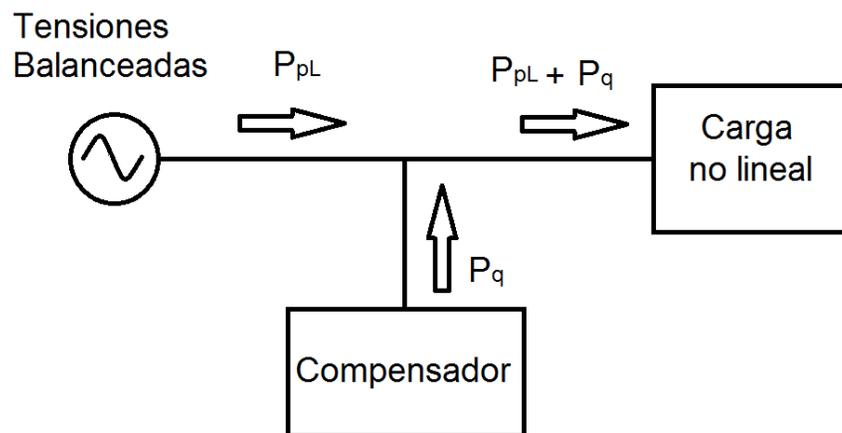
$$\begin{aligned} i_{perd a} &= \frac{\Delta P_{dc}}{\|v\|^2} v_a \\ i_{perd b} &= \frac{\Delta P_{dc}}{\|v\|^2} v_b \\ i_{perd c} &= \frac{\Delta P_{dc}}{\|v\|^2} v_c \end{aligned} \quad (2.3)$$

3. ANÁLISIS DE LA POTENCIA INSTÁNTANEA DEL COMPENSADOR

3.1. Análisis de la potencia con tensiones ideales del sistema

Analizando la descomposición de la potencia instantánea se tiene que la potencia que entrega el compensador a la red cuando las tensiones en el sistema son balanceadas, corresponde a la potencia no activa P_q , esta potencia está conformada principalmente por potencia reactiva, potencia debida a los armónicos y al desbalance. La potencia activa P_{pL} que consume la carga, será la potencia que entrega el sistema a la carga, ver la figura 6.

Figura 6. Balance de potencia entre la red, la carga y el compensador bajo tensiones balanceadas



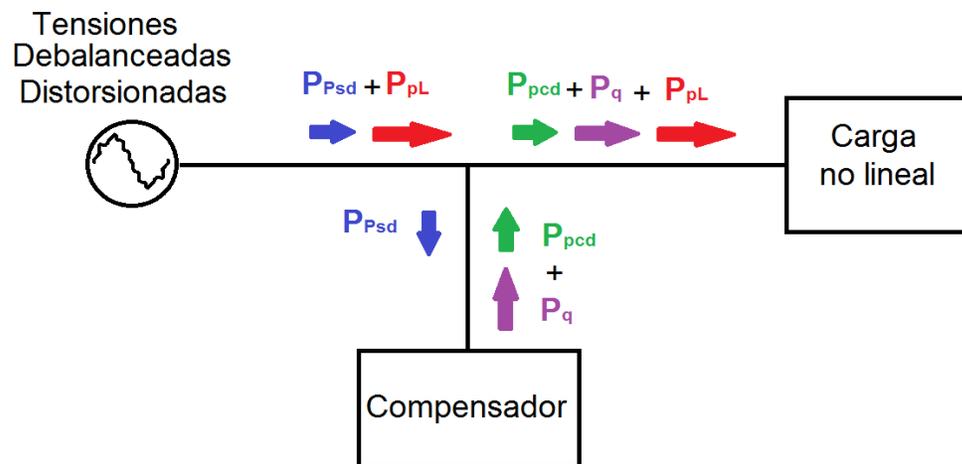
Fuente: [10]

3.2. Análisis de la potencia con tensiones desbalanceadas y/o distorsionadas del sistema

El compensador cuando está bajo tensiones desbalanceadas y/o distorsionadas debe entregar a la carga potencia no activa P_q y también, potencia activa debido a la interacción entre los armónicos de la tensión y de la corriente P_{pcd} , está

potencia es igual a P_{psd} que es la potencia tomada de la red del sistema por medio del compensador a través de una componente a 60 Hz de secuencia positiva, lo que significa que el intercambio de potencia activa neta del compensador es nulo. La potencia activa P_{pL} que consume la carga es la entregada por el sistema, ver figura 7.

Figura 7. Balance de potencia entre la red, la carga y el compensador bajo tensiones desbalanceadas y/o distorsionadas



Fuente: [10]

3.2.1. Componentes simétricas

Para analizar los sistemas trifásicos desbalanceados se utiliza la transformada de Fortescue o de las componentes simétricas, que permite escribir de forma general un sistema trifásico desbalanceado como la suma de tres sistemas balanceados aplicando el principio de superposición [10]. La transformada Fortescue establece que si se tiene un sistema trifásico cualquiera donde sus componentes sean v_a , v_b y v_c el sistema se puede representar de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} v_a &= v_a^0 + v_a^+ + v_a^- \\ v_b &= v_b^0 + v_b^+ + v_b^- \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$v_c = v_c^0 + v_c^+ + v_c^-$$

Donde v_a^0, v_b^0, v_c^0 constituyen un sistema en el cual $v_a^0 = v_b^0 = v_c^0$ son iguales en magnitud y en fase, v_a^+, v_b^+, v_c^+ constituyen un sistema de secuencia positiva y v_a^-, v_b^-, v_c^- constituyen un sistema de secuencia negativa [10], la transformación se escribe como (3.2) y donde $\alpha = 1 \angle 120^\circ$ es un operador complejo de desplazamiento en 120°

$$\begin{bmatrix} v_a^0 \\ v_a^+ \\ v_a^- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Y su inversa esta dada como (3.3)

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a^0 \\ v_a^+ \\ v_a^- \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Ahora se extiende el análisis para sistemas trifásicos con armónicos, las formas de la tensión pueden ser descompuestas en sus componentes de Fourier como (3.4) y escribiéndolas en notación fasorial como en (3.5), donde n corresponde el número del armónico.

$$\begin{aligned} v_a &= \sum_{n=1}^{\infty} V_{an} \sin(\omega_n t + \varphi_{an}) \\ v_b &= \sum_{n=1}^{\infty} V_{bn} \sin(\omega_n t + \varphi_{bn}) \\ v_c &= \sum_{n=1}^{\infty} V_{cn} \sin(\omega_n t + \varphi_{cn}) \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \vec{V}_a &= \sum_{n=1}^{\infty} V_{an} \angle \varphi_{an} = \sum_{n=1}^{\infty} \vec{V}_{an} \\ \vec{V}_b &= \sum_{n=1}^{\infty} V_{bn} \angle \varphi_{bn} = \sum_{n=1}^{\infty} \vec{V}_{bn} \\ \vec{V}_c &= \sum_{n=1}^{\infty} V_{cn} \angle \varphi_{cn} = \sum_{n=1}^{\infty} \vec{V}_{cn} \end{aligned} \quad (3.5)$$

A continuación se aplica la transformada de Fortescue a cada grupo de fasores armónicos a-b-c para determinar sus componentes de secuencia positiva, negativa y cero.

$$\begin{bmatrix} \overrightarrow{V_{an}^0} \\ \overrightarrow{V_{an}^+} \\ \overrightarrow{V_{an}^-} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overrightarrow{V_{an}} \\ \overrightarrow{V_{bn}} \\ \overrightarrow{V_{cn}} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Y su inversa esta dada por:

$$\begin{bmatrix} \overrightarrow{V_{an}} \\ \overrightarrow{V_{bn}} \\ \overrightarrow{V_{cn}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overrightarrow{V_{an}^0} \\ \overrightarrow{V_{an}^+} \\ \overrightarrow{V_{an}^-} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Las expresiones en el tiempo equivalente a los fasores obtenidos en (3.7) pueden ser expresadas para el n-ésimo componente armónico de la tensión según:

$$\begin{aligned} v_{an}(t) &= V_{an}^0 \sin(\omega_n t + \varphi_{0n}) + V_{an}^+ \sin(\omega_n t + \varphi_{+n}) + V_{an}^- \sin(\omega_n t + \varphi_{-n}) \\ v_{bn}(t) &= V_{an}^0 \sin(\omega_n t + \varphi_{0n}) + V_{an}^+ \sin\left(\omega_n t + \varphi_{+n} - \frac{2\pi}{3}\right) + V_{an}^- \sin\left(\omega_n t + \varphi_{-n} + \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{cn}(t) &= V_{an}^0 \sin(\omega_n t + \varphi_{0n}) + V_{an}^+ \sin\left(\omega_n t + \varphi_{+n} + \frac{2\pi}{3}\right) + V_{an}^- \sin\left(\omega_n t + \varphi_{-n} - \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (3.8)$$

3.2.2. Ejemplo de una carga trifásica resistiva y tensiones del sistema con un quinto armónico

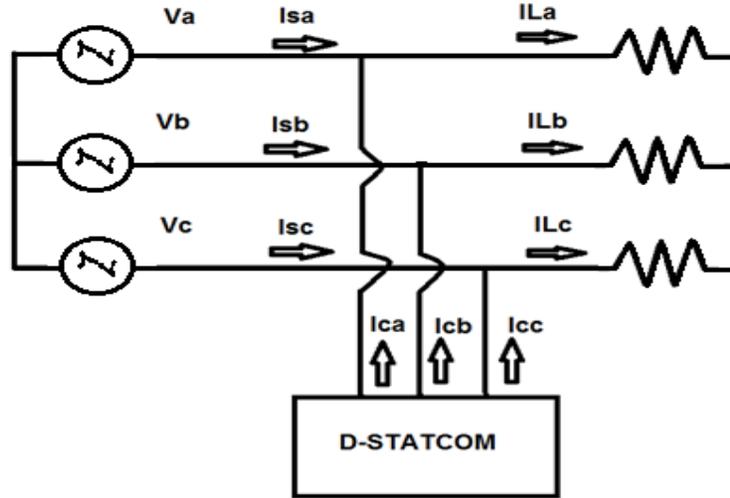
Para una mayor comprensión del flujo de las potencias se analiza un ejemplo, como se observa en la figura 8, donde la carga trifásica es resistiva $R_{a,b,c} = 1 \Omega$ y las tensiones del sistema contienen un quinto armónico como se muestra en las expresiones (3.9)

$$v_a = 120 \sin(\omega t) + 24 \sin(5\omega t)$$

$$v_b = 120 \sin(\omega t - 120) + 24 \sin(5\omega t + 120) \quad (3.9)$$

$$v_c = 120 \sin(\omega t + 120) + 24 \sin(5\omega t - 120)$$

Figura 8. Carga resistiva trifásica y tensiones del sistema con armónicos



Fuente: autor

Se calculan las corrientes que alimenta la carga como en la expresión (3.10)

$$\begin{aligned} i_{La} &= \frac{v_a}{R} = 120 \sin(\omega t) + 24 \sin(5\omega t) \\ i_{Lb} &= \frac{v_b}{R} = 120 \sin(\omega t - 120) + 24 \sin(5\omega t + 120) \\ i_{Lc} &= \frac{v_c}{R} = 120 \sin(\omega t + 120) + 24 \sin(5\omega t - 120) \end{aligned} \quad (3.10)$$

Se halla la potencia instantánea que consume la carga de la fase a en (3.11), la potencia promedio de las fases como en (3.12) y la potencia activa total que consume la carga se muestra en (3.13).

$$\begin{aligned} p_{La} &= v_a \cdot i_{La} = (120 \sin(\omega t) + 24 \sin(5\omega t)) \cdot (120 \sin(\omega t) + 24 \sin(5\omega t)) \\ p_{La} &= 120^2 \sin^2(\omega t) + 2 \cdot (120) \cdot (24) \sin(\omega t) \sin(5\omega t) + 24^2 \sin^2(5\omega t) \\ p_{La} &= 7200 - 7200 \cos(2\omega t) + 2880 \cos(-4\omega t) - 2880 \cos(6\omega t) + 288 \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$-288 \cos(10\omega t)$$

$$\overline{P_{La}} = 7200 + 288 = 7488 = \overline{P_{Lb}} = \overline{P_{Lc}} \quad (3.12)$$

$$\overline{P_{LT}} = \overline{P_{La}} + \overline{P_{Lb}} + \overline{P_{Lc}} = \underbrace{21600}_{P_{pL}} + \underbrace{864}_{P_{pcd}} = 22464 \quad (3.13)$$

Para hallar la corriente de compensación de la fase a se calcula mediante una conductancia equivalente G_e y con la tensión secuencia positiva v_a^+ como se muestran en las expresiones (3.14)-(3.17) y donde V^2 es la suma de las tensiones al cuadrado de secuencia positiva del sistema.

$$V^2 = (v_a^+)^2|_{t=0} + (v_b^+)^2|_{t=0} + (v_c^+)^2|_{t=0} = 0 + 10800 + 10800 = 21600 \quad (3.14)$$

$$G_e = \frac{\overline{P_{LT}}}{V^2} \quad (3.15)$$

$$G_e = \frac{22464}{21600} = 1,04 \quad (3.16)$$

$$i_{ca} = i_{La} - G_e \cdot v_a^+$$

$$i_{ca} = 120 \sin(\omega t) + 24 \sin(5\omega t) - 1,04 \cdot (120 \sin(\omega t)) \quad (3.17)$$

$$i_{ca} = -4,8 \sin(\omega t) + 24 \sin(5\omega t)$$

Se halla la potencia instantánea que inyecta el compensador de la fase a en (3.18), la potencia promedio del compensador de las fases como en (3.19) y la potencia activa total que inyecta el compensador en (3.20).

$$p_{ca} = i_{ca} \cdot v_a = (-4,8 \sin(\omega t) + 24 \sin(5\omega t)) \cdot (120 \sin(\omega t) + 24 \sin(5\omega t))$$

$$p_{ca} = -576 \sin(\omega t)^2 - 115,2 \sin(\omega t) \sin(5\omega t) + (120) \cdot (24) \sin(\omega t) \sin(5\omega t) + 24^2 \sin(5\omega t)^2 \quad (3.18)$$

$$p_{ca} = -288 + 288 \cos(2\omega t) + 1382,4 \cos(-4\omega t) - 1382,4 \cos(6\omega t) + 288 - 288 \cos(10\omega t)$$

$$\overline{P_{Ca}} = -288 + 288 = 0 = \overline{P_{Cb}} = \overline{P_{Cc}} \quad (3.19)$$

$$\overline{P_{CT}} = \overline{P_{Ca}} + \overline{P_{Cb}} + \overline{P_{Cc}} = \underbrace{-864}_{P_{psd}} + \underbrace{864}_{P_{pcd}} = 0 \quad (3.20)$$

Ahora se calcula la corriente del sistema de la fase a como la expresión (3.21), la potencia instantánea del sistema de la fase a en (3.22), la potencia promedio del sistema de las fases como en (3.23) y la potencia activa total que entrega el sistema al compensador y la carga en (3.24).

$$i_{sa} = i_{La} - i_{ca}$$

$$i_{sa} = 120 \sin(\omega t) + 24 \sin(5\omega t) - (-4,8 \sin(\omega t) + 24 \sin(5\omega t) + 24 \sin(5\omega t)) \quad (3.21)$$

$$i_{sa} = 124,8 \sin(\omega t)$$

$$p_{sa} = v_a \cdot i_{sa} = (120 \sin(\omega t) + 24 \sin(5\omega t)) \cdot (124,8 \sin(\omega t))$$

$$p_{sa} = (120)(124,8) \sin(\omega t)^2 + (124,8) \cdot (24) \sin(\omega t) \sin(5\omega t) \quad (3.22)$$

$$p_{sa} = 7488 - 7488 \cos(2\omega t) + 1497,6 \cos(-4\omega t) - 1497,6 \cos(6\omega t)$$

$$\overline{P_{Sa}} = 7200 + 288 = 7488 = \overline{P_{Sb}} = \overline{P_{Sc}} \quad (3.23)$$

$$\overline{P_{ST}} = \overline{P_{Sa}} + \overline{P_{Sb}} + \overline{P_{Sc}} = \underbrace{21600}_{P_{pL}} + \underbrace{864}_{P_{psd}} = 22464 \quad (3.24)$$

La potencia activa total que consume la carga

$$\overline{P_{LT}} = \underbrace{21600}_{P_{pL}} + \underbrace{864}_{P_{pcd}} = 22464 \quad (3.25)$$

La potencia activa total que entrega el compensador

$$\overline{P_{CT}} = \underbrace{-864}_{P_{psd}} + \underbrace{864}_{P_{pcd}} = 0 \quad (3.26)$$

La potencia activa total que entrega el sistema

$$\overline{P_{ST}} = \underbrace{21600}_{P_{pL}} + \underbrace{864}_{P_{psd}} = 22464 \quad (3.27)$$

Con lo anterior se demuestra que la potencia activa debido a los armónicos es entregada por el compensador, pero esta potencia es tomada de la red y el flujo neto de la potencia activa total del compensador es cero.

