



| POSGRADOS |

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

RPC-SO-30-No.508-2019

OPCIÓN DE
TITULACIÓN:

PROYECTO DE DESARROLLO

TEMA:

COMPENSACION REACTIVA EN UN SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA DE 9 BARRAS IEEE CON CARGAS NO LINEALES MEDIANTE UN DSTATCOM UTILIZANDO EL METODO PQ Y MODULACION POR HISTERISIS PARA SU CONTROL

AUTOR:

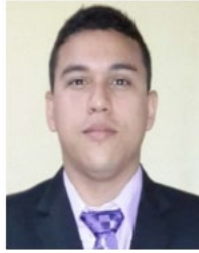
JHON HENRY ARREAGA CARPIO

DIRECTOR:

IVÁN DAVID ENDARA VÉLEZ

GUAYAQUIL - ECUADOR
2021

Autor:



Jhon Henry Arreaga Carpio

Ingeniero en Electricidad, Especialización
Potencia

Candidato a Magister en Electricidad,
Mención Sistemas Eléctricos de Potencia.
Universidad Politécnica Salesiana, Guaya-
quil

jarreagac3@est.ups.edu.ec

jhohear@gmail.com

Tutor:



Iván David Endara Vélez

Ingeniero en Electricidad especialización
Potencia

Master of Engineering Science (Manage-
ment) on the field of Electrical Engi-
neering

iendara@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2021 Universidad Politécnica Salesiana.

GUAYAQUIL – ECUADOR – SUDAMÉRICA

JHON HENRY ARREAGA CARPIO

**COMPENSACION REACTIVA EN UN SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA
DE 9 BARRAS IEEE CON CARGAS NO LINEALES MEDIANTE UN DSTAT-
COM UTILIZANDO EL METODO PQ Y MODULACION POR HISTERISIS
PARA CONTROL**

Agradecimientos

Quiero agradecer a mis padres que han sido el pilar principal en toda la vida profesional y académica que he tenido, sus consejos me han convertido en la persona que siempre había soñado ser.

A Henry Arreaga quien por situaciones de la vida tuvo que partir primero que todos nosotros, pero que confió en todas mis capacidades y actitudes en el poco tiempo que me conoció, ojalá algún día tengamos la oportunidad de volver a vernos.

A mi jefe Miguel Marchán que me dio la oportunidad de trabajar sin importar mi falta de experiencia laboral, quien me brindó un sueldo digno con el cual pude sustentar mis estudios superiores.

A todo el personal de VENPROLECTRI S.A. por su maravillosa acogida y amistad.

Índice General

Índice de Figuras	5
Índice de Tablas.....	7
Resumen.....	8
Abstract	9
Introducción	10
1.1. Descripción general del problema	11
1.2. Objetivos	11
1.2.1. Objetivo General.....	11
1.2.2. Objetivos Específicos	11
Marco Teórico Referencial	12
2.1. Introducción	12
2.2. Armónicos	12
2.3. Las señales armónicas en un sistema eléctrico de distribución	13
2.4. DSTATCOM.....	13
2.5. Control por pulsos PWM	14
2.6. Control por histéresis.....	14
2.7. Teoría de las potencias instantáneas PQ.....	15
Metodología	17
3.1. Introducción	17
3.2. Caso I: Sistema de 9 barras IEEE con cargas lineales	17
3.2.1. Datos de cargas del sistema de la IEEE de 9 barras de 13.8kV	18
.....	
3.2.2. Datos de líneas del sistema de la IEEE de 9 barras de 13.8kV	19
.....	
3.2.3. Datos de generación del sistema de la IEEE de 9 barras de	
13.8kV	20
3.3. Caso II: Sistema de 9 barras IEEE con cargas no lineales	20

INDICE GENERAL

3.4. Caso III: Sistema de 9 barras IEEE con cargas no lineales y DSTACOM en la barra 5 y 6	24
3.5. Especificaciones del DSTATCOM	25
3.6. Diseño del control del DSTATCOM	28
3.7. Bloques para implementación del sistema en Simulink	31
Resultados	33
4.1. Introducción	33
4.2. Señales de voltajes de las barras de cargas 5 y 6 y de la barra slack del sistema con cargas lineales y no lineales	34
4.3. Señales de corrientes de las barras de cargas del sistema con cargas lineales y no lineales.....	35
4.4. Señales de voltajes y corrientes de las barras de cargas del sistema cuando entra en operación el DSTATCOM de la barra 5 en el tiempo de simulación igual a 0,02.	36
4.5. Señales de voltajes y corrientes de las barras de cargas del sistema cuando entra en operación el DSTATCOM de la barra 6 en el tiempo de simulación igual a 0,02.	37
4.6. Señales de voltajes y corrientes de las barras de cargas del sistema cuando entra en operación el DSTATCOM de la barra 6 en el tiempo de simulación igual a 0,02.	38
4.7. Señales de potencia activa y reactiva del generador de la barra slack del sistema con DSTATCOM en la barra 5	39
4.8. Señales de potencia activa y reactiva del generador de la barra slack del sistema con DSTATCOM en la barra 6	39
4.9. Señales de potencia activa y reactiva del generador de la barra slack del sistema con DSTATCOM en las barras 5 y 6.....	40
4.10. Corrientes de compensación del DSTATCOM de la barra 6.....	41
4.11. Análisis de Armónicos	41
Conclusiones.....	43
Bibliografía.....	44

Índice de Figuras

Figura 2. 1: Señal de corriente fundamental y armónicas	12
Figura 2. 2: Sistema eléctrico con carga lineal y DSTATCOM. Fuente de autor de 2021	13
Figura 2. 3: Principio de la modulación senoidal con onda portadora triangular [8].	14
Figura 2. 4: Principio del control por histéresis [9].	14
Figura 3.1: Sistema de 9 Barras de la IEEE en Simulink. Fuente de autor de 2021.....	18
Figura 3. 2: Resistencia e inductancia inductiva de conductores de aluminio ACSR.	20
Figura 3. 3: Sistema de 9 Barras de la IEEE con cargas no lineales en la barra 5 y 6. Fuente de autor de 2021	21
Figura 3. 4: Carga no lineal conectada a la barra 5. Fuente de autor de 2021.....	22
Figura 3. 5: Carga no lineal conectada a la barra 6. Fuente de autor de 2021.....	23
Figura 3. 6: Sistema de 9 Barras de la IEEE con cargas no lineales y DSTATCOM en la barra 5 y 6. Fuente de autor de 2021	24
Figura 3. 17: DSTATCOM implementado en Simulink con sus bloques de control.....	25
Figura 3. 8: Control de DSTATCOM mediante el cálculo de corrientes de referencias [15].	28
Figura 3. 18: Bloques de transformación Clarke y Teoría PQ.	30
Figura 3. 9: Bloque Three-Phase Source de Simulink librería Power System.	31
Figura 3. 10: Bloque Three-Phase Trnsformer de Simulink librería Power System.	31
Figura 3. 11: Bloque Three-Phase Series RLC Branch de Simulink librería Power System.	31
Figura 3. 12: Bloque Three-Phase V-I Measurement de Simulink librería Power System.	31

INDICE DE FIGURAS

Figura 3. 13: Bloque Scope de Simulink librería Sinks.....	32
Figura 4. 1: Voltajes de las barras 1, 5 y 6 con cargas lineales (derecha) y no lineales (izquierda).....	34
Figura 4. 2: Corrientes de las barras 1,5 y 6 con cargas lineales (derecha) y no lineales (izquierda).....	35
Figura 4. 3: Corrientes de las barras 1,5 y 6 con cargas no lineales y con entrada del DSTATCOM.	36
Figura 4. 4: Corrientes de las barras 1,5 y 6 con cargas no lineales y con entrada del DSTATCOM.	37
Figura 4. 5: Corrientes de las barras 1,5 y 6 con cargas no lineales y con entrada del DSTATCOM.	38
Figura 4. 6: Corrientes de las barras 1,5 y 6 con cargas no lineales y con entrada del DSTATCOM.	39
Figura 4. 7: Corrientes de las barras 1,5 y 6 con cargas no lineales y con entrada del DSTATCOM.	39
Figura 4. 7: Corrientes de las barras 1,5 y 6 con cargas no lineales y con entrada del DSTATCOM.	40
Figura 4. 8: Corrientes de compensación del DSTATCOM 1.....	40
Figura 4. 9:Corrientes de compensación del DSTATCOM 2.....	41

Índice de Tablas

Tabla 3. 1:Datos de cargas del sistema de 9 barras IEEE de 13.8kV.....	18
Tabla 3. 2: Calibre de conductor para las líneas del sistema eléctrico [12].	19
Tabla 3. 3: Datos de línea del sistema de 9 barras IEEE 13.8kV [12].....	20
Tabla 3. 4: Datos de generación del sistema de 9 barras IEEE 13.8kV.	20
Tabla 3. 5: Especificaciones del DSTATCOM de la carga no lineal de la barra 5.	28
Tabla 4. 1 THD de todas las barras del sistema sin la operación del DSTATCOM de la barra 5 y con la entrada de este a la red.....	41
Tabla 4. 2 THD de todas las barras del sistema sin la operación del DSTATCOM de la barra 6 y con la entrada de este a la red.....	42
Tabla 4. 3 THD de todas las barras del sistema sin la operación del DSTATCOM de la barra 5 y 6 y con la entrada de estos a la red.....	42

Resumen

El objetivo del presente estudio es realizar una compensación reactiva por medio de un DSTATCOM a un sistema eléctrico de distribución con señales de voltajes y corrientes distorsionadas debido a las cargas no lineales. El control del DSTATCOM se diseñará utilizando la teoría de las potencias instantáneas PQ la misma que permite separar la potencia reactiva que producen las cargas no lineales de las que producen las impedancias de las líneas, transformadores y otros elementos de la red. Para lo siguiente se utilizará el entorno de diagrama de bloques (Simulink) que ofrece Matlab para implementar el sistema de 9 barras de la IEEE y realizar las respectivas modificaciones para adaptar el mismo a los diferentes escenarios de estudios.