4. ALGORITMOS PARA CALCULAR LA CORRIENTE DE COMPENSACIÓN DEL D-STACOM

Para la estimación de las corrientes de compensación del D-STATCOM, pueden usarse algoritmos que operan en el dominio del tiempo o en el de la frecuencia. Sin embargo, para la realización de las simulaciones de este trabajo, se han seleccionado algunos algoritmos en el dominio del tiempo que se basan en la descomposición de la potencia instantánea que consume la carga.

4.1. Teoría en el sistema a-b-c

La compensación basada en la teoría de Fryze-Buccholz-Depenbrok, propone el concepto de una corriente instantánea de potencia i_{pp} que se muestra en la ecuación (4.1). Para esto se tiene en cuenta una conductancia variante en el tiempo g_e que se calcula en (4.2), donde v_{k0} son los valores de tensión en la k-ésima fase ($k = a, b, c$), y V_k son los valores eficaces de la tensión en la k-ésima fase están dados en la ecuación (4.3), en esta expresión, N representa el número de fases del sistema, 0 es un nodo de referencia, T es el periodo de las señales de tensión [9].

$$i_{ppk}(t) = g_e(t)v_{k0}(t) \quad (4.1)$$

$$g_e(t) = \frac{p_{\Sigma}(t)}{V_{\Sigma 0}^2(t)} \quad (4.2)$$

$$V_{\Sigma 0}(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v_{\Sigma 0}^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{k=a,b,c}^N V_k^2(t)} \quad (4.3)$$

El análisis que se presenta a continuación es para tensiones ideales en el punto de conexión común. Por lo tanto se permite definir las corrientes de la red según la siguiente expresión:

$$i_k(t) = \underbrace{i_{pk} + i_{vk}}_{i_{ppk}} + \underbrace{i_{p\emptyset k}}_{\text{potencia nula}} = \underbrace{i_{pk}}_{\text{activa}} + \underbrace{i_{qk}}_{\text{no activa}} \quad (4.4)$$

Según esta definición de la corriente, la componente i_{pk} , transporta la potencia activa por la red, tiene valor eficaz mínimo y está en fase con la carga; la corriente de variación i_{vk} , se debe a un intercambio de potencia de promedio nulo entre la red y la carga; y la componente de corriente $i_{p\phi k}$, no tiene ninguna implicación de intercambio de potencia. Las componentes de corriente i_{ppk} , transportan la misma potencia instantánea colectiva p_{Σ} que la transportada por la corriente total [10], lo cual en términos de potencia se expresa como:

$$p_{\Sigma}(t) = \sum_{k=a,b,c}^N v_{k0}(t) i_k(t) = \sum_{k=a,b,c}^N v_{k0}(t) i_{ppk}(t) \quad (4.5)$$

$$\sum_{k=a,b,c}^N v_{k0}(t) i_{p\phi k}(t) = 0 \quad (4.6)$$

Las corrientes de compensación aportan la componente de potencia no activa, por lo tanto el porte de potencia activa lo realiza la red, dada por i_{pk} y se definen en (4.7) [4].

$$i_{Ck}(t) = i_{Lk}(t) - i_{pk}(t) = i_{vk} + i_{p\phi k} \quad (4.7)$$

La corriente de compensación i_{Ck} de la ecuación (4.7) lleva una compensación perfecta cuando las tensiones del sistema son balanceadas y sinusoidales. Por lo tanto, cuando se trata de tensiones en el sistema con desbalance y/o distorsiones, se debe realizar una modificación a las ecuaciones (4.1), (4.2), (4.3) y (4.4), donde el vector de tensión v_{k0} debe contener solo la componente de secuencia positiva de la tensión en la k-ésima fase, quedando el conjunto de ecuaciones como se muestra en (4.8), (4.9), (4.10), (4.11) y (4.12).

$$i_{ppk}(t) = g_e(t) v_{k0}^+(t) \quad (4.8)$$

$$g_e(t) = \frac{p_{\Sigma}(t)}{V_{\Sigma 0}^{+2}(t)} \quad (4.9)$$

$$V_{\Sigma 0}^+(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v_{\Sigma 0}^{+2}(t) dt} = \sqrt{\sum_{k=a,b,c}^N V_k^{+2}(t)} \quad (4.10)$$

$$p_{\Sigma}(t) = \sum_{k=a,b,c}^N v_{k0}(t) i_k(t) = \sum_{k=a,b,c}^N v_{k0}(t) i_{ppk}(t) \quad (4.11)$$

$$\sum_{k=a,b,c}^N v_{k0}(t) i_{p\phi k}(t) = 0 \quad (4.12)$$

4.2. Teoría p-q trifásica en sistemas de tres hilos

Este algoritmo está basado en la transformación de Clarke que tiene por objetivo convertir los valores instantáneos de un sistema trifásico en el dominio a-b-c, a un sistema en el dominio α - β -0 y viceversa. La matriz de transformación de Clarke y su inversa se definen en la ecuación (4.13) [13].

$$T_{\alpha\beta 0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad T_{\alpha\beta 0}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

La teoría de la potencia reactiva instantánea p-q puede aplicarse para el control de compensadores como el D-STATCOM. Su desarrollo inicial fue hecho para sistemas trifásicos con secuencia cero nula (homopolar) y en el marco de referencia ortogonal α - β [5, 10, 13].

Para calcular las corrientes de compensación con la teoría p-q cuando las tensiones de los sistemas son balanceadas y sinusoidales se tienen las siguientes expresiones (4.14), (4.15), (4.16) y (4.17) [13].

$$\begin{bmatrix} 0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta 0} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta 0} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

$$p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta \quad (4.16)$$

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} - \frac{p}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Ahora bien, si las tensiones del sistema cambian y son desbalanceadas y/o distorsionadas se requiere usar las tensiones instantáneas de la componente de secuencia positiva del sistema v_a^+ , v_b^+ , y v_c^+ . La expresión (4.14) se modifica quedando como en (4.18) y las demás ecuaciones se mantienen.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta 0} \begin{bmatrix} v_a^+ \\ v_b^+ \\ v_c^+ \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

4.3. Teoría p-q modificada

La teoría p-q modificada es una expansión del concepto de la potencia reactiva q formulada en la teoría p-q original para ser aplicada a sistemas trifásicos de cuatro hilos. La diferencia radica en que la teoría p-q modificada considera las componentes de secuencia cero para v e i al momento de calcular la potencia reactiva instantánea q . Esta modificación define a q en términos de tres componentes de potencia no activa q_0 , q_α y q_β , que se obtienen del producto vectorial entre v e i [10, 13].

Las expresiones para calcular las corrientes de compensación con la teoría p-q modificada cuando las tensiones de los sistemas son balanceadas y sinusoidales se tienen en (4.19), (4.20), (4.21) y (4.22) [8].

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta 0} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta 0} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

$$p_{3\phi} = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 \quad (4.21)$$

$$\begin{bmatrix} i_{C0} \\ i_{C\alpha} \\ i_{C\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} - \frac{P_{L3\phi}}{v_{rms\alpha}^2 + v_{rms\beta}^2 + v_{rms0}^2} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

De la expresión (4.22) $P_{L3\phi}$ es la potencia activa trifásica y $v_{rms\alpha}$, $v_{rms\beta}$ y v_{rms0} son valores eficaces de las componentes v_α , v_β y v_0 [5, 10, 13].

Para el caso cuando las tensiones del sistema son desbalanceadas y/o distorsionadas se requiere usar las tensiones instantáneas de la componente de secuencia positiva del sistema v_a^+ , v_b^+ , y v_c^+ . Solo se modifica la ecuación (4.19).

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta 0} \begin{bmatrix} v_a^+ \\ v_b^+ \\ v_c^+ \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

4.4. Teoría d-q-0

La teoría d-q-0 está basada en la transformación de Park, la transformada de Park permite llevar las corrientes y tensiones instantáneas de fase del sistema trifásico a-b-c a un marco de referencia de coordenadas d-q-0, también llamado marco de referencia síncrono, por medio de la transformación matemática que se muestra en la expresión (4.24) [5, 10, 13].

$$[A] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ -\sin\theta & \sin(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta - 120^\circ) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

El ángulo θ de la matriz (4.24) se sincroniza a partir de las tensiones v_α y v_β hallas por medio de las tensiones del sistema a-b-c a la frecuencia fundamental, la ecuación para la sincronización aparecen en (4.25) y (4.26) [5, 10, 13].

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta 0} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{v_\beta}{v_\alpha} \right); \quad \cos\theta = \frac{v_\alpha}{\sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2}}; \quad \sin\theta = \frac{v_\beta}{\sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2}} \quad (4.26)$$

A partir de las corrientes obtenidas en el sistema de coordenadas α - β -0 se halla las componente de corriente i_d , i_q e i_0 , como se muestran en las expresiones (4.27), (4.28) y (4.29) [5, 10, 13].

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta 0} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2}} \begin{bmatrix} \sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2} & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

Las componentes de corriente i_d , i_q e i_0 del marco de referencia d-q-0, se dividen en una componente DC y una componente oscilatoria como se muestra en las ecuaciones (4.30)-(4.32) [5, 10, 13].

$$i_d = \bar{i}_d + \tilde{i}_d \quad (4.30)$$

$$i_q = \bar{i}_q + \tilde{i}_q \quad (4.31)$$

$$i_0 = \bar{i}_0 + \tilde{i}_0 \quad (4.32)$$

Las corrientes de compensación de esta teoría bajo tensiones balanceadas y sinusoidales se muestran en (4.33) [5, 10, 13].

$$\begin{bmatrix} i_{c0} \\ i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{i}_d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

La modificación que debe hacerse a esta teoría para usarse cuando las tensiones son desbalanceadas y/o distorsionadas de la red del sistema, es hallando las componentes de secuencia positiva de las tensiones de la red tomando la expresión (4.25) quedando la ecuación como en (4.34), las demás ecuaciones se siguen manteniendo igual.

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta 0} \begin{bmatrix} v_a^+ \\ v_b^+ \\ v_c^+ \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

4.5. Teoría p-q-r

La teoría p-q-r es una transformación del sistema de coordenadas α - β -0 al sistema de coordenadas p-q-r, esta transformación se logra apartir de las siguientes ecuaciones (4.35)-(4.39).

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta 0} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta 0} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

$$\begin{bmatrix} v_p \\ v_q \\ v_r \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{0\alpha\beta}} \begin{bmatrix} v_0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & -\frac{v_{0\alpha\beta}v_\beta}{v_{\alpha\beta}} & \frac{v_{0\alpha\beta}v_\alpha}{v_{\alpha\beta}} \\ v_{\alpha\beta} & -\frac{v_0v_\alpha}{v_{\alpha\beta}} & \frac{v_0v_\beta}{v_{\alpha\beta}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{0\alpha\beta}} \begin{bmatrix} v_0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & -\frac{v_{0\alpha\beta}v_\beta}{v_{\alpha\beta}} & \frac{v_{0\alpha\beta}v_\alpha}{v_{\alpha\beta}} \\ v_{\alpha\beta} & -\frac{v_0v_\alpha}{v_{\alpha\beta}} & \frac{v_0v_\beta}{v_{\alpha\beta}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

$$v_{0\alpha\beta} = \sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2 + v_0^2}; \quad v_{\alpha\beta} = \sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \quad (4.38)$$

$$v_p = \sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2 + v_0^2} = \sqrt{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \quad (4.39)$$

Para sistemas trifásicos, la tensión v_p , y las corrientes i_p e i_q en el marco de referencia p-q-r se puede representar en sus componentes de DC y oscilatoria.

$$v_p = \overline{v_p} + \widetilde{v_p} \quad (4.40)$$

$$i_p = \overline{i_p} + \widetilde{i_p} \quad (4.41)$$

$$i_q = \overline{i_q} + \widetilde{i_q} \quad (4.42)$$

Se concluye de la teoría p-q-r que la componente i_p hace el aporte de la potencia activa que consume la carga, las componentes i_q corresponde a la potencia no activa (reactivos, armónicos de secuencia negativa), la componente i_r corresponde a la componente de DC ó componente de secuencia homopolar [1, 7].

Las corrientes de compensación para la teoría p-q-r bajo tensiones balanceadas y sinusoidales esta dado por la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} i_{cp} \\ i_{cq} \\ i_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \widetilde{i_{Lp}} \\ i_{Lq} \\ i_{Lr} - \frac{v_0}{v_{\alpha\beta}} \text{val}(\widetilde{i_{Lp}}) \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

De la expresión (4.43) el $\text{val}(\widetilde{i_{Lp}})$ representa el valor numérico de la parte variable de la componente del eje p de la corriente de carga.

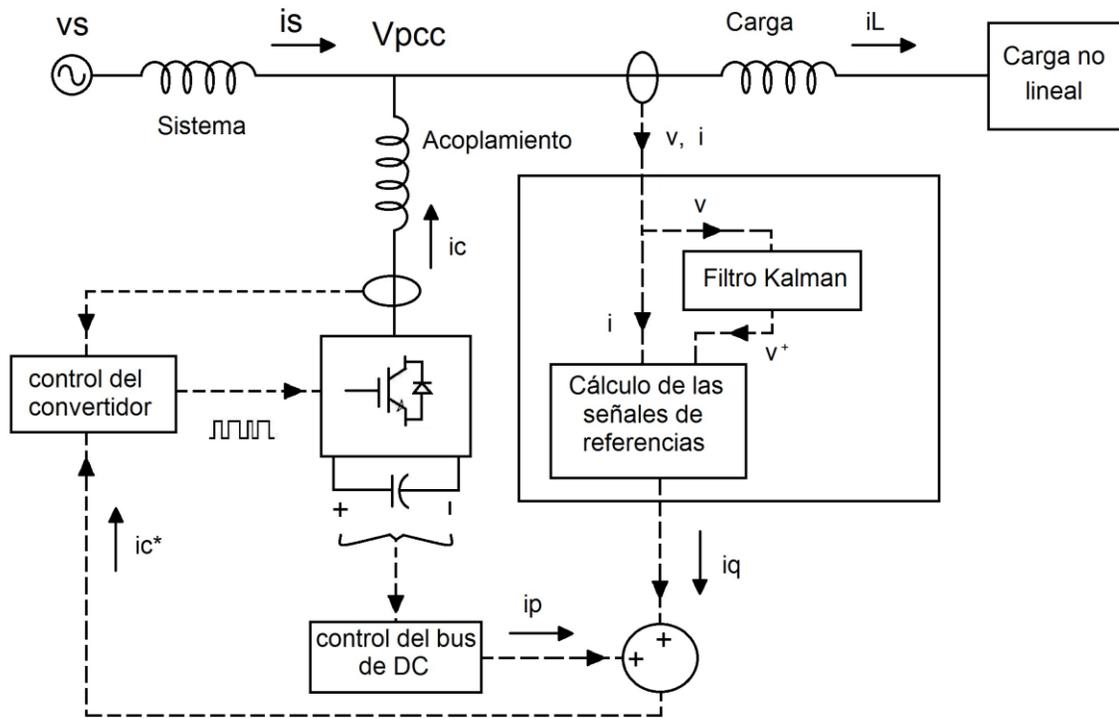
La teoría p-q-r puede ser aplicada cuando las tensiones del sistemas son desbalanceadas y/o distorsionadas teniendo en cuenta la secuencia positiva de las tensiones del sistema a-b-c para hallar las tensiones en el sistema de coordenadas α - β -0 modificando la expresión (4.35) y quedando como (4.44), las demás ecuaciones permanecen sin modificación.

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta 0} \begin{bmatrix} v_a^+ \\ v_b^+ \\ v_c^+ \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

4.6. Filtro Kalman

Es un algoritmo adaptativo que en este caso se usará para estimar la componente de secuencia positiva a la frecuencia fundamental de la señal de tensión trifásica desequilibrada y distorsionada [10]. En la figura 9 se muestra el esquema del uso del filtro Kalma en el D-STATCOM.

Figura 9. Esquema del D-STATCOM con el uso del Filtro Kalman



Fuente: [adaptada de 13]

El filtro Kalman es capaz de estimar óptimamente los principales parámetros de una señal, esto es, la amplitud, la fase y la frecuencia de la componente fundamental. Es un estimador de carácter recursivo, que permite estimar los estados de un sistema en tiempo real con poca dependencia de la historia de los estados medidos [10]. Teniendo el modelo del sistema y la relación entre la medida y los estados, sólo se necesita la medida en el instante k y el valor de los estados en el instante $k + 1$ para estimar los estados en el instante k y predecir los

estados en instantes posteriores como $k + 1$ [10]. Para profundizar en la materia se puede consultar [10].

Las ecuaciones que describen el algoritmo del filtro de Kalman es:

- Inicialización

Condiciones iniciales para los estados:

$$\hat{\mathbf{x}}^- = \mathbf{x}_0 \quad (4.45)$$

Condiciones iniciales para la matriz de covarianza del error:

$$\mathbf{P}^- = \mathbf{P}_0 \quad (4.46)$$

- Actualización de parámetros

Ganancia de Kalman:

$$\mathbf{K}(k) = \mathbf{P}^-(k)\mathbf{H}^T(k)[\mathbf{H}(k)\mathbf{P}^-(k)\mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}(k)]^{-1} \quad (4.47)$$

Actualización de la estimación con la medida $\mathbf{z}(k)$:

$$\hat{\mathbf{x}}(k) = \hat{\mathbf{x}}^-(k) + \mathbf{K}(k)[\mathbf{z}(k) - \mathbf{H}(k)\hat{\mathbf{x}}^-(k)] \quad (4.48)$$

Actualización de la covarianza del error:

$$\mathbf{P}(k) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k)\mathbf{H}(k)]\mathbf{P}^-(k) \quad (4.49)$$

- Proyección de la estimación

Proyección de los estados:

$$\hat{\mathbf{x}}^-(k+1) = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}(k)) \quad (4.50)$$

Proyección de la covarianza del error

$$\mathbf{P}^-(k+1) = \mathbf{F}(k)\mathbf{P}(k)\mathbf{F}^T(k) + \mathbf{Q}(k) \quad (4.51)$$

Las ecuaciones (4.45) a (4.51) constituyen el algoritmo del filtro Kalman lineal para el modelo descrito por la ecuación de estado (4.52) y la ecuación de medida (4.53) [9].

$$x(k + 1) = \Phi(k)x(k) + \mathbf{w}(k) \quad (4.52)$$

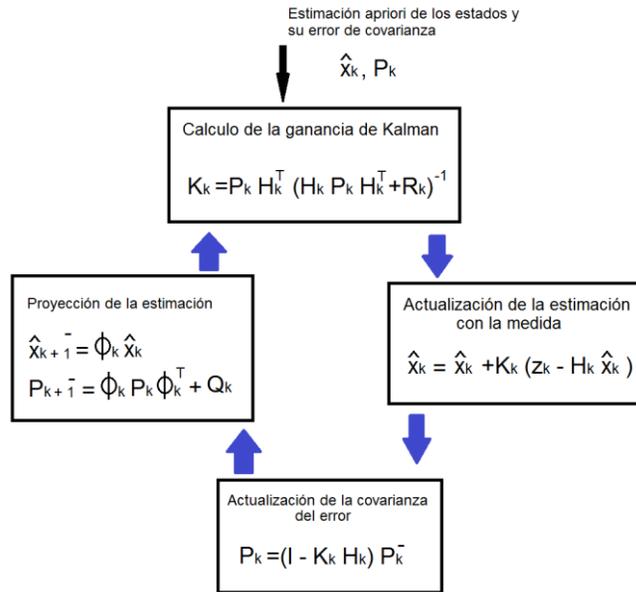
$$z(k) = \mathbf{H}(k)x(k) + \mathbf{u}(k) \quad (4.53)$$

Donde, $x(k + 1)$ es el vector de estados del proceso en el instante de tiempo $k + 1$; $\Phi(k)$ es la matriz que relaciona $x(k + 1)$ con $x(k)$; $\mathbf{H}(k)$ es la matriz que relaciona con el vector de estados; $\mathbf{w}(k)$ es el vector cuyos elementos pertenecen a secuencias con ruido blanco y representa la variación aleatoria de la variables de estado y $\mathbf{u}(k)$ es el vector cuyos elementos pertenecen a secuencias de ruido blanco y representan el error en la ecuación medida [10]. En la figura 10 se muestra el proceso de estimación usando el filtro de Kalman lineal.

La matriz de transición de estados es lineal si la matriz \mathbf{f} y la matriz \mathbf{F} en (4.50) y (4.51) tendrán el mismo valor de Φ en (4.52). Por lo tanto, si la matriz de transición de estados no es lineal, el algoritmo debe ser ajustado y se debe usar una extensión del filtro de Kalman. El filtro Extendido de Kalman implica que \mathbf{f} en (4.50) corresponde a la relación no lineal entre los estados en los instantes $k + 1$ y k , y \mathbf{F} en (4.54) corresponde a la matriz jacobiana dada por:

$$\mathbf{F} = \left. \frac{\partial f(x)}{\partial x} \right|_{\hat{x}(k)} \quad (4.54)$$

Figura 10. Proceso de estimación usando el filtro de Kalman lineal



Fuente [tomada de 10]

Modelo para señales trifásicas considerando las componentes simétricas

Las señales trifásicas v_a, v_b, v_c , pueden ser expresadas en función v^+, v^-, v^0 que representan las componentes de secuencia positiva, negativa y cero respectivamente. Usando las bases matemáticas dadas por Fortescue [10], es posible obtener el siguiente modelo en el dominio del tiempo:

$$\begin{aligned}
 v_a(t) &= v_a^0(t) + v_a^+(t) + v_a^-(t) \\
 v_b(t) &= v_b^0(t) + v_b^+(t) + v_b^-(t) \\
 v_c(t) &= v_c^0(t) + v_c^+(t) + v_c^-(t)
 \end{aligned} \tag{4.55}$$

Cada componente tiene su propia secuencia la ecuación (4.55) puede ser transformado en (4.56)

$$v_a = V^0 \cos(\theta^0) + V^+ \cos(\theta^+) + V^- \cos(\theta^-)$$

$$\begin{aligned}
v_b &= V^0 \cos(\theta^0) + V^+ \cos(\theta^+ - 120^\circ) + V^- \cos(\theta^- + 120^\circ) \quad (4.56) \\
v_c &= V^0 \cos(\theta^0) + V^+ \cos(\theta^+ + 120^\circ) + V^- \cos(\theta^- - 120^\circ)
\end{aligned}$$

Donde, $\theta^{0+-} = \omega_f t + \varphi^{0+-}$ representa la variación angular en función del tiempo por cada componente de secuencia.

Se consideran los siguientes estados:

$$\begin{aligned}
x_1 &= V^+ \cos(\theta^+) \\
x_2 &= V^+ \sin(\theta^+) \quad (4.57) \\
x_3 &= V^- \cos(\theta^-) \\
x_4 &= V^- \sin(\theta^-)
\end{aligned}$$

La ecuación de medida puede ser establecida por:

$$\mathbf{z}(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix} + \mathbf{u}(k) \quad (4.58)$$

Donde los estados x_1 y x_2 corresponde a la componente de secuencia positiva, y los estados x_3 y x_4 a la componente de secuencia negativa. La variable \mathbf{z} representa las medidas de las tensiones de fase menos la componente de secuencia cero [10]. La componente de secuencia cero esta dada en la ecuación (4.59)

$$v_a^0 = v_b^0 = v_c^0 = v^0 = \frac{v_a + v_b + v_c}{3} \quad (4.59)$$

Operando en la ecuación (4.58), las tensiones de línea son:

$$\begin{bmatrix} v_{ab}(t) \\ v_{bc}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & \sqrt{3} & 0 & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix} + \mathbf{u}(k) \quad (4.60)$$

Tomando en cuenta que los estados siguen una forma de onda sinusoidal, la ecuación de estado es como se muestra en la ecuación (4.61). Donde Φ está dado por (4.62) [10].

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ x_3(k+1) \\ x_4(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi & 0 \\ 0 & \Phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \\ x_4(k) \end{bmatrix} \quad (4.61)$$

$$\Phi(k) = \begin{bmatrix} \cos(\omega_f T_s) & -\text{sen}(\omega_f T_s) \\ \text{sen}(\omega_f T_s) & \cos(\omega_f T_s) \end{bmatrix} \quad (4.62)$$

Ahora se analiza las ecuaciones del filtro de Kalman para tener en cuenta los armónicos que distorsionan la onda de tensión. En primer lugar, es necesario disponer de una descripción matemática, tanto del sistema y de la medición. A continuación es necesario definir la señal a estudiar, la cual corresponderá a una señal sinusoidal con armónicos expresada por la siguiente ecuación [2]:

$$y_k = V_1(k) \cos(\omega k T_s + \varphi_1(k)) + \sum_{h=2}^n V_h(k) \cos(h\omega k T_s + \varphi_h(k)) \quad (4.64)$$

Para el siguiente paso ($k+1$)

$$y_{k+1} = V_1(k) \cos(\omega(k+1)T_s + \varphi_1(k)) + \sum_{h=2}^n V_h(k) \cos(h\omega(k+1)T_s + \varphi_h(k))$$

$$y_{k+1} = V_1(k) \cos(\omega k T_s + \varphi_1(k) + \omega T_s) + \sum_{h=2}^n V_h(k) \cos(h\omega k T_s + \varphi_h(k) + h\omega T_s) \quad (4.65)$$

Considerando como variables de estado:

$$x_{1,k} = V_1(k) \cos(\theta_1)$$

$$x_{2,k} = V_1(k) \sin(\theta_1)$$

$$\begin{aligned}
x_{3,k} &= V_2(k) \cos(\theta_2) \\
x_{4,k} &= V_2(k) \sin(\theta_2) \\
x_{2h-1,k} &= V_h(k) \cos(\theta_h) \\
x_{2h,k} &= V_h(k) \sin(\theta_h)
\end{aligned} \tag{4.66}$$

Para $\theta_h = h\omega T_s + \varphi_h(k)$

A partir de los cuales se puede definir la relación entre las ecuaciones (4.64) y (4.65) como:

$$x_{k+1} = \mathbf{C} \cdot x_k \tag{4.67}$$

Donde \mathbf{C} es la matriz que realaciona las variables de estados para un instante de tiempo t_k con t_{k+1} definida como la ecuación (4.68).

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \Phi_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \Phi_h \end{bmatrix} \tag{4.68}$$

Φ_h Se define como:

$$\Phi_h = \begin{bmatrix} \cos(h\omega T_s) & -\sin(h\omega T_s) \\ \sin(h\omega T_s) & \cos(h\omega T_s) \end{bmatrix} \tag{4.69}$$

En consecuencia, la medición en el instante k puede ser realacionada con las variables de estado en el instante $k + 1$, como:

$$y_{k+1} = \mathbf{H} \cdot x_{k+1} \tag{4.70}$$

Donde \mathbf{H} es la matriz que expresa la relación ideal entre la medición y el vector de estado en el t_k .

$$\mathbf{H} = [1 \ 0 \ \dots \ 1 \ 0] \quad (4.71)$$

La varianza de ruido \mathbf{R} puede ser seleccionada como un valor constante. Esto basado en la variación del ruido de fondo en las mediciones de campo. La matriz de covarianza \mathbf{Q} se selecciona para ser una matriz diagonal.