Se observará que existe una disminución en la distorsión de onda cada vez que entra al sistema el DSTATCOM debido a que el mismo se encarga de suministrar a la red la potencia reactiva que consumen las cargas no lineales, por lo que las señales de voltajes y corrientes de las barras que estaban deformadas se vuelven completamente senoidales.

Abstract

The objective of this study is to perform a reactive compensation by means of a DSTATCOM to an electrical distribution system with distorted voltage and current signals due to non-linear loads. The control of the DSTATCOM will be designed using the theory of instantaneous powers PQ, which allows the reactive power produced by non-linear loads to be separated from those produced by the impedances of lines, transformers and other elements of the grid. For the following, the block diagram environment (Simulink) offered by Matlab will be used to implement the IEEE 9-bar system and carry out the respective modifications to adapt it to the different study scenarios.

It will be observed that there is a decrease in wave distortion each time the DSTATCOM enters the system because it is in charge of supplying the network with the reactive power consumed by non-linear loads, so that the voltage signals and currents of the bars that were deformed become completely sinusoidal.

Capítulo 1

Introducción

La calidad de la energía es muy importante en un sistema de potencia ya que esto garantiza la confiabilidad, continuidad y optima operación de los elementos de protección que existen en la red [1]. Todos los equipos basados en electrónica de potencia producen señales armónicas y se denominan cargas no lineales, y su principal problema está asociado en el flujo de potencia reactiva que estas generan [2]. La potencia reactiva disminuye el paso de potencia activa y produce inestabilidad en el voltaje de las barras del sistema generando pérdidas económicas y técnicas tanto para el sector eléctrico como para los usuarios finales de la red. [3]. Por tal motivo, para mitigar los efectos de estas señales se utiliza el DSTATCOM, que es un compensador de reactivos totalmente controlado que se conecta a la red y es capaz de entregar la potencia reactiva que necesitan las cargas que producen armónicos [4].

1.1. Descripción general del problema

Las cargas no lineales en la actualidad son muy frecuentes en sistema eléctrico industrial, pero las corrientes que estas producen no son senoidales por lo que generan una distorsión de onda en el voltaje y corriente de la fuente, lo que produce que las cargas que se encuentran antes de la generadora de armónicas se vean afectadas por la calidad de la energía. En este proyecto se acoplará al sistema un filtro reactivo totalmente controlado que se encargará de suministrar la potencia reactiva que requieren las cargas no lineales de tal manera que la red dejará de producir armónicas, y las ondas de voltajes y corrientes del sistema serán las adecuadas para que las demás cargas no se vean afectadas.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

- ❖ Diseñar un control para un DSTATCOM utilizando la teoría de potencias instantáneas PQ y pulsos por histéresis para suministrar la potencia reactiva que producen las armónicas de las cargas no lineales en el sistema eléctrico.

1.2.2. Objetivos Específicos

- ❖ Simular el sistema de 9 barras de la IEEE mediante la herramienta Simulink para el análisis de las curvas de voltajes y corrientes de la red.
- ❖ Realizar un análisis de armónicos en la red sustituyendo las cargas lineales de las barras 5 y 6 del sistema IEEE por unas no lineales.
- ❖ Simular el sistema con el DSTACOM conectado en el punto PCC de la red mediante la herramienta de Simulink evidenciando el comportamiento de las ondas de voltajes y corrientes del sistema de potencia.

Capítulo 2

Marco Teórico Referencial

2.1. Introducción

En este capítulo se presentan los conceptos necesarios para llevar a cabo la compensación reactiva en un sistema de potencia a través de un DSTATCOM.

2.2. Armónicos

Una señal armónica tiene la frecuencia que es múltiplo de otra llamada fundamental, en el caso de Ecuador 60 [Hz] sería la frecuencia fundamental y unas armónicas pueden ser 120, 180, 240 [Hz], entre otras [5].

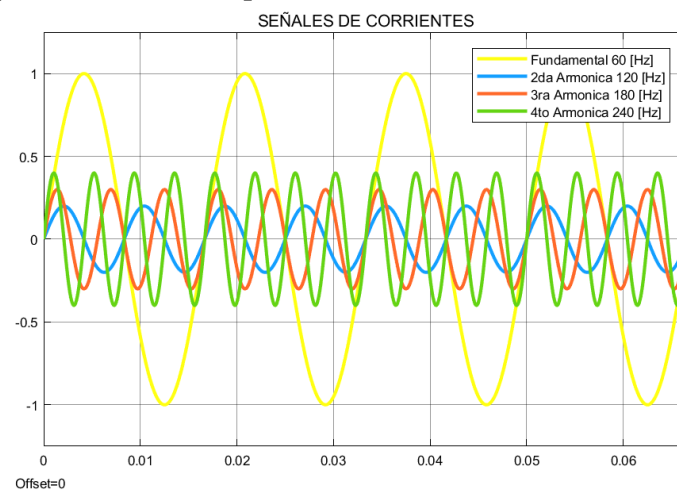


Figura 2. 1: Señal de corriente fundamental y armónicas

2.3. Las señales armónicas en un sistema eléctrico de distribución

Las señales armónicas en un sistema eléctrico son producidas por cargas no lineales llamadas así dado que su impedancia cambia con el voltaje aplicado, es decir que su corriente no será sinusoidal. En tiempos atrás las armónicas eran fáciles de ser detectadas ya que sus fuentes generadoras eran principalmente las aplicaciones industriales tales como hornos de arco, variadores de frecuencia, y grandes rectificadores, pero actualmente todo dispositivo eléctrico opera o internamente lleva electrónica de potencia como las computadoras, televisores, variadores de velocidad, iluminación led, entre otros [6]. Basándose de lo antes mencionado se puede crear cargas no lineales utilizando una fuente rectificadora que utilice elementos de estado sólido tales como diodos, tiristores, entre otras para suministrar de energía a una impedancia.

2.4. DSTATCOM

Tal y como indica el autor de la cita bibliográfica [7] el DSTATCOM es una fuente trifásica que se conecta a un punto común denominado PCC paralelo a la carga y se compone de una fuente convertidora de tensión (VSC) y un condensador de enlace, capaz de generar y/o absorber potencia reactiva, por lo que se utilizará todos estos elementos en Simulink. El controlador de este equipo puede ser capaz de variar la potencia reactiva para suministrar la necesaria a la carga.

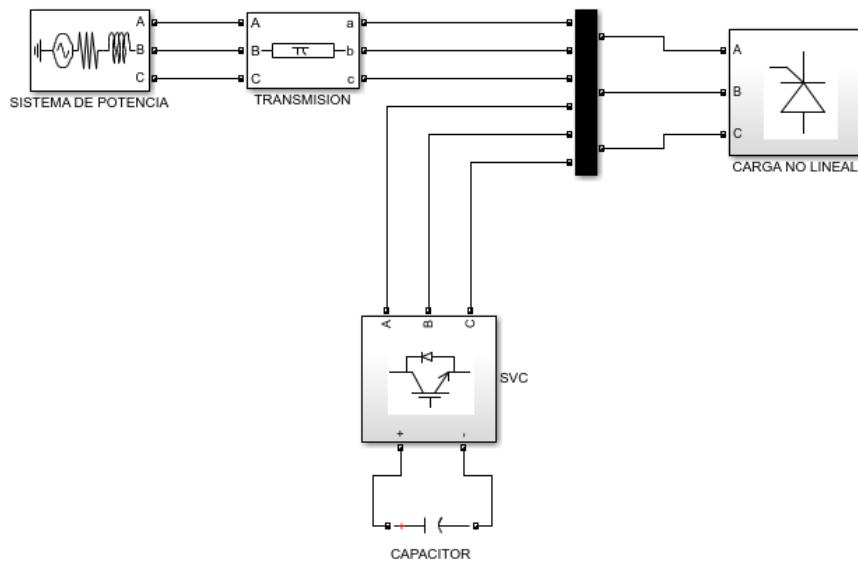


Figura 2. 2:Sistema eléctrico con carga lineal y DSTATCOM. Fuente de autor de 2021

2.5. Control por pulsos PWM

Las técnicas de control por pulsos PWM son de gran ayuda para generar señales de salida de buena calidad, estas técnicas usan una alta frecuencia de conmutación por lo que el uso de interruptores de potencia de estado sólidos son los más utilizados. El método más común es el que utiliza una señal modular de forma sinusoidal y una portadora de tipo triangular, cuya relación da como resultado un índice de modulación, el cual puede controlar el voltaje de salida del compensador. Esta técnica tiene un limitado ancho de banda, por lo que puede presentar errores en el seguimiento de los armónicos dado que depende de la frecuencia de modulación [8].