El modelo descrito también puede proporcionar la información de la amplitud de la señal $V_h(t)$ de y_k y el ángulo de fase, $\theta_h = h\omega T_s + \varphi_h(k)$ donde:

$$V_h(k) = \sqrt{x_{2h}^2 + x_{2h+1}^2} \quad (4.72)$$

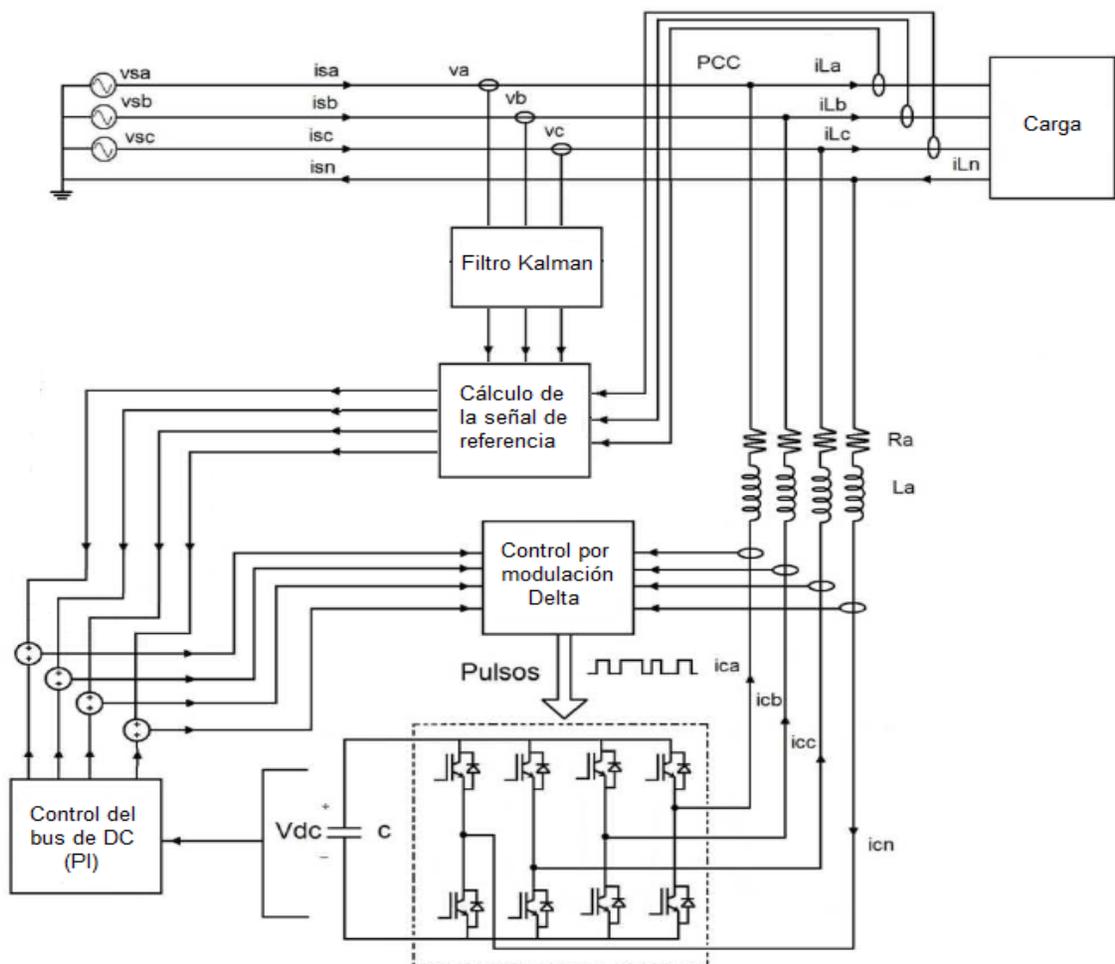
$$\theta(k) = \tan^{-1}(x_{2h+1}/x_{2h}) \quad (4.73)$$

Con este algoritmo se estima las amplitudes y ángulos de fase de cada componente armónica de una señal [2]. Estas componentes armónicas se utilizan para establecer la presencia de perturbación de tensión comparando los valores medidos con los valores de operación establecidos. Los armónicos que se tuvieron para distorsionar la onda de tensión fueron armónico 3, 5, 7 y 11.

5. SIMULACIONES DE LOS MODELOS DEL D-STATCOM

Para verificar el funcionamiento del D-STATCOM y el desempeño de los algoritmos de control, se realizaron en ATPDraw las simulaciones de los modelos del compensador conectados a una red de distribución afectada por perturbaciones en corriente y en tensión. En la figura 11 se muestra el esquema del D-STATCOM como compensador.

Figura 11. Esquema del D-STATCOM como compensador



Fuente [adaptada de 13]

5.1. Parámetros del D-STATCOM, estrategias de control y escenario de compensación

Para los modelos de D-STATCOM simulados, se usaron los siguientes parámetros y se tuvieron en cuenta las siguientes estrategias de control:

Parámetros del convertidor de potencia: la energía requerida para la compensación y la tensión de operación del bus de DC del convertidor, se obtiene de un condensador de $C = 400 [\mu F]$. El acople entre el D-STATCOM y la red se hace por medio de una impedancia RL serie, cuyos valores son $R = 0,1[\Omega]$ y $L = 2,12[mH]$.

Control de la tensión del bus de DC: Se estableció una tensión para el bus de DC de 900 [V], controlados mediante un regulador PI como se describió en el capítulo 2, sección 2.2.2.3; con valores $K_p = 10$ y $K_i = 20$, seleccionados mediante pruebas iterativas.

Control de convertidor de potencia: El control de las secuencias de conmutación de los transistores en el convertidor, se realizó mediante modulación delta descrito en el capítulo 2, sección 2.2.2.1. Se seleccionó un período de conmutación de $T = 50 [\mu s]$.

Cálculo de las corrientes de compensación: las corrientes de compensación, se calculan mediante los algoritmos basados en la teoría a-b-c, p-q sin componente homopolar, p-q modificada, d-q y p-q-r, descritos en el capítulo 4, secciones 4.1 a 4.5.

Cálculo de la tensión de referencia para la compensación: las tensiones del sistema se calculan bajo el algoritmo filtro Kalman, descrito en el capítulo 4, sección 4.6, donde se usó una ganancia de kalman de $k_1 = 8 \times 10^6$ y $k_2 = 3 \times 10^6$ y también para el modelo del filtro se consideraron los armónicos 3, 5, 7 y 11. El

escenario de compensación presentada comprende armónicos de corrientes por la red, bajo factor de potencia y desbalance de carga, con tensiones con valor eficaz de 208 [V] línea-línea en el punto de conexión común.

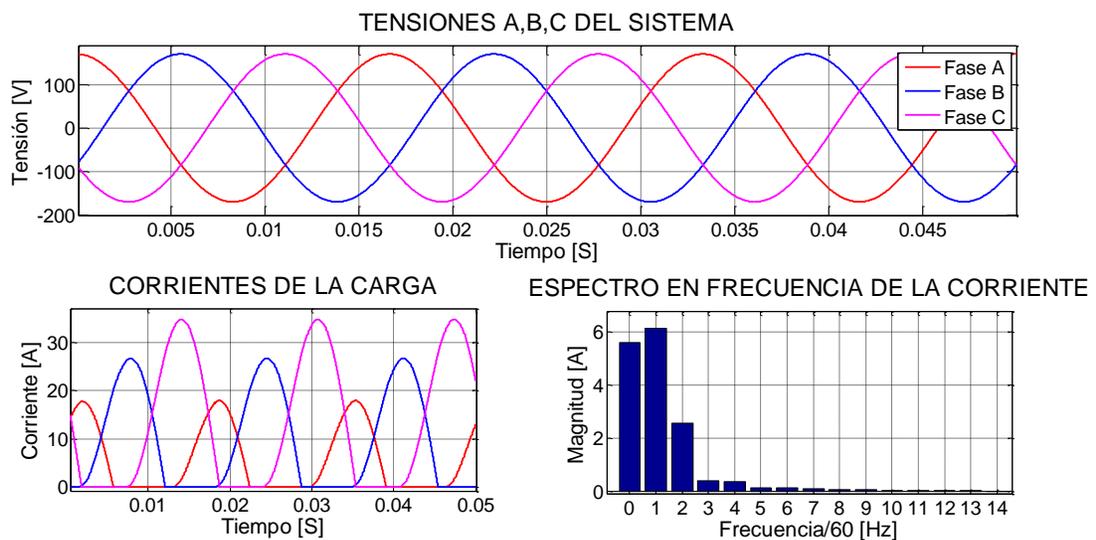
5.1.1. Simulación del D-STATCOM como compensador bajo tensiones balanceadas

Para todas las diferentes teorías de compensación se usa una carga no lineal desbalanceada conectada al PCC, constituida por tres rectificadores monofásicos de media onda bajo tensiones balanceadas ver anexo A. Las formas de onda de las corrientes que consume la carga por cada una de las fases y la tensión a la cual es alimentada, se muestra en la figura 12, los valores de la tensión en el PCC están dadas en (5.1).

$$\begin{aligned}
 v_a(t) &= \sqrt{2} (120 \text{ sen}(\omega_1 t)) \text{ [V]} \\
 v_b(t) &= \sqrt{2} (120 \text{ sen}(\omega_1 t - 120^\circ)) \text{ [V]} \\
 v_c(t) &= \sqrt{2} (120 \text{ sen}(\omega_1 t + 120^\circ)) \text{ [V]}
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

Donde, $\omega_1 = 2\pi f$ [rad/s] y $f = 60$ Hz.

Figura 12. Tensiones, corrientes por fase en el PCC de una carga no lineal desbalanceada y espectro en frecuencia de la corriente



En la figura 12 se puede ver la magnitud de la transformada de Fourier de la corriente de la carga antes de la compensación. Se observa que la distorsión generada en la corriente por la no linealidad de la carga se debe a la aparición de armónicos ubicados en todas las frecuencias múltiplo de la fundamental y a un aporte importante de la componente de DC.

En la mayoría de las simulaciones que se presentan a continuación, se muestran cuatro señales diferenciadas como se indica:

Señal en color rojo  : corriente de carga para la fase A [I_1]

Señal en color verde  : corriente de la red para la fase A [I_2]

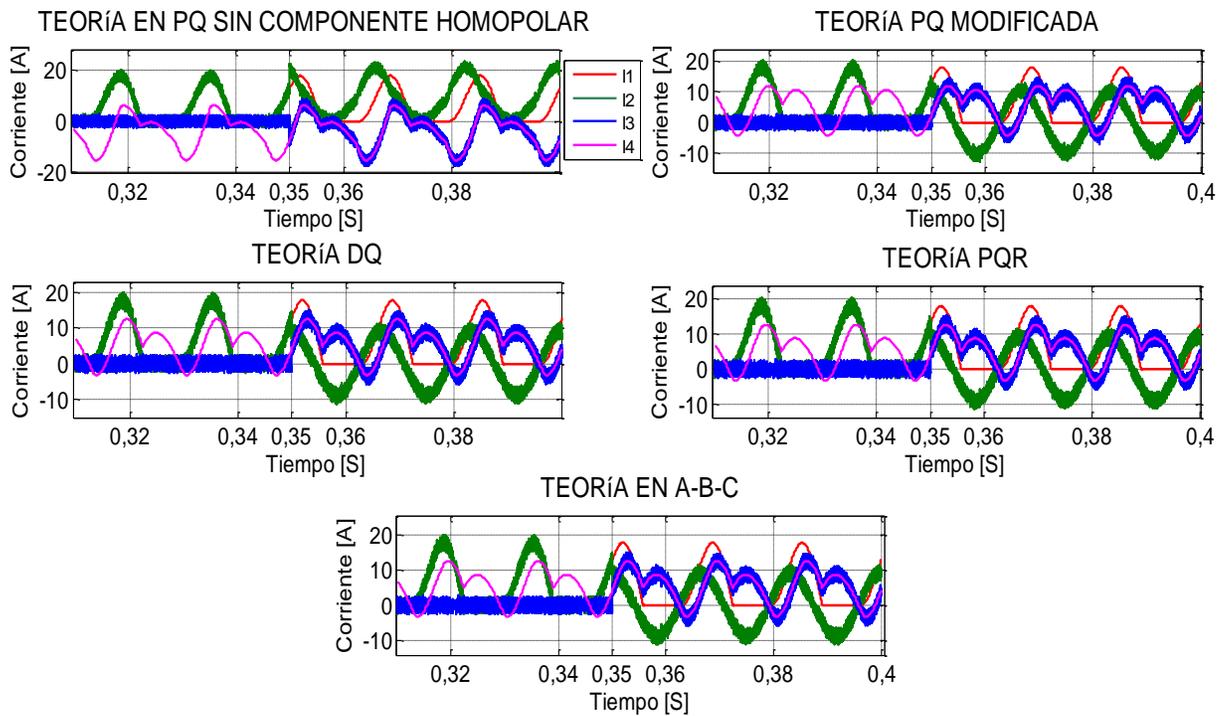
Señal en color azul  : corriente de compensación generada por el inversor para la fase A [I_3]

Señal en color rosado  : señal de referencia calculada por la fase A [I_4]

5.1.1.1. Análisis de las simulaciones

En la figura 13 se muestra el conjunto de corrientes relacionadas con la fase A del sistema, antes y después de la conexión del compesador estático, en donde se puede observar la no linealidad de las corrientes inyectadas por el D-STATCOM y el resultado de la compensación de corriente realizada mediante cada una de las teorías usadas. La compensación inicia en el tiempo $t = 0,35$ [s], y hace que se reduzca la cantidad de armónicos en las corrientes de la red. Sin embargo, los resultados de la compensación dependen del algoritmo usado en el cálculo de las señales de referencia.

Figura 13. Corriente de compensación de la carga no lineal de la fase A



La teoría pq sin componente homopolar muestra deficiencias en el cálculo de la corriente de compensación, cuando se presenta cargas que consume corrientes homopolares, pues las corrientes de secuencia cero continúan en el sistema como se observa en la figura 14 que corresponden a la corriente de retorno por el neutro cuando se utiliza esta teoría.

En los casos en los que se usa la teoría p-q modificada, teoría d-q, teoría p-q-r, teoría en a-b-c, la forma de onda de la corriente de la red es corregida, haciendo que se mitigue el contenido de armónicos de la señal inicial. También con el uso de las teorías mencionadas se observa que la corriente de retorno por el neutro se reduce a cero ver figura 14.