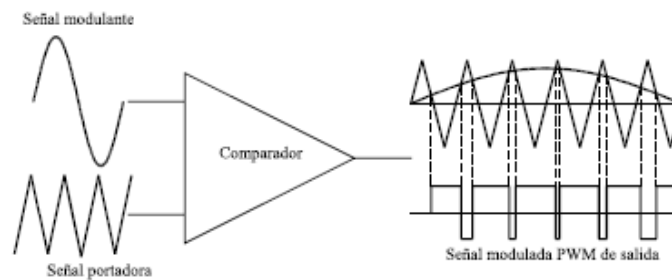


Figura 2. 3: Principio de la modulación senoidal con onda portadora triangular [8].

2.6. Control por histéresis

La técnica de control por histéresis también es conocida como técnica on-off, la cual tiene como resultado una serie de pulsos que nacen de la diferencia de dos señales a lo largo de un ancho de banda que tiene la forma de señal de compensación [9], por lo que este control será utilizado para controlar el DSTATCOM realizando la diferencia entre las corrientes que este produce y las que producen las cargas no lineales .

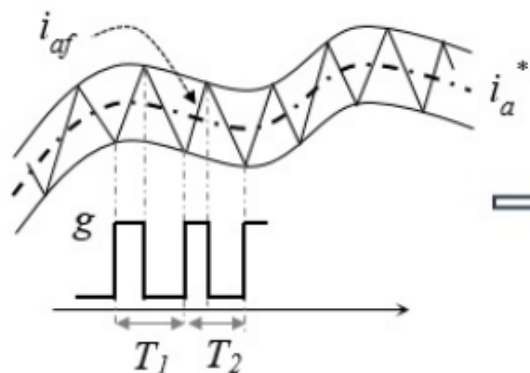


Figura 2. 4: Principio del control por histéresis [9].

2.7. Teoría de las potencias instantáneas PQ

Esta teoría permite descomponer la potencia de un sistema eléctrico en sus potencias instantáneas tanto activas y reactivas ya que podremos llevar las corrientes trifásicas a un marco estacionario (α, β) mediante la transformada de Clarke [10] de tal forma que:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 1}$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde v_a, v_b, v_c, i_a, i_b e i_c son los voltajes y corrientes trifásicas y $v_\alpha, v_\beta, i_\alpha$ e i_β son los voltajes y corrientes en el marco estacionario (α, β) por lo que podemos definir la potencia aparente de esta manera:

$$S = v_{\alpha\beta} \times i_{\alpha\beta}^* \quad \text{Ec.3}$$

$$S = (v_\alpha - jv_\beta)(i_\alpha + ji_\beta) \quad \text{Ec. 4}$$

$$S = v_\alpha i_\alpha + jv_\alpha i_\beta - jv_\beta i_\alpha + v_\beta i_\beta \quad \text{Ec. 5}$$

$$S = (v_\alpha i_\alpha + v_\beta * i_\beta) + j(v_\alpha i_\beta - v_\beta * i_\alpha) \quad \text{Ec. 6}$$

De las ecuaciones anteriores y posteriores S es la potencia aparente, por lo que:

$$S = P + jQ \quad \text{Ec.7}$$

Donde P es la potencia activa y Q la potencia reactiva dado esto tenemos:

$$P = (v_\alpha i_\alpha + v_\beta * i_\beta) \quad \text{Ec. 8}$$

$$Q = (v_\alpha i_\beta - v_\beta * i_\alpha) \quad \text{Ec. 9}$$

CAP 2. MARCO TEORICO REFERENCIAL

Si escribimos las ecuaciones anteriores como un sistema de ecuaciones obtenemos las potencias instantáneas de un sistema eléctrico:

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ -v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 10}$$

En un sistema eléctrico balanceado y con cargas lineales tanto P y Q son constantes y la ecuación anterior sería válida, pero cuando tenemos cargas no lineales tanto P y Q ya presentan disturbios en su valor y ya no son constantes por lo que la ecuación anterior quedaría de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{dc} + P_{ac} \\ Q_{dc} + Q_{ac} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde P_{dc} es la potencia fija es decir como si la carga fuera lineal y P_{ac} es la potencia que distorsiona a la potencia instantánea activa y de forma similar lo es para la potencia reactiva [11].

Capítulo 3

Metodología

3.1. Introducción

En este capítulo se detalla el sistema modelo a utilizar para la simulación y todos los casos de estudios. Siendo los pasos para seguir los siguientes:

- ✓ Definir modelo base.
- ✓ Definir los cambios a realizar en el modelo base
- ✓ Definir las cargas no lineales para obtener armónicos en el sistema.
- ✓ Definir las especificaciones del DSTATCOM.
- ✓ Diseñar el modelo de control por banda de histéresis utilizando los conceptos previos.

3.2. Caso I: Sistema de 9 barras IEEE con cargas lineales

El sistema eléctrico base del cual se va a partir para este trabajo será el de 9 barras de la IEEE, el mismo que se implementará en la herramienta Simulink de Matlab y está conformado por tres unidades de generación, tres de transformación y tres de carga. Este sistema representa una red de transmisión ya que el voltaje de sus barras es de 230kV, para este estudio en específico se lo va a trabajar como si fuera un sistema de distribución industrial con barras a un nivel de voltaje de 13.8kV dado que a niveles de voltajes grandes la mayor parte de los armónicos son poco visibles, además la mayor parte de las cargas no lineales que existen en un sistema trabajan a estos niveles de tensión dado a sus componentes electrónicos. A continuación, se presenta el sistema de 9 barras IEEE implementado en Simulink y sus tablas de detalles.

CAP 3. METOLOGIA

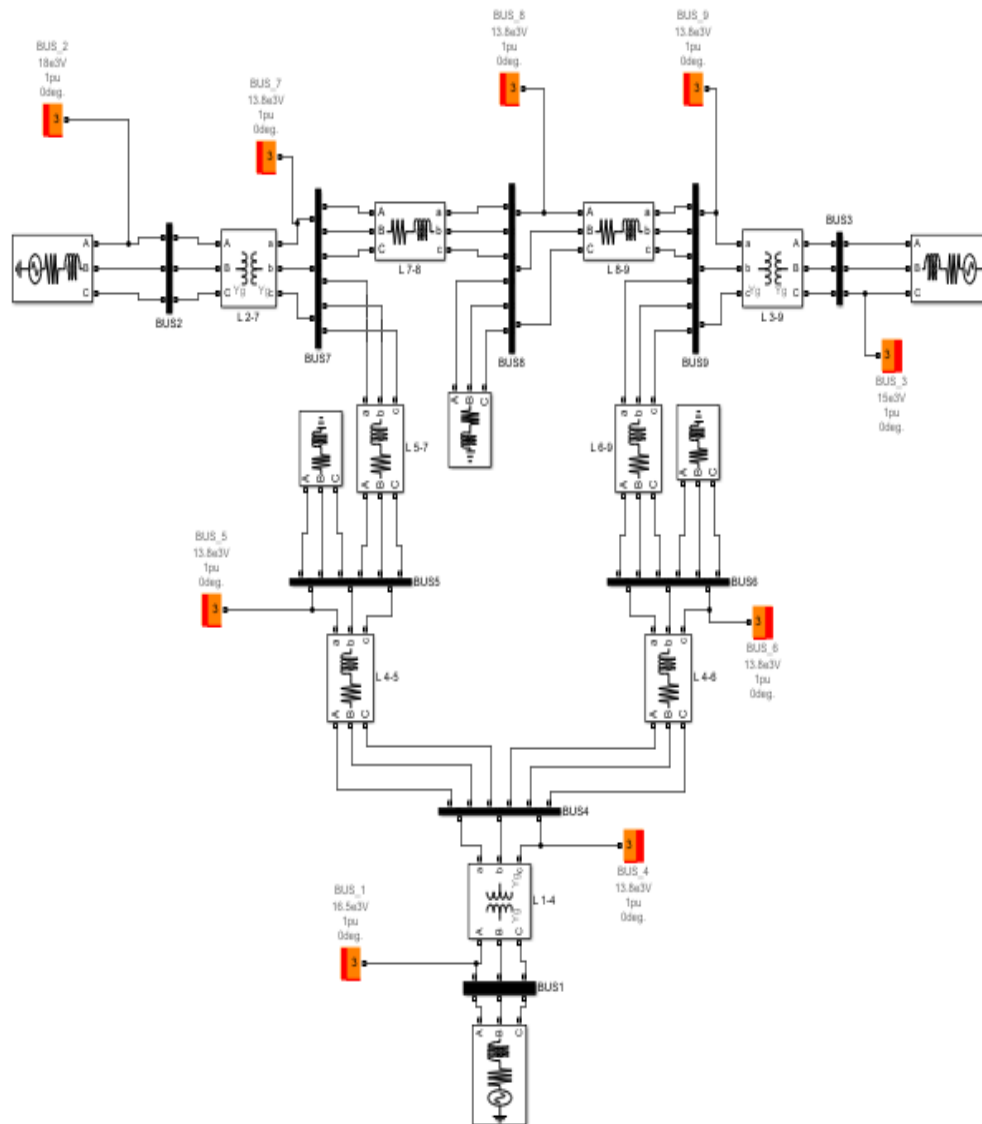


Figura 3.1: Sistema de 9 Barras de la IEEE en Simulink. Fuente de autor de 2021

3.2.1. Datos de cargas del sistema de la IEEE de 9 barras de 13.8kV

Para el estudio se asumieron valores de cargas comunes en industrias que trabajan a un voltaje de 13.8kV.

Tabla 3. 1: Datos de cargas del sistema de 9 barras IEEE de 13.8kV

# Barra	P LOAD (MW)	Q LOAD(MVAR)
5	2	0.7
6	2.5	1.1
8	0.9	0.5

3.2.2. Datos de líneas del sistema de la IEEE de 9 barras de 13.8kV

Dadas las cargas se pueden realizar los siguientes cálculos:

CARGA A

$$\begin{aligned} P &= 1 \text{ MW} \\ Q &= 0.4 \text{ MVAR} \\ S &= 1.077 \text{ MVA} \\ S &= \sqrt{3} * V_{LL} I_L \\ I_L &= \frac{1.077 \text{ MVA}}{\sqrt{3} * (13.8 \text{KV})} = 45.06 \text{ A} \end{aligned}$$

CARGA B

$$\begin{aligned} P &= 1.1 \text{ MW} \\ Q &= 0.5 \text{ MVAR} \\ S &= 1.208 \text{ MVA} \\ S &= \sqrt{3} * V_{LL} I_L \\ I_L &= \frac{1.208 \text{ MVA}}{\sqrt{3} * (13.8 \text{KV})} = 50.55 \text{ A} \end{aligned}$$

CARGA C

$$\begin{aligned} P &= 0.9 \text{ MW} \\ Q &= 0.5 \text{ MVAR} \\ S &= 1.0296 \text{ MVA} \\ S &= \sqrt{3} * V_{LL} I_L \\ I_L &= \frac{1.0296 \text{ MVA}}{\sqrt{3} * (13.8 \text{KV})} = 43.0754 \text{ A} \end{aligned}$$

Dada estas corrientes se asumirá la siguiente tabla:

Tabla 3. 2: Calibre de conductor para las líneas del sistema eléctrico [12].

LÍNEA	CALIBRE [AWG/kcmil]	LONGITUD [km]
L 4-5	4/0	5
L 4-6	4/0	5.5
L 5-7	4/0	2
L 5-9	4/0	1.5
L 7-8	4/0	2
L 8-9	4/0	2

CAP 3. METOLOGIA

Calibre AWG/ kcmil	Código	Resistencia a corriente alterna R (ohm/km)	Reactancia inductiva X_L (ohm/km)	
			Configuración triangular	Configuración plana
4	Swan	1.653	0.452	0.465
2	Sparrow	1.040	0.435	0.447
1/0	Raven	0.654	0.417	0.430
2/0	Quail	0.519	0.409	0.421
4/0	Penguin	0.327	0.391	0.404

Figura 3. 2: Resistencia e inductancia inductiva de conductores de aluminio ACSR.

Tomando la resistencia, reactancia inductiva y configuración triangular de la tabla tenemos:

Tabla 3. 3: Datos de línea del sistema de 9 barras IEEE 13.8kV [12].

LINEA	R [ohm]	XL [ohm]	L [mH]
L 4-5	1.635	1.955	5.186
L 4-6	1.799	2.151	5.704
L 5-7	0.654	0.782	2.074
L 6-9	0.491	0.587	1.556
L 7-8	0.654	0.782	2.074
L 8-9	0.654	0.782	2.074

3.2.3. Datos de generación del sistema de la IEEE de 9 barras de 13.8kV

Tabla 3. 4: Datos de generación del sistema de 9 barras IEEE 13.8kV.

# Barra	Magnitud Vol- taje (kV)	P Gen (MW)	Q Gen (MVAR)
1	16.5	1.78	0.83
2	18	0.5	0.25
3	16.5	0.5	0.25

3.3. Caso II: Sistema de 9 barras IEEE con cargas no lineales

Para poder realizar una compensación reactiva mediante un DSTAT-COM se cambiarán las cargas lineales de las barras 5 y 6 por unas no lineales de tal manera que el sistema presente armónicos, los mismos que afectarán a la red desde su generación. A continuación, se presenta el sistema de 9 barras de la IEEE con cargas no lineales.

CAP 3. METOLOGIA

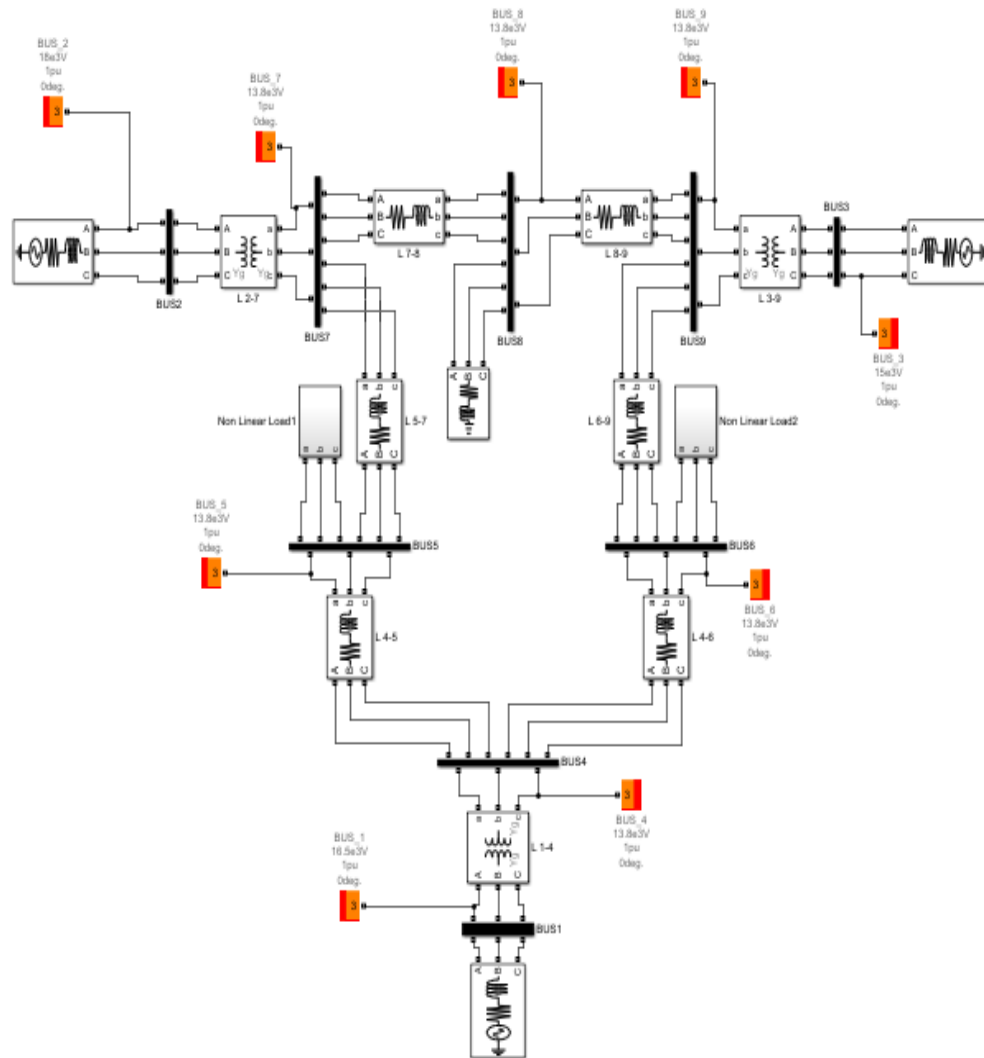


Figura 3. 3: Sistema de 9 Barras de la IEEE con cargas no lineales en la barra 5 y 6. Fuente de autor de 2021

Para las nuevas cargas de las barras 5 y 6 se usará una carga inductiva de 250kVAR y un sistema compuesto por un transformador trifásico de 13.8kV/440V quien suministrará de energía a una carga conformada por un puente rectificador trifásico con 6 diodos y una carga netamente resistiva de tal manera que las potencias de la cargas sean semejantes a la del CASO I, a continuación, se muestra la carga implementada en Simulink.