Figura 14. Corriente por el neutro durante la compensación de la carga no lineal

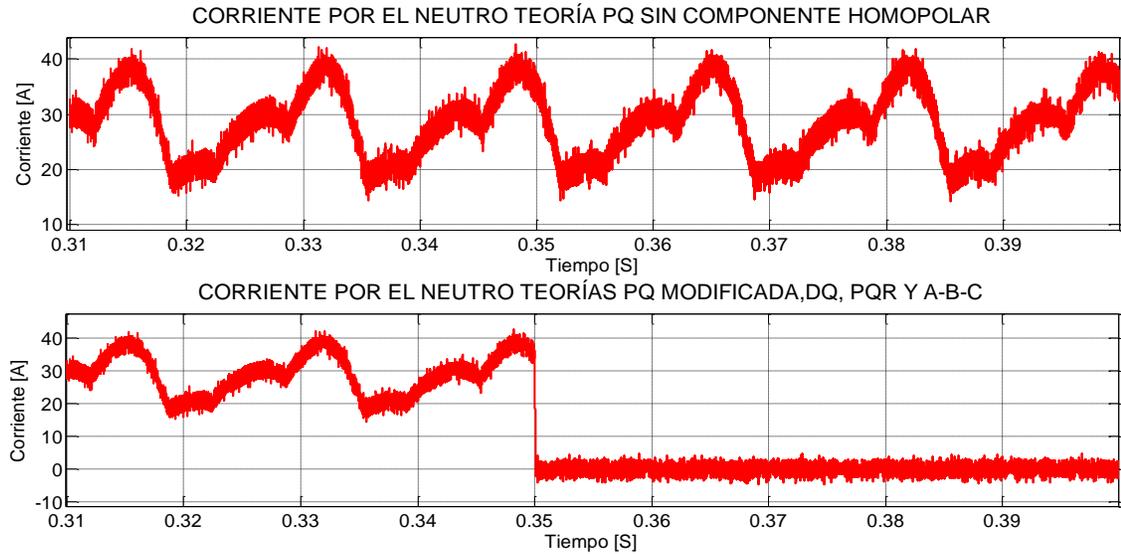
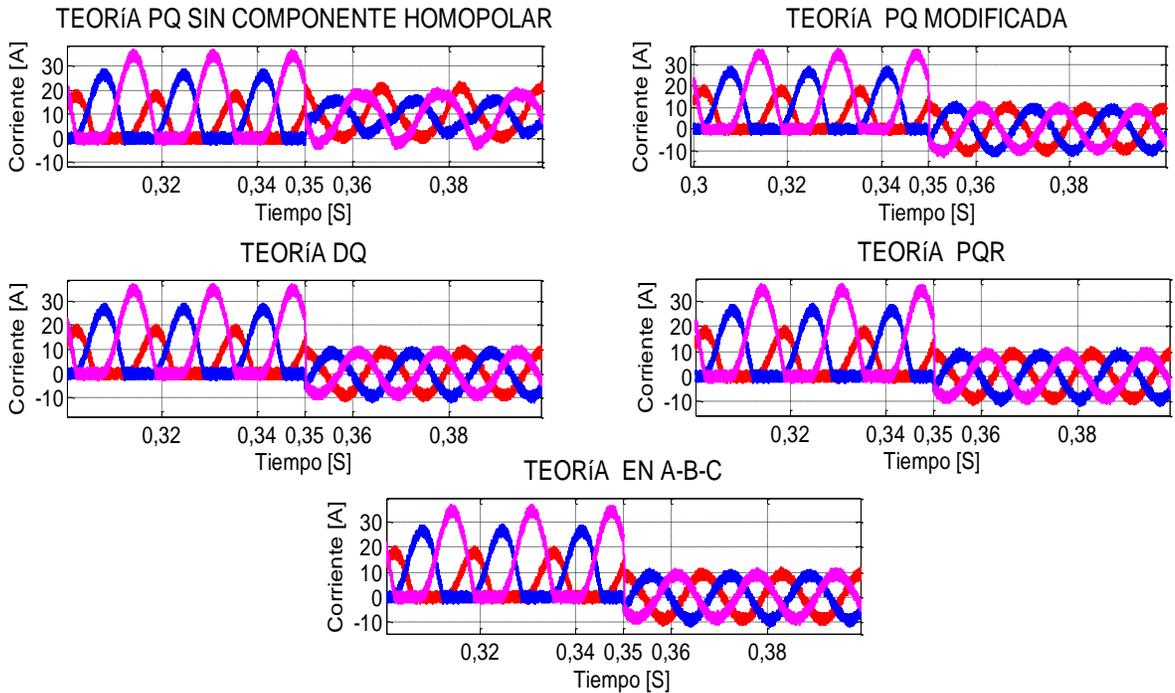


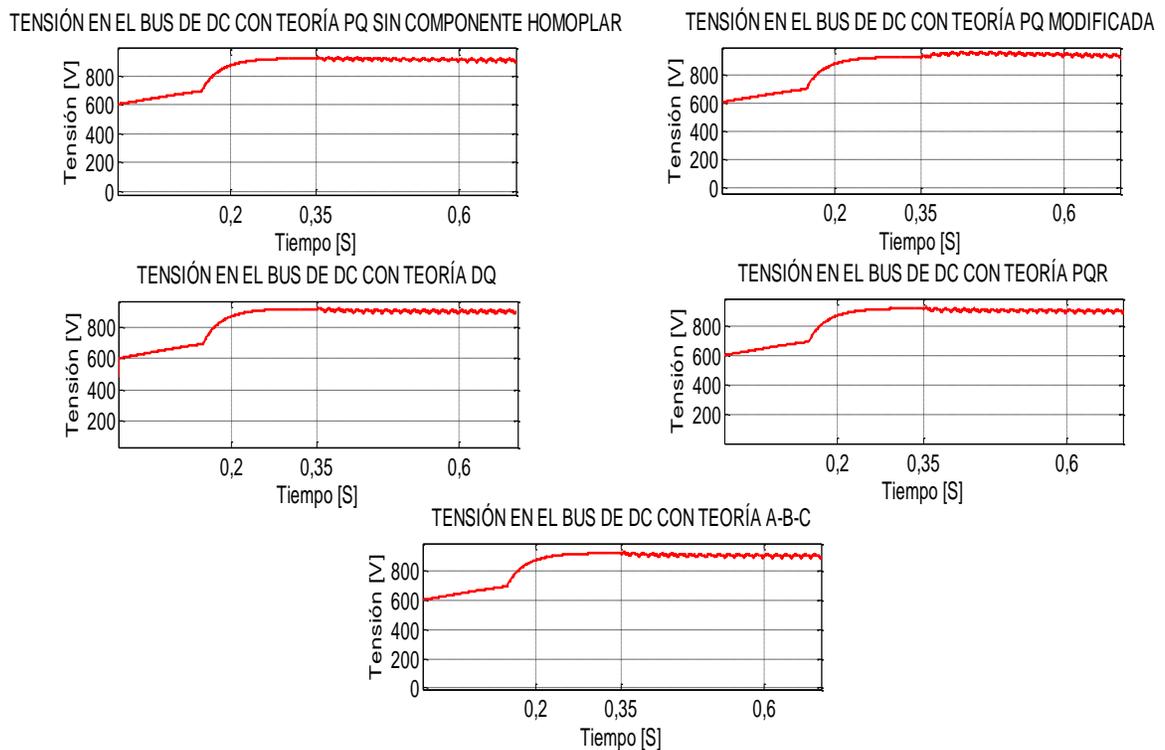
Figura 15. Corriente de líneas antes y después de la compensación



Las corrientes de la línea para las tres fases del sistema antes y después de la compensación se muestran en la figura 15. El rizado que se aprecia en las

corrientes se debe al algoritmo de control del convertidor, que hace que las conmutaciones de los transistores de potencia produzcan un error en las corrientes sintetizadas con respecto a las señales de referencia, determinado por la modulación delta con un período de conmutación de $T = 50 \mu s$. Además se puede observar que para el tiempo mayor a $t = 0,35 [s]$ la teoría p-q sin componente homopolar no realiza el balance a decuado de las tres señales de corriente, sin embargo, para las otras teorías se observa el balance de las señales de corrientes del sistema.

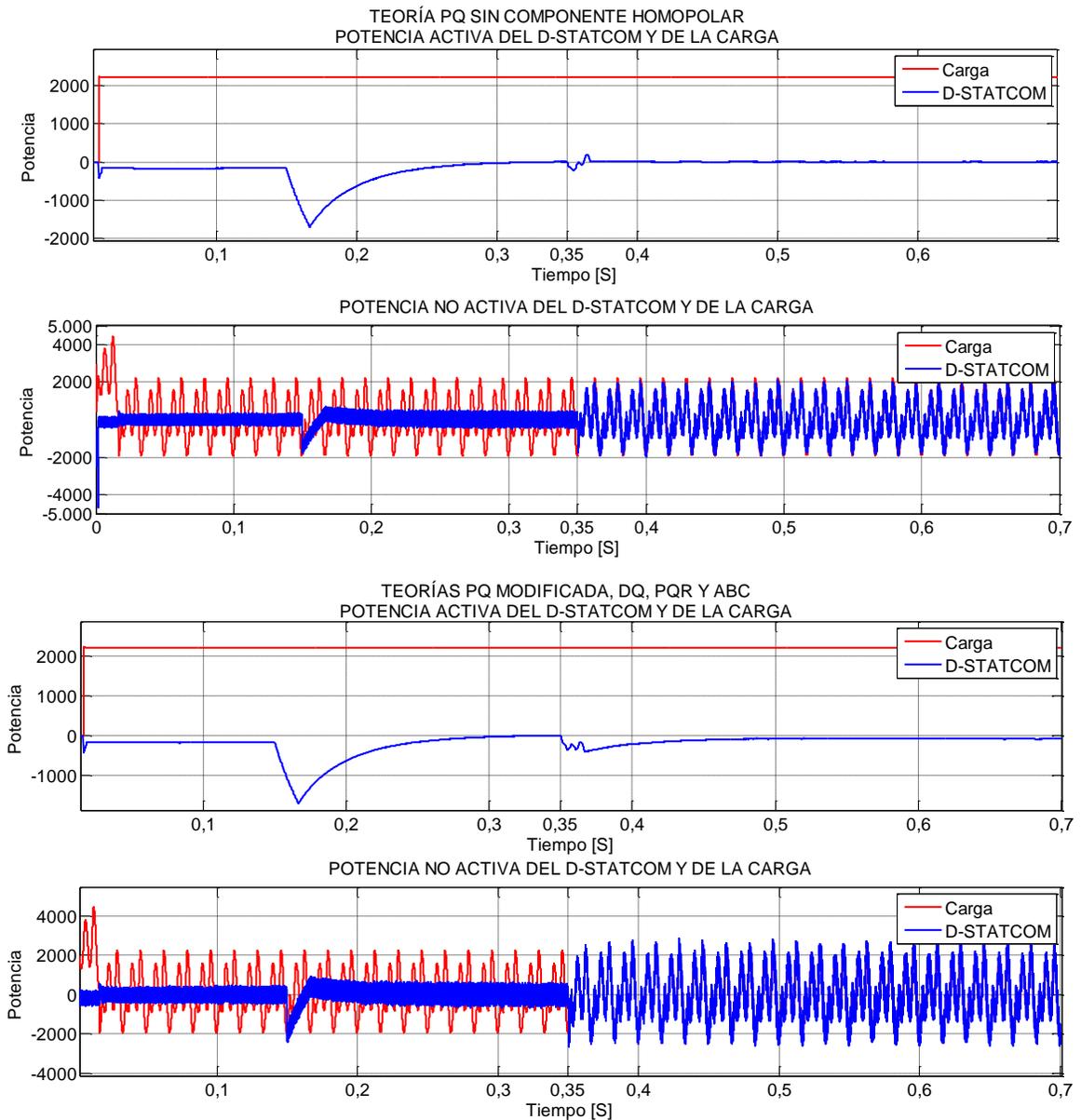
Figura 16. Tensión en el bus de DC del D-STATCOM en la compensación



En la figura 16, se muestra la dinámica de la tensión en el condensador. Inicialmente se carga hasta hasta un valor de (700 [V] aproximadamente), posteriormente a los $t = 0,15 [s]$ se conecta el control del nivel de DC, para hacer que la tensión llegue hasta 900 [V], establecidos como referencia. A los $t = 0,35 [s]$ la tensión del bus de DC ya se ha estabilizado y el D-STATCOM se

conecta a la red. Apartir de este momento, la compensación se realiza y hace que se presente fluctuaciones en la tensión del condensador alrededor del valor de referencia, causadas por las pérdidas de potencia inherentes a las conmutaciones en el inversor.

Figura 17. Potencia consumida por la carga y entregada por el D-STATCOM durante la compensación



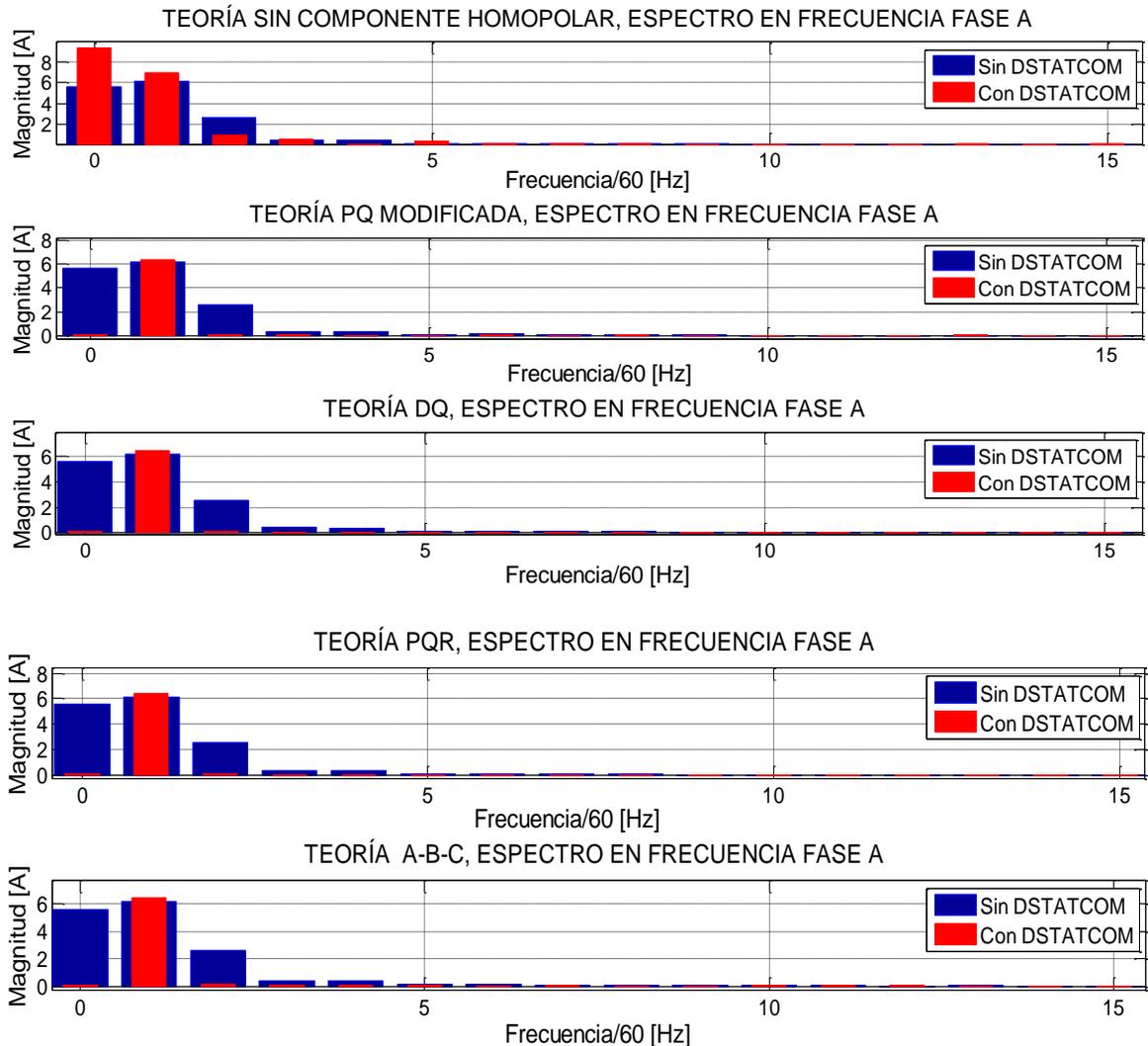
En la figura 17, se muestra la potencia activa y no activa de la carga y también la del D-STATCOM. Los valores promedio indican el consumo de potencia activa de la carga y las pérdidas de potencia en el inversor; mientras que la parte oscilatoria de la potencia, se debe a la energía involucrada en los armónicos y al desbalance y tiene un promedio nulo, lo cual hace posible que pueda ser entregada por el D-STATCOM hacia la red. Se puede observar que la potencia activa entregada por el D-STATCOM es nula. Además, se observa que la teoría p-q sin componente homopolar aporta solo parcialmente la demanda de potencia no activa que debe entregar el D-STATCOM, debido a que no lleva la componente de secuencia cero o componente de DC.