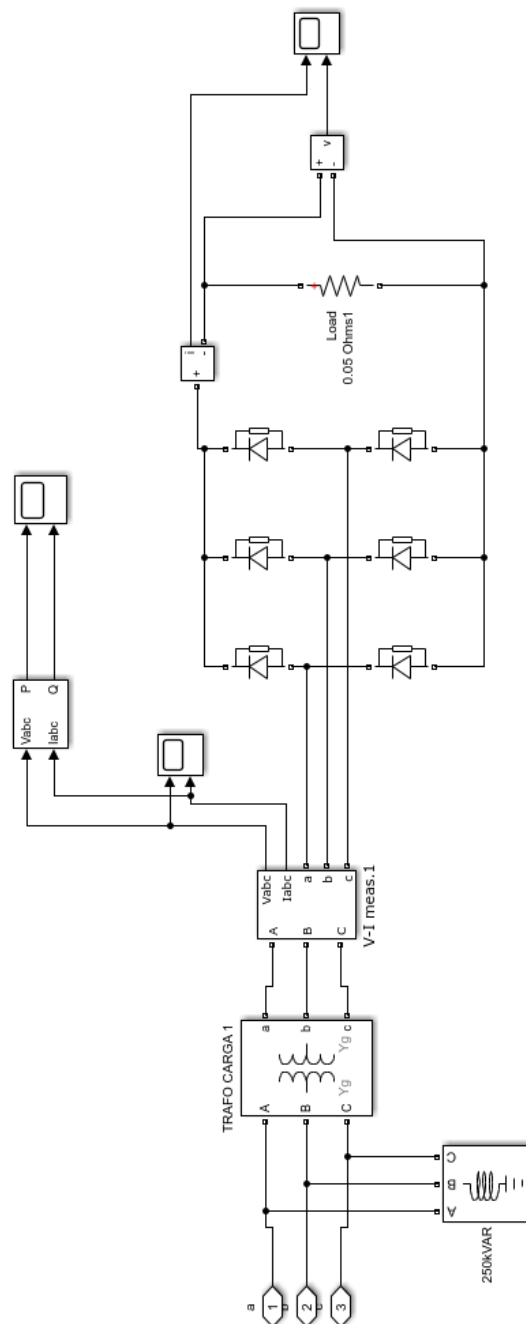


Figura 3. 4: Carga no lineal conectada a la barra 5. Fuente de autor de 2021

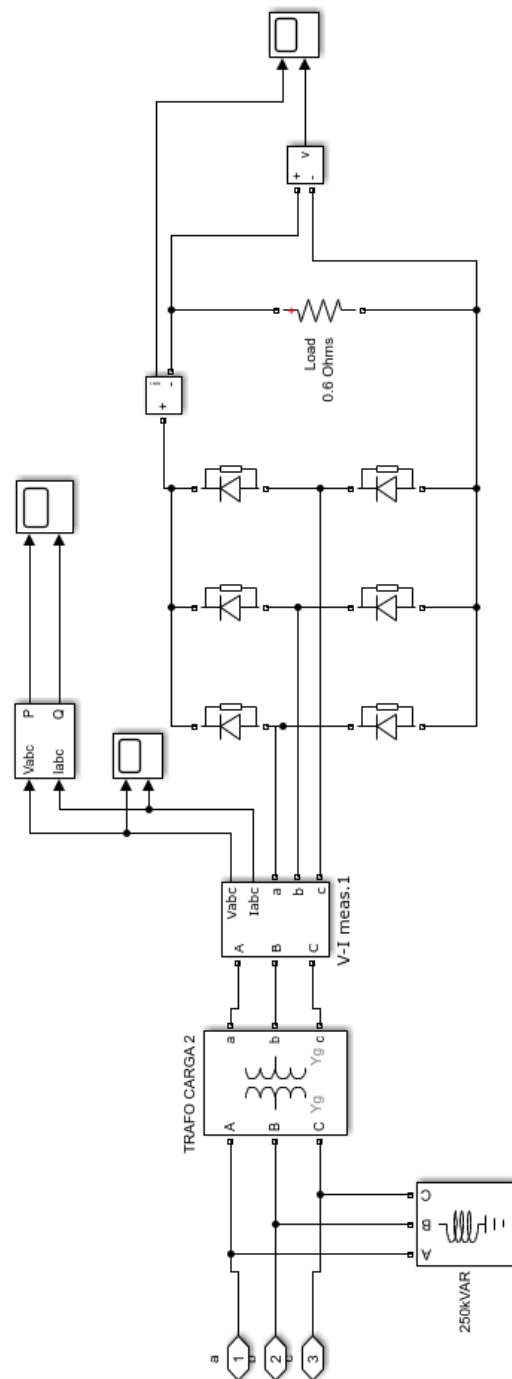


Figura 3. 5: Carga no lineal conectada a la barra 6. Fuente de autor de 2021

3.4. Caso III: Sistema de 9 barras IEEE con cargas no lineales y DSTACOM en la barra 5 y 6

Para este caso se usará el mismo modelo del Caso II añadiéndole un DSTACOM en las barras 5 y 6 tal y como se muestra a continuación:

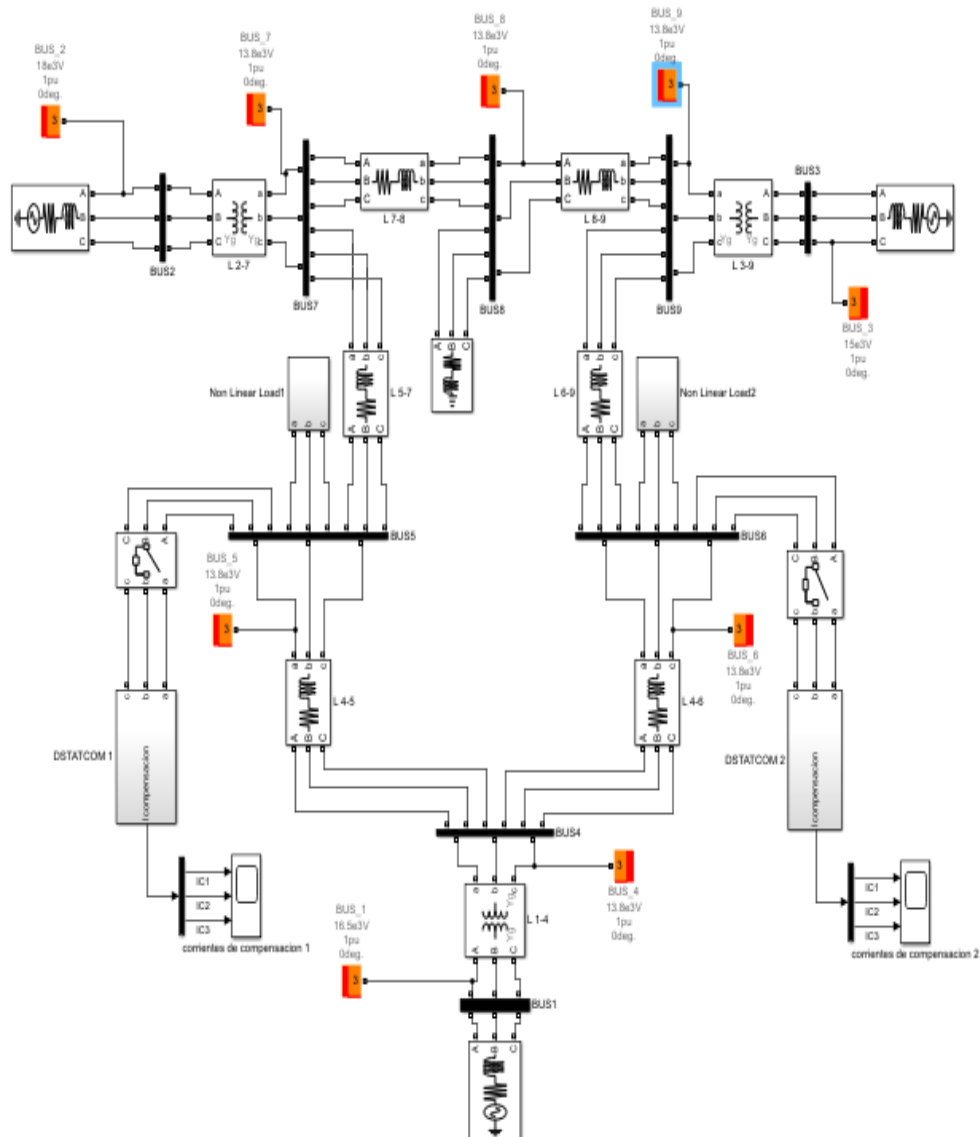


Figura 3. 6: Sistema de 9 Barras de la IEEE con cargas no lineales y DSTACOM en la barra 5 y 6. Fuente de autor de 2021

3.5. Especificaciones del DSTATCOM

Para la implementación del DSTATCOM se basará en el modelo base que consta de una línea de enlace de DC conformada por dos capacitores en serie, un VSC compuesto por un puente IGBT's/Diodo de 6 pulsos y un transformador de acople de 440V/13.8kV con una impedancia óptima para que permita el intercambio de potencia Reactiva a la red tal y como se muestra a en la figura siguiente:

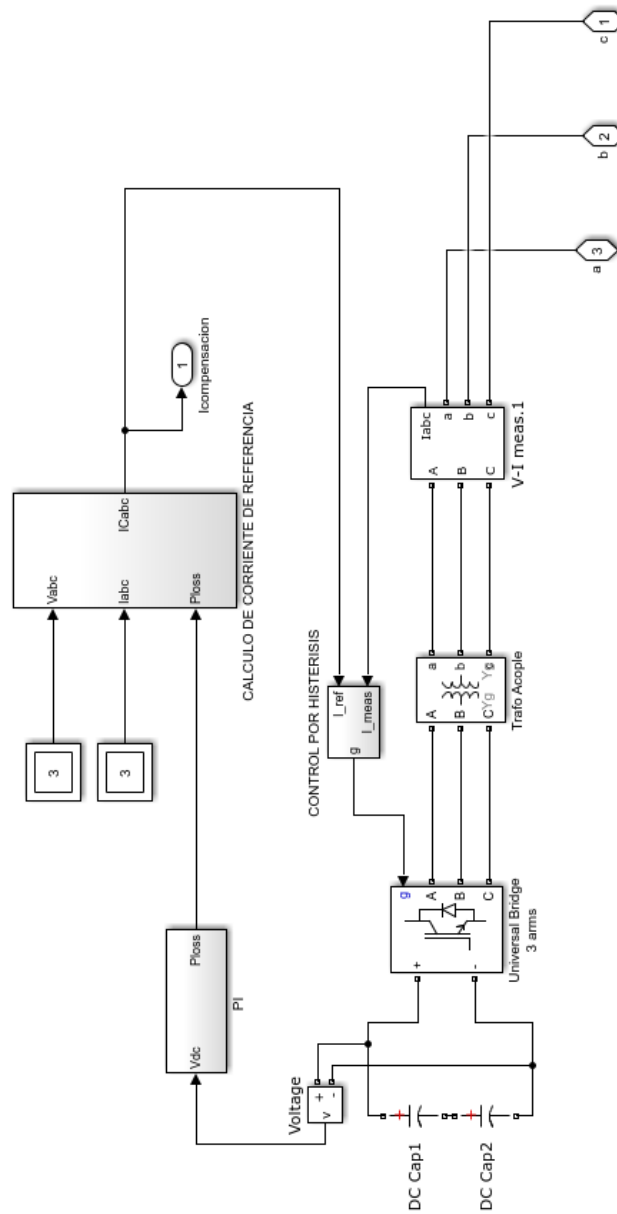


Figura 3. 7: DSTATCOM implementado en Simulink con sus bloques de control.

Para el dimensionamiento del capacitor de la línea DC del DSTATCOM se utilizará la ecuación para el cálculo de la tensión mínima DC dada en la cita bibliográfica [13]:

$$V_{DCmin} = \frac{V_{LL}\sqrt{2}}{m * n * \frac{\sqrt{3}}{2}} \quad \text{Ec. 12}$$

Donde VLL es el voltaje nominal de línea a línea de la parte AC del inversor, m es el factor de modulación que para este estudio se asumirá el valor de 1 y n es la relación de vueltas del transformador de acople es decir 13800/440, dado lo antes mencionado tenemos:

$$V_{DCmin} = \frac{13800 * \sqrt{2}}{\left(\frac{13800}{440}\right) * \frac{\sqrt{3}}{2}} = 718.5 \text{ V}$$

El voltaje antes calculado es el mínimo que puede producir la barra DC del DSTATCOM, pero dadas las perturbaciones generadas por las modulaciones y operaciones de los IGBT's, se producen perdidas que pueden desestabilizar el control del compensador, por lo que es necesario darle un margen superior a este voltaje, esto para garantizar la carga y descarga del capacitor, por esta razón VDC será igual a 4000V. Dado el voltaje del lado DC del inversor se puede utilizar la siguiente ecuación para calcular la capacitancia del capacitor.

$$Q = V_{DC}^2 * 2 * \pi * 60 * C \quad \text{Ec. 13}$$

Donde Q es la potencia Reactiva del DSTATCOM, VDC es el voltaje mínimo de la barra de enlace DC del inversor y C es la capacitancia del capacitor, de la ecuación anterior se tiene:

$$C = \frac{Q}{V_{DC}^2 * 2 * \pi * 60}$$

$$C = \frac{100KVAR}{4000^2 * 2 * \pi * 60} = 16.57\mu F$$

Dado el resultado anterior se utilizará dos capacitores en serie de 35uF. Mientras que para el dimensionamiento de la reactancia inductiva del transformador de acople se utilizará la ecuación de intercambio de potencia reactiva la cual es:

$$Q = \frac{|V_{DSTC} - V_{RED}| * |V_{DSTC}|}{x_L} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde Q es la potencia reactiva que puede suministrar el DSTATCOM, V_{DSTC} es el voltaje de acoplamiento del DSTATCOM y V_{RED} es el voltaje de la red, cabe recalcar que para que exista intercambio de potencia reactiva el Voltaje del DSTATCOM debe ser mayor en magnitud que el de la red.

Se asume que la diferencia entre el voltaje del DSTATCOM y el de la red es muy pequeña por lo que se realizará un barrido con la ecuación anterior para hallar la impedancia ideal para el transformador de acople, definiendo al voltaje de la red con el valor de 1 p.u. y el rango del voltaje del DSTATCOM en 1.001 hasta 1.1, siendo el voltaje seleccionado 1.007 p.u., tomando la ecuación anterior se tiene:

$$x_L \text{ p.u.} = \frac{|V_{DSTC} \text{ p.u.} - V_{RED} \text{ p.u.}| * |V_{DSTC} \text{ p.u.}|}{Q \text{ p.u.}}$$

$$x_L \text{ p.u.} = \frac{|1.007 - 1| * |1.007|}{1}$$

$$x_L \text{ p.u.} = 0.007$$

Calculando la impedancia base asumiendo como voltaje y potencia base $V_b = 13.8 \text{ KV}$ y $S = 1 \text{ MVA}$ se tiene:

$$Z_{base} = \frac{V_{BASE}^2}{S_{BASE}} \quad \text{Ec. 15}$$

$$Z_{base} = \frac{13800V^2}{1MVA}$$

$$Z_{base} = 190.44 \Omega$$

La reactancia inductiva en ohms es:

$$x_L = x_L \text{ p.u.} * Z_{base} \quad \text{Ec. 16}$$

$$x_L = 0.007 * 190.44$$

$$x_L = 1.34 \Omega$$

La inductancia en henrios viene dada por la ecuación:

$$L = \frac{x_L}{2 * \pi * 60} \quad \text{Ec. 17}$$

$$L = 0.0036 \text{ H ó } 3.6 \text{ mH}$$

Dada la configuración del DSTATCOM y los cálculos anteriores a continuación se detalla los valores de sus componentes:

Tabla 3. 5: Especificaciones del DSTATCOM de la carga no lineal de la barra 5 y 6.

DSTATCOM 1 Y 2	
Capacitor 1	Dc Cap1 = 35 uF
Capacitor 2	Dc Cap2 = 35 uF
IGBT's/Diodo	Rs = 100000 ohms Cs = inf Ron = 10000 ohms
Transformador de acople	S = 1 MVA Vp = 440V Vs = 13.8 kV Rt = 0.5e-3 Ohm Lt = 3.6 mH

3.6. Diseño del control del DSTATCOM

El control del DSTATCOM se utiliza para la operación de los IGBT's que conforman el puente del VSC de tal manera que el flujo de corriente reactiva sea regulable por lo que se puede inyectar a la red la potencia reactiva necesaria que generan armónicos debido a las cargas no lineales [14].