En la figura 18, se muestra el espectro de frecuencia para las corrientes de la red medidas en el PCC antes y después de la compensación. Esta comparación, permite ver como la inyección de las corrientes de compensación disminuye el contenido de armónicos y el desbalance en las corrientes de la red con el uso de las diferentes teorías.

Según el espectro de frecuencia, se observa que la teoría p-q sin componente homopolar no puede compensar todos los armónicos y desbalances de las corrientes de la red. El uso de esta teoría permite ver la reducción de armónicos de secuencia positiva y negativa; sin embargo la componente de DC y los demás armónicos de secuencia cero continúan circulando por la red.

Las corrientes de compensación generada mediante las teorías p-q modificada, d-q, p-q-r y a-b-c, incluyen la distorsión causada por las corrientes de secuencia homopolar que consume la carga; por lo tanto, además de mitigar los armónicos de secuencia positiva y negativa, puede compensar los niveles de DC, los armónicos de secuencia homopolar y los desbalances.

Figura 18. Espectro en frecuencia antes y después de la compensación del D-STATCOM



La distorsión armónica total de la forma de onda de las señales de corriente (THD-*Total Harmonic Distortion*), se calcula por medio de la expresión (1.1) [13]. En la tabla 1 se muestra el THD calculado para las corrientes de la red, antes y después de la compensación para cada una de las teorías usadas. Se observa que la calidad de la forma de onda mejora como resultado de la compensación, y que las teorías que incluyen la componente homopolar para el cálculo de las corrientes de compensación producen los mejores resultados.

Tabla 1. Distorsión armónica total antes y después de la compensación fase A

THD usando las Teorías	Antes THD %	Después THD%	Reducción THD%
Teoría p-q sin componente homopolar	42,97	16,263	62,15
Teoría p-q modificada	42,97	3,27	92,39
Teoría d-q	42,97	2,826	93,42
Teoría p-q-r	42,97	2,826	93,42
Teoría a-b-c	42,97	2,826	93,42

Igualmente, se calculó el factor de potencia de la fuente de alimentación del sistema, antes y después de la compensación con cada una de las teorías. Inicialmente el factor de potencia antes de la compensación es de $fp = 0,73$ y después de la compensación usando la teoría sin componente homopolar fue el $fp = 0,525$ y con las demás teorías fue el $fp = 0,985$. Entonces el compensador además de corregir la distorsión también entrega potencia reactiva de la carga.

Se calculó para las simulaciones el desbalance en corriente, obteniendo los siguientes resultados mostrados en la tabla 2, donde, se observa que la teoría p-q sin componente homopolar no es la mejor opción para mitigar desbalance en las corrientes, debido a que una parte importante del desbalance de corriente está representado por la componente homopolar. Por otra parte, los resultados que se obtiene al aplicar las teorías p-q modificada, d-q, p-q-r y a-b-c muestran un desempeño satisfactorio y similar en todos los casos.

Tabla 2. Factores de desbalance de corriente antes y después de la compensación del D-STATCOM

Desbalance usando las Teorías	Antes $ I_2 $ [%]	Después $ I_2 $ [%]	Antes $ I_0 $ [%]	Después $ I_0 $ [%]
Teoría p-q sin componente homopolar	70,65	83,6	69,35	85,46
Teoría p-q modificada	70,65	8,25	69,35	6,95
Teoría d-q	70,65	8,15	69,35	6,76
Teoría p-q-r	70,65	8,17	69,35	6,72
Teoría a-b-c	70,65	8,16	69,35	6,74

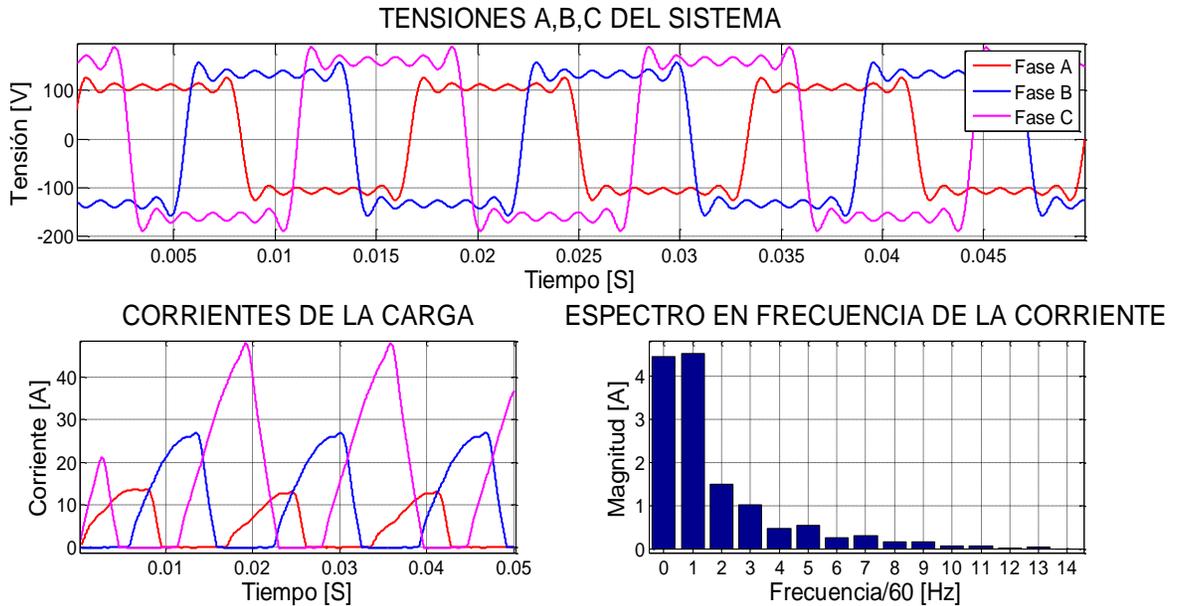
5.1.2. Simulación del D-STATCOM como compensador bajo tensiones desbalanceadas y distorsionadas

Tomando la misma carga usada para el caso bajo tensiones balanceadas, se realiza las simulaciones con las diferentes teorías de compensación. La forma de onda de las corrientes que consume la carga por cada una de las fases y la tensión a la cual es alimentada, se muestra en la figura 19 y los valores de tensión el PCC se muestran en (5.2).

$$\begin{aligned}
 v_a(t) &= \sqrt{2} (0,8(120 \text{ sen}(\omega_1 t) + 40 \text{ sen}(3\omega_1 t) + 24 \text{ sen}(5\omega_1 t) + 17.14 \text{ sen}(7\omega_1 t) \\
 &\quad + 10.9 \text{ en}(11\omega_1 t))) [V] \\
 v_b(t) &= \sqrt{2} (120 \text{ sen}(\omega_1 t - 120^\circ) + 40 \text{ sen}(3\omega_1 t - 120^\circ) + 24 \text{ sen}(5\omega_1 t - 120^\circ) + \\
 &\quad 17.14 \text{ sen}(7\omega_1 t - 120^\circ) + 10.9 \text{ en}(11\omega_1 t - 120^\circ)) [V] \quad (5.2) \\
 v_c(t) &= \sqrt{2} (1,2(120 \text{ sen}(\omega_1 t + 120^\circ) + 40 \text{ sen}(3\omega_1 t + 120^\circ) + 24 \text{ sen}(5\omega_1 t + 120^\circ) \\
 &\quad + 17.14 \text{ sen}(7\omega_1 t + 120^\circ) + 10.9 \text{ en}(11\omega_1 t + 120^\circ))) [V]
 \end{aligned}$$

Donde, $\omega_1 = 2\pi f$ [rad/s] y $f = 60$ Hz.

Figura 19. Tensiones, corriente por fase en el PCC de una carga no lineal desbalanceada y espectro en frecuencia de la corriente



Los algoritmos de las teorías p-q sin componente homopolar, p-q modificada, d-q, p-q-r y a-b-c para calcular la corriente de compensación requiere del uso de tensiones de secuencia positiva a la fundamental, por lo tanto, se implementa el algoritmo de Kalman utilizado para estimar la componente de secuencia positiva de las tensiones de la red de distribución.

En la figura 20 se muestran las tensiones de entrada y salida del filtro Kalman que inicia a partir de los $t = 0,495 [s]$ para estimar la secuencia positiva de las tensiones de la red, con un tiempo de respuesta del filtro de $t = 30 [ms]$ llevando el error entre la señal ideal de tensión y la tensión de salida del filtro a un 5% de la tensión nominal, ver figura 21.

Figura 20. Tensiones de entrada y salida del filtro Kalman

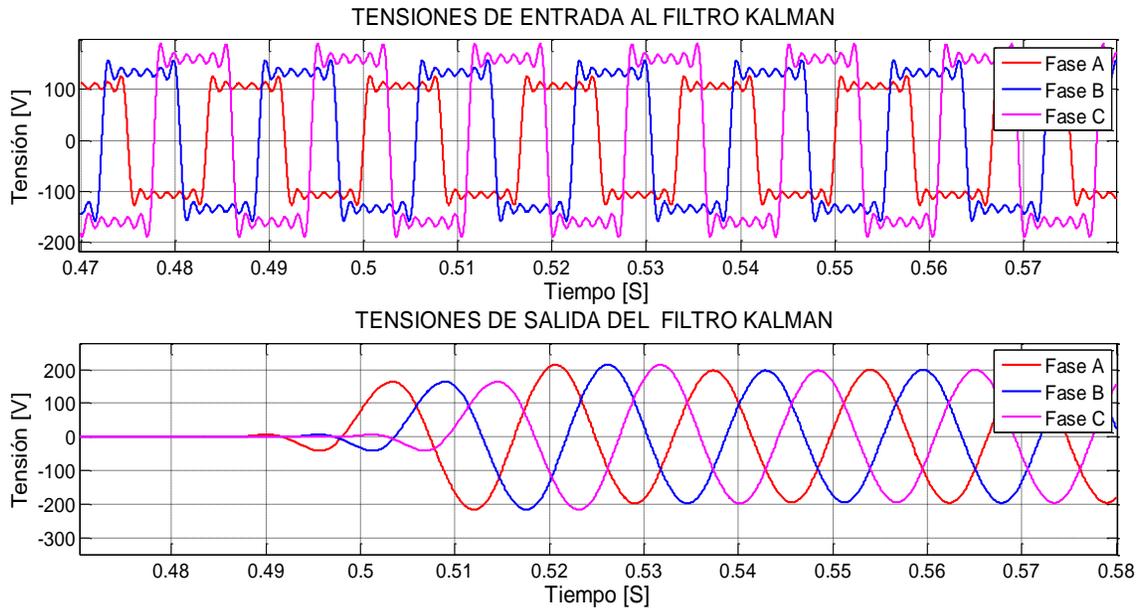


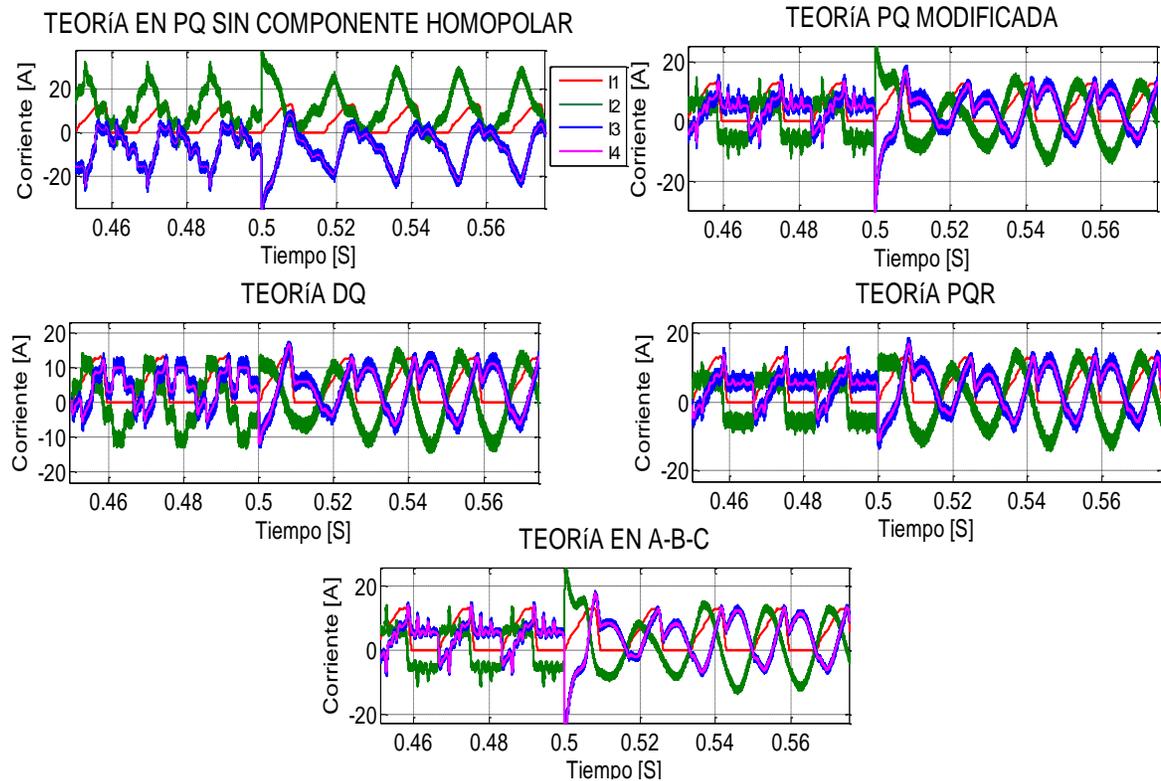
Figura 21. Error de tensión a la salida del filtro de Kalman fase B



En la figura 22 se muestra el conjunto de corrientes relacionadas con la fase A del sistema, antes y después de la conexión del compensador estático, en donde se puede observar la forma de onda de las corrientes inyectadas por el D-STATCOM

y el resultado de la compensación de corriente realizada mediante cada una de las teorías usadas.