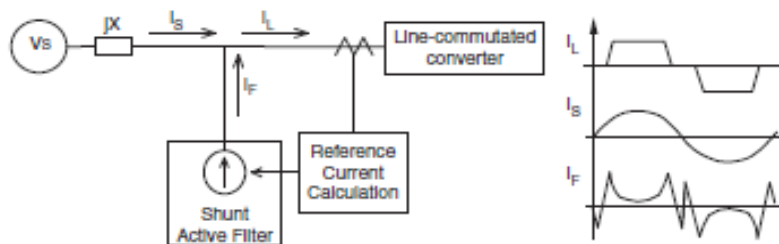


Figura 3. 8:Control de DSTATCOM mediante el cálculo de corrientes de referencias [15].

En este trabajo el control que genera los pulsos del VSC utiliza la técnica de Banda de Histéresis, por lo que se seguirá los siguientes pasos:

1. Se realiza la medición de las señales de voltajes y corrientes de la red es decir las señales que vienen desde el generador o sistema de distribución.
2. Se realiza la medición de las señales de corrientes y voltajes de la carga y de la fuente.
3. Se transforma mediante la transformada de Clarke las corrientes de la carga y los voltajes de la fuente.
4. Utilizando la Ec. 10 de la teoría P-Q se calcula la potencia activa y reactiva instantánea utilizando los voltajes y corrientes en las coordenadas $\alpha\beta$ del paso anterior.

5. El bus de enlace CC es controlado mediante un controlador PI quien define los intervalos de carga y descarga del capacitor de tal forma que si es detectada una descarga del condensador incrementa la corriente con el objetivo de recuperar la tensión prevista [14] y esto hará que el switcheo del VSC consuma algo de potencia activa de la red trifásica para poder regular la tensión DC y esta se la llamará P_{loss} .
6. Dado que $P = P_{dc} + P_{ac}$ se utiliza un filtro pasa alto para eliminar el termino variable, más allá que se realizará una compensación de las corrientes reactivas que generan armónicos es muy importante compensar la potencia activa variable para poder regular el voltaje del enlace DC del DSTATCOM y esta viene dada por la ecuación siguiente:

$$\tilde{P} = -P + P_{dc} + P_{loss} \quad \text{Ec. 18}$$

7. Mientras que la potencia reactiva será $Q = Q_{dc} + Q_{ac}$ tal como se había definido en la EC. 11 pero dado a que esa es la potencia que se requiere suministrar a la red utilizaremos el negativo de este termino.
8. Utilizando la ecuación la Ec. 19 se calcula las corrientes de referencia de las fases abc.

$$\begin{bmatrix} i_{aref} \\ i_{bref} \\ i_{cref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ -v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{P} + P_{loss} \\ Q_{dc} + Q_{ac} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 19}$$

9. Se comparan las corrientes de compensación de referencia abc con las corrientes que produce el DSTATCOM de tal manera que se generan los pulsos de control para los IGBT's del VSC.

En la figura siguiente se muestra el bloque de control del DSTATCOM expandido en el que se sigue todos los pasos mencionados anteriormente:

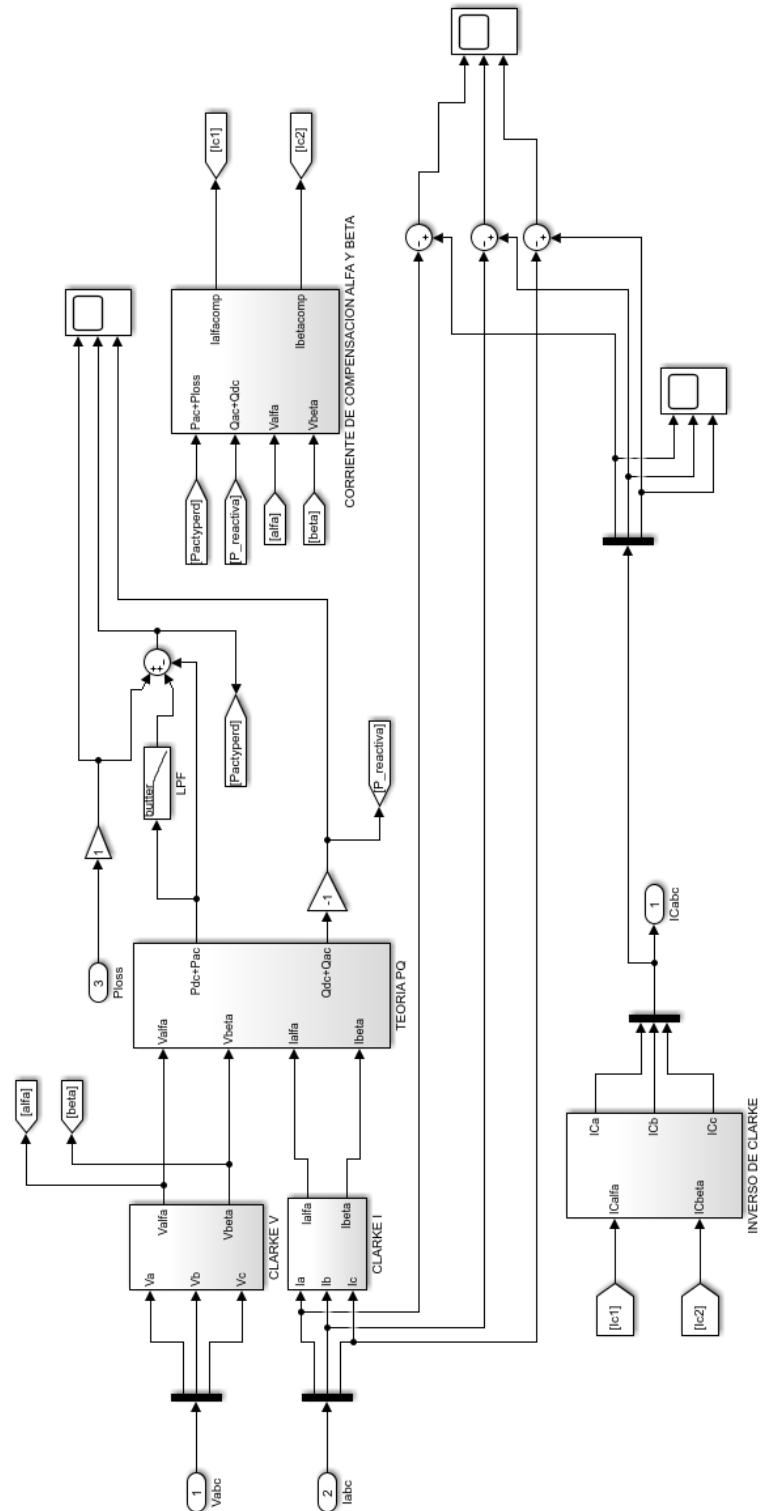


Figura 3. 9: Bloques de transformación Clarke y Teoría PQ.

3.7. Bloques para implementación del sistema en Simulink

Los bloques que se usaran en Simulink para la construcción y simulación del sistema de 9 barras IEEE son los siguientes:

Three-Phase Source.- Se utilizará para las unidades de generación del sistema.

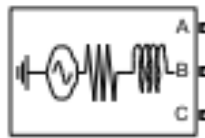


Figura 3. 10: Bloque Three-Phase Source de Simulink librería Power System.

Three-Phase Transformer.- Se utilizará para las unidades de transformación del sistema.

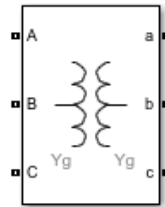


Figura 3. 11: Bloque Three-Phase Trnasformer de Simulink librería Power System.

Three-Phase Series RLC Branch.- Se utilizará representar las líneas de transmisión.



Figura 3. 12: Bloque Three-Phase Series RLC Branch de Simulink librería Power System.

Three-Phase V-I Measurement.- Se utilizará la medición de las señales de voltajes y corrientes del sistema.

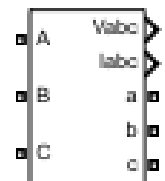


Figura 3. 13: Bloque Three-Phase V-I Measurement de Simulink librería Power System.

CAP 3. METOLOGIA

Scope. - Se utilizará para la visualización del sistema.

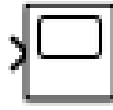


Figura 3. 14: Bloque Scope de Simulink librería Sinks.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados detallados por medio de graficas del problema y solución de las señales armónicas en el sistema de 9 barras de la IEEE.