Figura 22. Corriente de compensación de la carga no lineal de la fase A



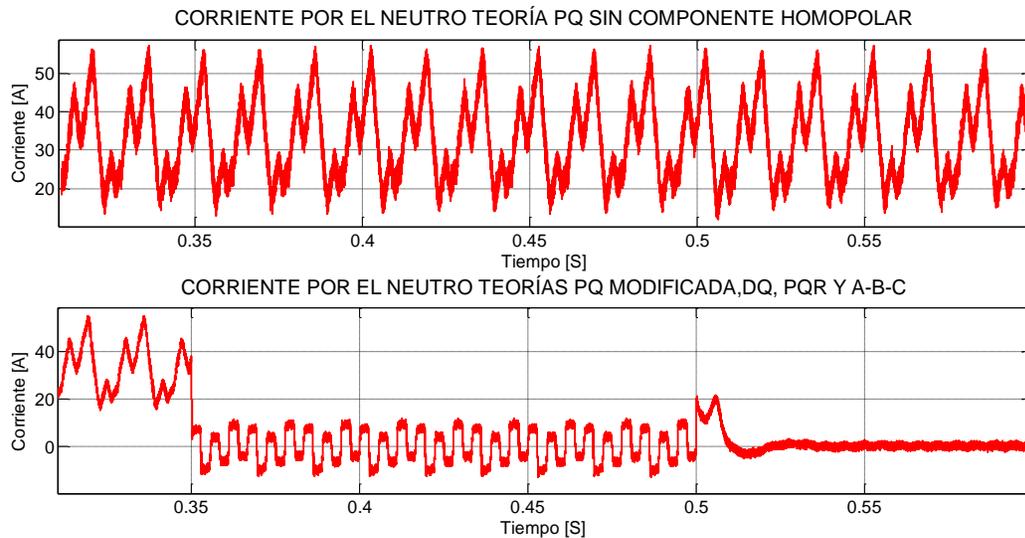
La compensación inicia en el tiempo $t = 0,35$ [s] hasta $t = 0,5$ [s] sin el uso del filtro Kalman, después de los $t = 0,5$ [s] inicia la compensación implementado el uso del filtro Kalman; se puede observar que usando el filtro Kalman mejora la forma de onda de la corriente de la red I_2 . Sin embargo, los resultados de la compensación dependen del algoritmo usado en el cálculo de las señales de referencia.

Al igual que en el caso anterior la teoría p-q sin componente homopolar muestra deficiencias en el cálculo de la corriente de compensación cuando se presentan

cargas que consumen corrientes homopolares, pues las corrientes de secuencia cero continúan en el sistema como se observa en la figura 23.

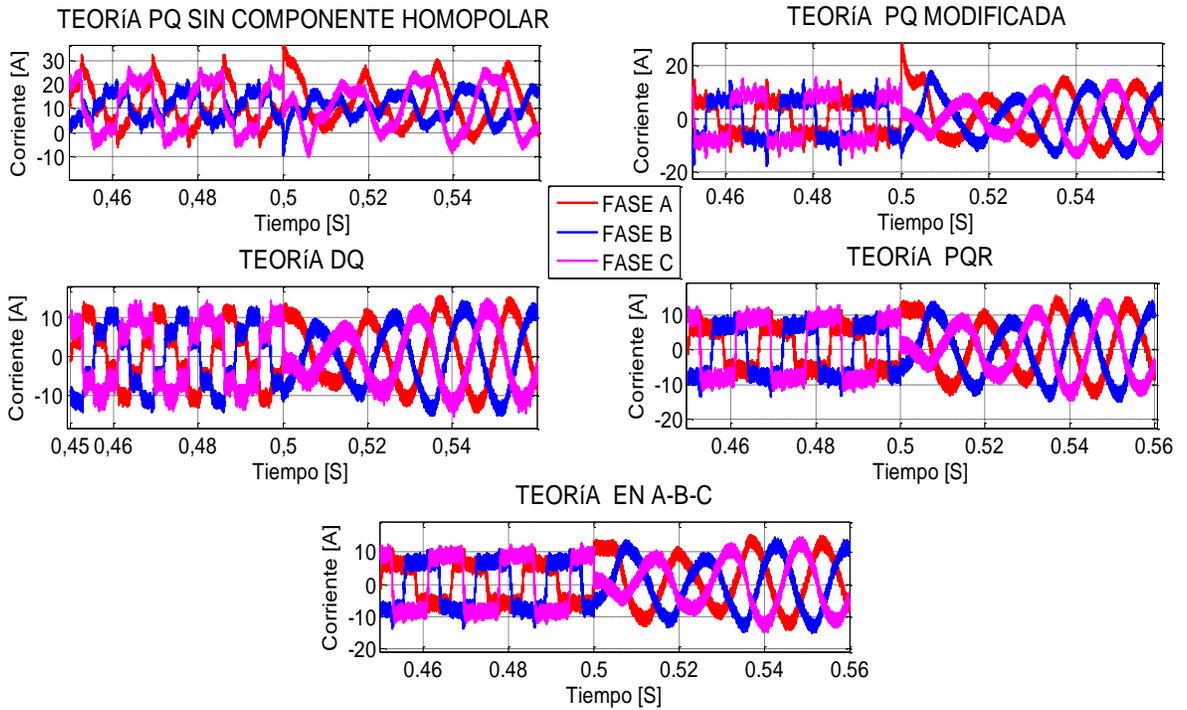
Para los casos en los que se usa la teoría p-q modificada, teoría d-q, teoría p-q-r y teoría en a-b-c, la corriente de retorno por el neutro del sistema para tiempos entre $t = 0,35 [s]$ hasta $t = 0,5 [s]$ se observa en la figura 23 que presenta contenido de componente homopolar pero para tiempos mayor de $t = 0,5 [s]$ la corriente por el neutro es mitigada.

Figura 23. Corriente por el neutro durante la compensación de la carga no lineal



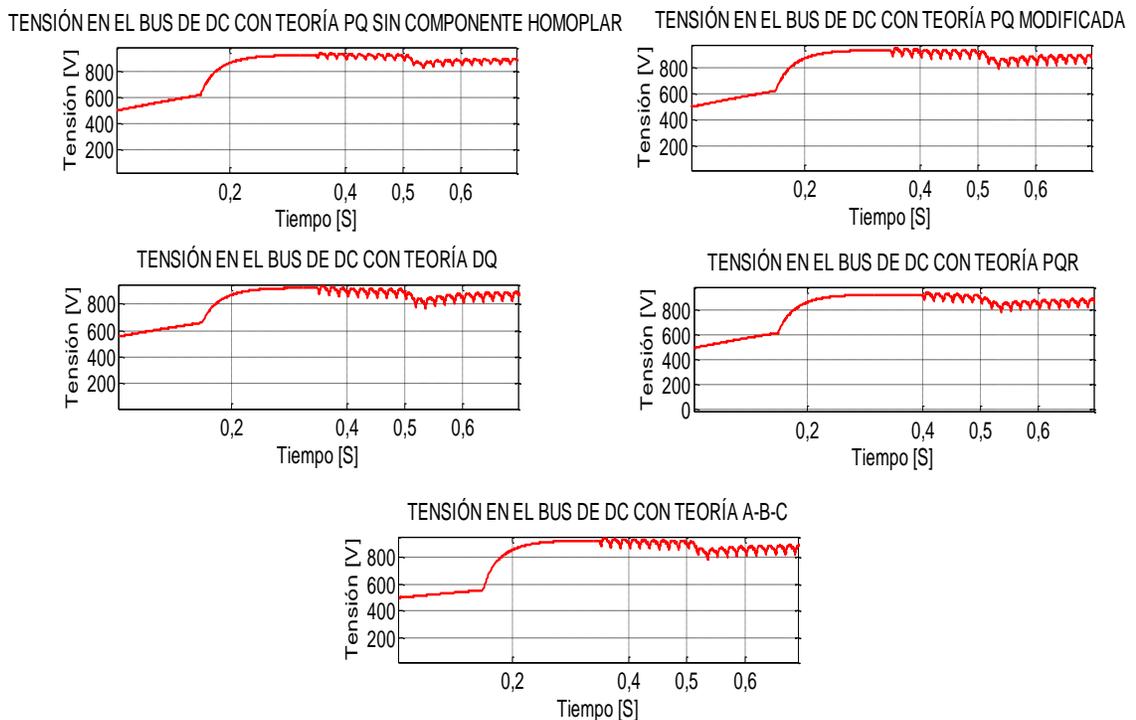
Las corrientes de la línea para las tres fases del sistema antes y después de la compensación se muestran en la figura 24. Se puede observar que para la teoría p-q sin componente homopolar las corrientes del sistema después de la compensación siguen desbalanceadas, mientras que con las otras teorías si se tiene el balance de las corrientes. El rizado de las corrientes se debe a las conmutaciones de los transistores de potencia que producen un error en las corrientes sintetizadas con respecto a las señales de referencia, determinado por la modulación delta con un período de conmutación de $T = 50 [\mu s]$.

Figura 24. Corrientes de líneas antes y después de la compensación



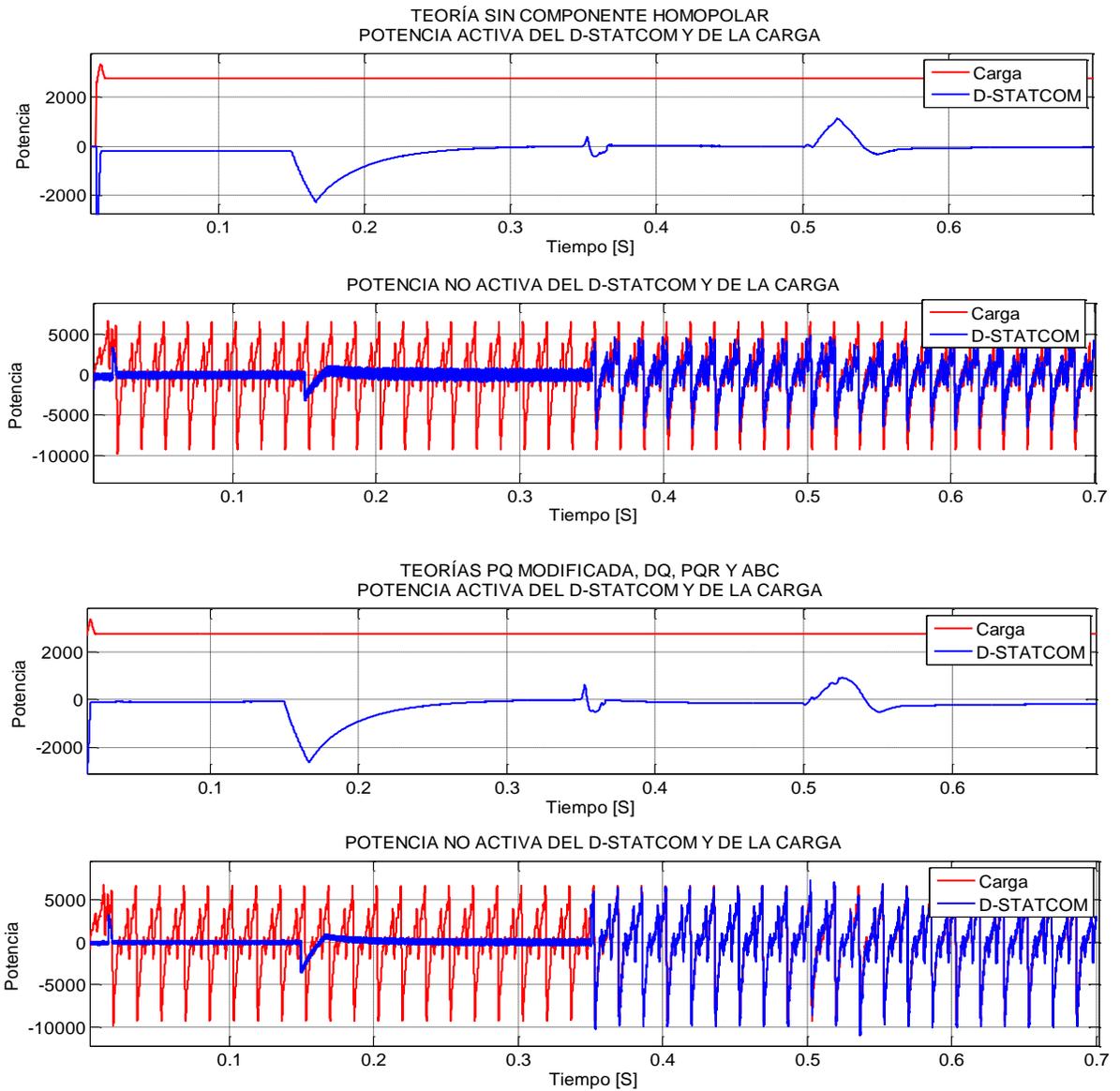
En la figura 25, se muestra la dinámica de la tensión en el condensador, inicialmente se carga hasta hasta un valor de (700 [V] aproximadamente), posteriormente a $t = 0,15$ [s] se conecta el control del nivel de DC, para hacer que la tensión llegue hasta 900 [V], establecidos como referencia. Para tiempo entre $t = 0,35$ [s] hasta $t = 0,5$ [s] se observa una caída de tensión y oscilaciones en la tensión del bus de DC cuando inicia la compensación sin el uso del filtro Kalman, pero para tiempos mayores a $t = 0,5$ [s] se observa una caída de la tensión de más de 100 [V] cuando inicia la utilización del filtro Kalman debido al transitorio inicial del filtro y la potencia que debe suministrar el compensador por el desbalance y la distorsión de la tensiones; y luego la tensión se estabiliza con oscilaciones al valor de referencia.

Figura 25. Tensiones en el bus de DC del D-STATCOM en la compensación



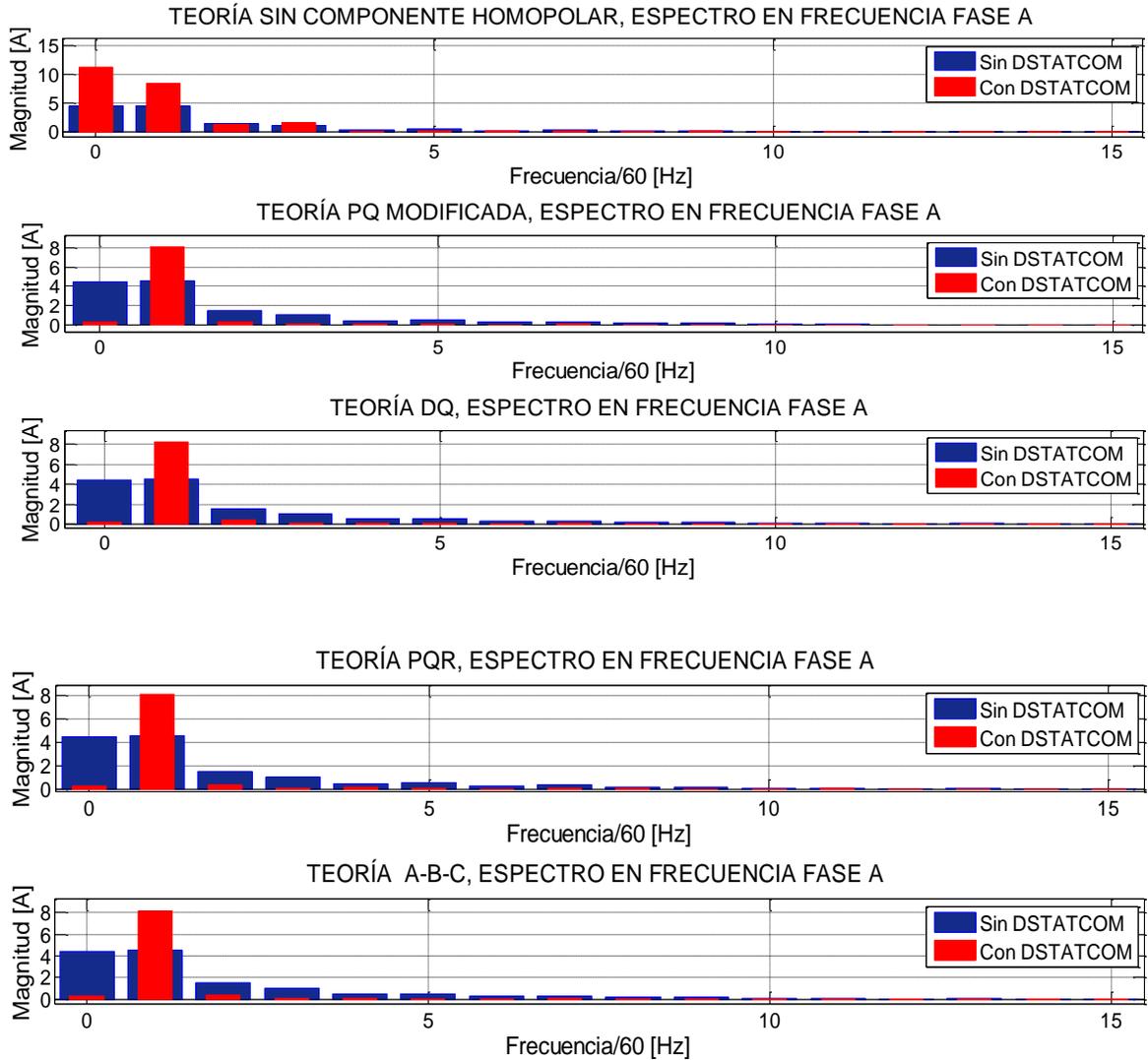
En la figura 26, al igual que en el caso anterior muestra la potencia activa y no activa de la carga y del D-STATCOM. Los valores promedio indican el consumo de potencia activa de la carga y las pérdidas de potencia en el inversor; mientras que la parte oscilatoria de la potencia, se debe a la energía involucrada en los armónicos y a los desbalances y tiene un promedio nulo, lo cual hace posible que pueda ser entregada a la red por el D-STATCOM. Se observa que el D-STATCOM después de la compensación su intercambio de potencia activa es nulo. También, se observa que para el tiempo $t = 0,5$ [s] se presenta un transitorio en la potencia por el uso del filtro Kalman cuando inicia la compensación. Por otro lado, se observa que la teoría p-q sin componente homopolar aporta solo parcialmente la demanda de potencia no activa que debe entregar el D-STATCOM debido a que no lleva la componente de secuencia cero o componente de DC y a los desbalances.

Figura 26. Potencia consumida por la carga y entregada por el D-STATCOM durante la compensación



En la figura 27, se muestra el espectro de frecuencia para las corrientes de la red medidas en el PCC antes y después de la compensación bajo tensiones desbalanceadas y distorsionadas. Esta comparación, permite ver como la inyección de las corrientes de compensación disminuye el contenido de armónicos en las corrientes de la red con el uso de las diferentes teorías.

Figura 27. Espectro en frecuencia antes y después de la compensación del D-STATCOM



De igual manera en el espectro de frecuencia, se observa que la teoría p-q sin componente homopolar no puede compensar todos los armónicos de las corrientes de la red. El uso de esta teoría permite ver la reducción de armónicos de secuencia positiva y negativa; sin embargo la componente de DC y los demás armónicos de secuencia homopolar continúan circulando por la red.

Las corrientes de compensación generada mediante las teorías p-q modificada, d-q, p-q-r y a-b-c, incluyen la distorsión causada por las corrientes de secuencia homopolar que consume la carga; por lo tanto, además de mitigar los armónicos de secuencia positiva y negativa, puede compensar los niveles de DC, los armónicos de secuencia homopolar y los desbalances, mostrando un desempeño aproximadamente igual que en el caso bajo tensiones balanceadas.

La distorsión armónica total de la forma de onda de las señales de corriente al igual que en el caso anterior se muestra en la tabla 3, donde el THD calculado para las corrientes de la red, antes y después de la compensación bajo tensiones desbalanceadas y distorsionadas para cada una de las teorías usadas. Se analiza que la calidad de la forma de onda mejora como resultado de la compensación, y que las teorías que incluyen la componente homopolar para el cálculo de las corrientes de compensación producen los mejores resultados.

Tabla 3. Distorsión armónica total antes y después de la compensación fase A

THD usando las Teorías	Antes THD %	Después THD%	Reducción THD%
Teoria p-q sin componente homopolar	44,72	25,564	42,835
Teoria p-q modificada	44,72	5,072	88,658
Teoria d-q	44,72	5,459	87,793
Teoría p-q-r	44,72	5,313	88,119
Teoria a-b-c	44,72	4,928	88,98

Se calculó el factor de potencia de la fuente de alimentación del sistema, antes y después de la compensación con cada una de las teorías bajo tensiones desbalanceada y distorsionadas. Inicialmente el factor de potencia es de $fp = 0,6425$ y después de la compensación usando la teoría sin componente homopolar fue de $fp = 0,864$ y con las demás teorías fue de $fp = 0,994$, por lo

tanto el compensador además de corregir la distorsión también entrega potencia reactiva de la carga.

Se halló el desbalance en corriente con cada una de las teorías, obteniendo los siguientes resultados mostrados en la tabla 4, donde se observa que la teoría p-q sin componente homopolar no es la mejor opción para mitigar desbalance de las corrientes, debido a que una parte importante del desbalance de corriente está representado por la componente homopolar. Por otra parte, los resultados que se obtienen al aplicar las teorías p-q modificada, d-q, p-q-r y a-b-c muestran un desempeño satisfactorio y similar en las otras teorías.

Tabla 4. Factores de desbalance de la corriente antes y después de la compensación del D-STATCOM

Desbalances usando las Teorías	Antes $ I_2 $ [%]	Después $ I_2 $ [%]	Antes $ I_0 $ [%]	Después $ I_0 $ [%]
Teoría p-q sin componente homopolar	77,4	83,2	74,68	86,2
Teoría p-q modificada	77,4	7,25	74,68	5,4
Teoría d-q	77,4	7,5	74,68	7,4
Teoría p-q-r	77,4	7,02	74,68	5,35
Teoría a-b-c	77,4	4,84	74,68	2,83

6. CONCLUSIONES

La integración de conocimiento en el área de ingeniería eléctrica junto con algunos algoritmos para mejorar la calidad de la energía eléctrica y la obtención de modelos del D-STATCOM, han permitido analizar su desempeño como compensador de perturbaciones en las corrientes de la red bajo tensiones desbalanceadas y/o distorsionadas. Los resultados obtenidos permiten presentar las siguientes conclusiones.

La versatilidad para contrarrestar diversos problemas relacionados con la calidad de la energía eléctrica en los sistemas de distribución, muestra al D-STATCOM como una solución viable cuando se presentan perturbaciones tanto en la corriente como en la tensión del sistema. Además su modo de conexión, hace que presente excelente desempeño en el acondicionamiento de corrientes para sistemas trifásicos de cuatro hilos.

La técnica de control modulación delta que se seleccionó para la generación de los pulsos de disparos del puente inversor, cuando sintetiza las corrientes de salida del D-STATCOM presenta un rizado debido a su modo de operación que tiene un periodo fijo de conmutación de $T = 50 [\mu s]$. Este control en general presenta un buen desempeño.

En la literatura se encuentran valores típicos de la inductancia de acople y del valor del condensador del bus de DC, sin embargo, el ajuste de estos valores está determinado por las características de las señales que se deben sintetizar, como la magnitud de las corrientes, la distorsión armónica que se debe inyectar a la red. Por lo tanto se debe realizar pruebas con distintas combinaciones de estos parámetros para buscar el mejor desempeño posible.

Con el uso del filtro de Kalman para obtener las tensiones de secuencia positiva de las señales de tensión del sistema con desbalance y/o distorsión, los resultados presentados fueron satisfactorios mejorando la forma de onda de las tensiones con un tiempo de respuesta de $t = 30 [ms]$ para llevar el error al 5% de la tensión nominal. Estos resultados fueron posibles porque al filtro de Kalman se le incluyeron en el modelo el cálculo de los armónicos, por lo tanto la forma de onda de la señal de secuencia positiva de la tensión fue una sinusoidal, de acuerdo a lo anterior si no se incluyen en el filtro de Kalman los modelos de los armónicos, la señal de salida del filtro es una sinusoidal con distorsión.

Con el control PI sintonizado apropiadamente se controla la tensión del condensador para que se cargue hasta el valor de tensión de referencia antes y después de la compensación. Además, calcula la potencia que debe ser tomada de la red para evitar que el condensador se descargue por las pérdidas de potencia relacionadas al funcionamiento del inversor en estado permanente. Esto hace que el condensador presente oscilaciones alrededor del valor de referencia.

La teoría p-q modificada, d-q, p-q-r y a-b-c, fueron utilizadas para controlar el D-STATCOM y evaluar su funcionamiento como compensador de las corrientes de la red de distribución. Estos algoritmos utilizados bajo tensiones desbalanceadas y/o distorsionadas presentan un buen desempeño en el cálculo de las corrientes cuando la carga consume corrientes armónicas, esta desbalanceada y tiene bajo factor de potencia. Para el caso de la teoría p-q sin componente homopolar su resultado no fue satisfactorio porque la corriente de la red contiene nivel de DC, armónicos de tercer orden y desbalances, por lo tanto, las otras teorías usadas en el cálculo de las corrientes de compensación incluyen el efecto de la componente homopolar.

Se encontró que el uso del D-STATCOM para compensar corrientes por cargas no lineales, mejora notablemente el valor THD medido en la red. Las simulaciones del

D-STATCOM usando la teoría p-q modificada, d-q, p-q-r y a-b-c, muestran valores de THD menores al 5,459%, con la teoría p-q sin componente homopolar se obtuvo un THD menor al 25,564%. Estos valores están dentro de los límites establecidos por la norma IEEE 519-2009 (tabla 2, pag 6), que especifica un THD máximo de corriente de 20%.

Los desbalances de las corrientes de la red fueron compensados por el D-STATCOM usando la teoría p-q modificada, d-q, p-q-r y a-b-c. Estos desbalances debido a la secuencia negativa son menores al 8,25% y los desbalance debido a la secuencia cero son menores a 7,4%, de acuerdo a lo anterior, estos valores estan dentro de los límites establecidos por la norma IEEE 1159-2009 (Tabla 2, pag 6), que especifica un desbalance en corriente máximo de 30%. Sin embargo, con la teoría p-q sin componente homopolar se obtuvo un desbalance debido a la secuencia negativa menor al 83,6% y el desbalance debido a la secuencia cero menor a 86,21%, se observó que estos últimos valores son mayores al desbalance antes de la compensación y además, no cumple con los valores establecidos por la norma.

Se mejoró el factor de potencia en la red significativamente con el uso de las teoría p-q modificada, d-q, p-q-r y a-b-c muy cercanos al factor 1, de esta manera, la energía aportada por la fuente del sistema, constituye un conjunto de corrientes en fase con la tensión en el PCC, mientras que la energía asociada con la potencia reactiva es suministrada por el D-STATCOM, sin embargo, la teoría p-q sin componente homopolar tiene una mejora del factor de potencia pero no es significativa.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ALZATE, Alfonso; OROZCO, Alvaro y GALAN, Carlos. Compensación de Armonicos Utilizando la Teoría p-q-r. Scientia et Technica Año IX, Octubre, 2003. p. 13-17, no 22. UTP. ISSN 0122-1701.
- [2] ARDILA RIOS, Christian Alexander y SALAMANCA RAMIREZ, Alder Raúl. Restaurador Dinámico de tensión (DVR): análisis y estrategias de control. Trabajo de grado En Ingeniería Eléctrica. Bucaramaga.: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-mecánicas, 2010. 133 p.
- [3] COLCIENCIAS. Un proyecto de la unidad de planeación minero energética de Colombia (UPME) y el instituto colombiano para el desarrollo de la ciencia y la tecnología [online]. Universidad del Atlántico, Universidad Autónoma de Occidente, 2006- [consultado el 10 de junio de 2014], 58 p. Disponible en internet: <<http://www.si3ea.gov.co/Portas/0/Gie/Docs/herramientas.pdf>>
- [4] CORDOBA LEÓN, José Andrés; ROJAS BALCÁZAR, Marco Stalin y SANCHEZ BARRIOS, Waldo. Analisis, diseño e implementación de un compensador estático de potencia reactiva (d-statcom) para corrección de factor de potencia, basado en un convertidor trifásico con modulación por ancho de pulso con el método de vector espacial (SVPWM) controlado por DSP. Tesis de Pregrado. Guayaquil.: Escuela Superior Politécnica del Litoral. Facultad en ingeniería eléctrica y computación, 2008. 151 p.
- [5] GHOSH, Arindam y LEDWICH, Gerard. Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices. 1 ed. London. Kluwer Academic Publishers, 2002. p. 460

- [6] HINGORANI G, Narain. Introducing Custom Power. Spectrum IEEE, Agosto, 2002, 32 vol. p. 41-48
- [7] H.S., Kim and H. Akagi. The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames. In Proc. International Conference of the 1999 IEEE Power Electronics and Drive Systems, Julio, 1999, 1 vol, p. 422-427.
- [8] IEEE Recommended Practices and Monitoring Electric Power Quality, IEEE Std 519-2009. p. 81
- [9] NORMA TÉCNICA COLOMBIANA, Calidad de la potencia eléctrica (CPE). Definiciones y términos fundamentales. NTC 5000. Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC), Bogota D.C., 2002. p. 69
- [10] PETIT SUÁREZ, Johann Farith. Control de filtros activos de potencia para la mitigación de armónicos y mejora del factor de potencia en sistemas desequilibrados. Tesis Doctoral. Leganés.: Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de ingeniería eléctrica, 2007. 185 p.
- [11] REYES, S.; HERRERA, Patricio Salmerón, HYOSUNG, Kim. Instantaneous Reactive Power Theory Applied to Active Power Filter Compensation: Different Approaches, Assessment, and Experimental Result. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, enero, 2008, 55 vol. p. 184-186
- [12] RODRIGUEZ CORTÉS, Pedro. Aportaciones a los acondicionadores activos de corriente en derivación para redes trifásicas de cuatro hilos. Tesis doctoral. Cataluña.: Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de ingeniería eléctrica, 2005. 205 p.

- [13] ROMERO, José Alides y GOMEZ, Miguel Angel. Análisis, modelado y control de un compensador estático para sistemas de distribución. Trabajo de grado En Ingeniería Eléctrica. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-mecánicas, 2010. 162 p.
- [14] SANCHEZ HUERTA, Víctor. Perturbaciones en la red eléctrica [online]. Departamento de Ingeniería, Universidad de Quintana Roo. 2008. 1 vol. [consultado el día 20 de julio de 2014], p. 33–38. Disponible en internet: <http://dci.uqroo.mx/RevistaCaos/2006_Vol_1/Num_1/VS_vol_I_33-38_2006.pdf>

ANEXO

Anexo A. Esquema de carga no lineal

CARGA NO LINEAL