4.2. Señales de voltajes de las barras de cargas 5 y 6 y de la barra slack del sistema con cargas lineales y no lineales

En la Figura 4.1 se puede observar que las señales de voltajes de las barras 1, 5 y 6 del sistema son totalmente senoidales cuando las cargas son lineales, mientras que con cargas no lineales existe una pequeña diferencia que suele ser imperceptible, es decir para este estudio los armónicos no afectan considerablemente a las señales de voltajes.

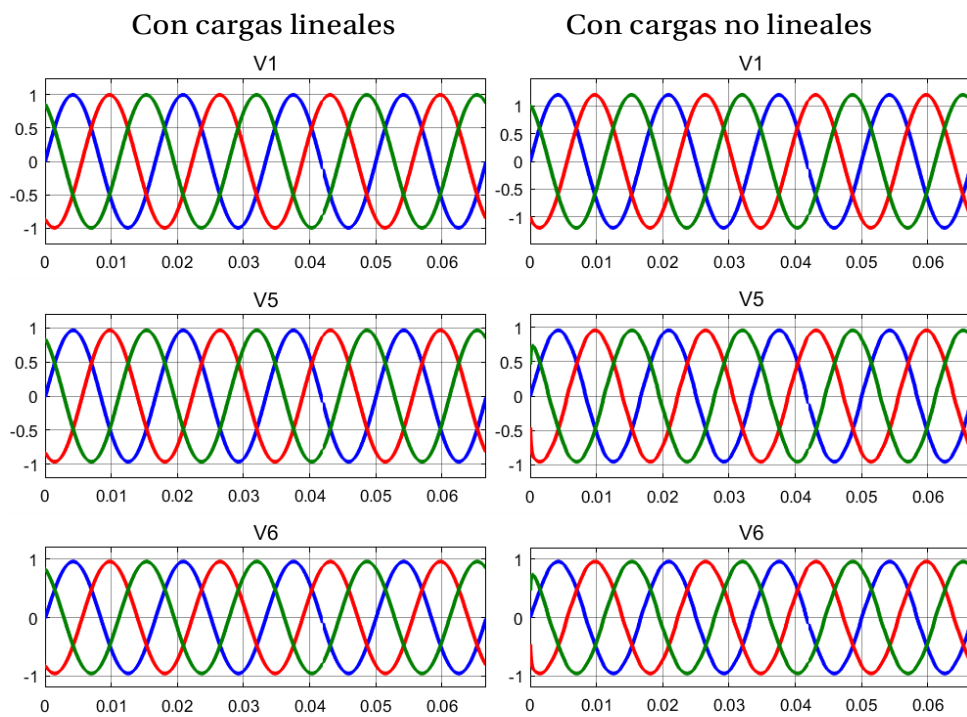


Figura 4. 1: Voltajes de las barras 1, 5 y 6 con cargas lineales (derecha) y no lineales (izquierda).

4.3. Señales de corrientes de las barras de cargas del sistema con cargas lineales y no lineales

En la Figura 4.2 se puede observar que las señales de corrientes de las barras 1, 5 y 6 del sistema son totalmente senoidales cuando las cargas son lineales, mientras que son totalmente distorsionadas cuando las cargas son no lineales esto debido a los armónicos que existen en la red.

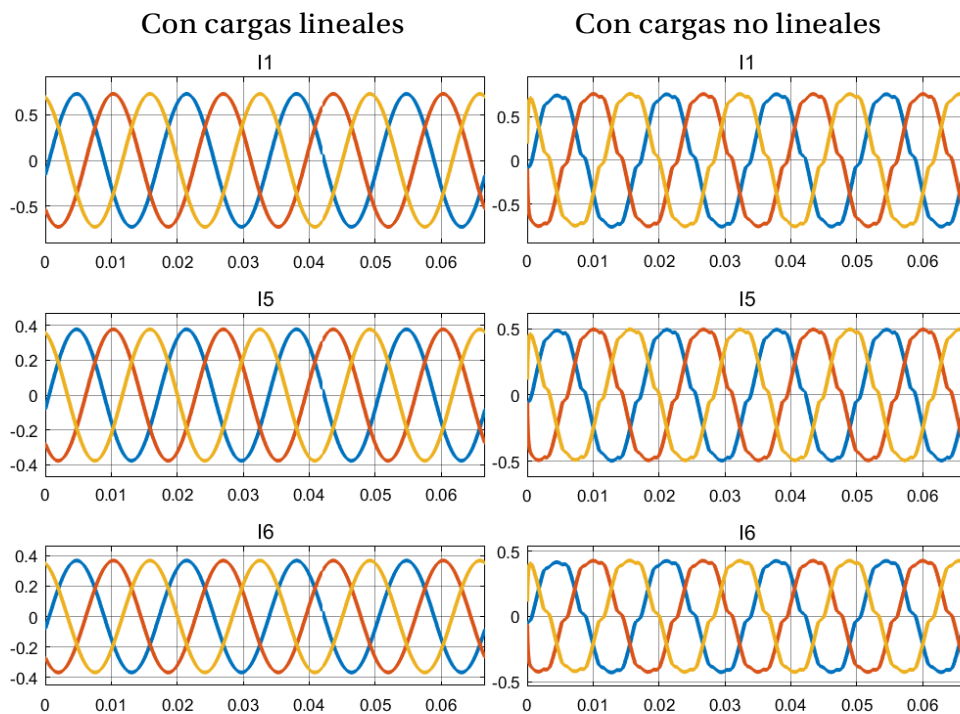


Figura 4. 2: Corrientes de las barras 1,5 y 6 con cargas lineales (derecha) y no lineales (izquierda).

4.4. Señales de voltajes y corrientes de las barras de cargas del sistema cuando entra en operación el DSTATCOM de la barra 5 en el tiempo de simulación igual a 0,02.

En la Figura 4.3 se puede observar que las señales de voltajes de las barras 1, 5 y 6 del sistema cuando entra en operación el DSTATCOM no varían mucho dado a que los armónicos no afectan notablemente a las señales de voltajes en este sistema, mientras que las corrientes de la barra 5 donde se encuentra acoplado el DSTATCOM es la única que se vuelve senoidal después del tiempo de simulación de 0.02, también se puede observar que las corrientes de la barra 1 mejoran en comparación al intervalo en donde está fuera de servicio la compensación.

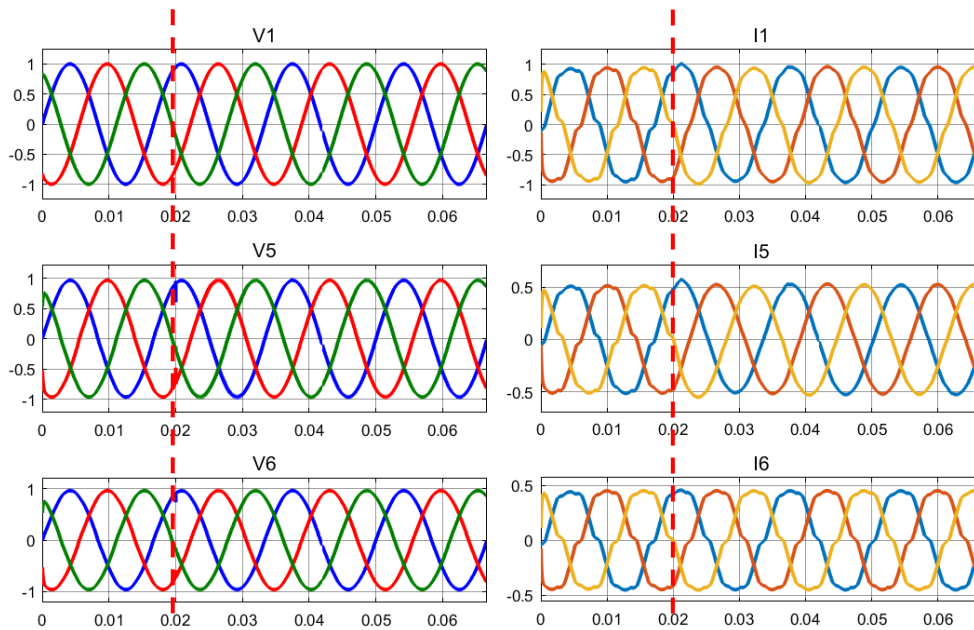


Figura 4. 3: Corrientes de las barras 1,5 y 6 con cargas no lineales y con entrada del DSTATCOM.

4.5. Señales de voltajes y corrientes de las barras de cargas del sistema cuando entra en operación el DSTATCOM de la barra 6 en el tiempo de simulación igual a 0,02.

En la Figura 4.4 se puede observar que las señales de voltajes de las barras 1, 5 y 6 del sistema cuando entra en operación el DSTATCOM no varían mucho por el mismo motivo del caso anterior, mientras que las corrientes de la barra 6 donde se encuentra acoplado el DSTATCOM es la única que se vuelve senoidal después del tiempo de simulación de 0.02, también se puede observar que las corrientes de la barra 1 mejoran en comparación al intervalo en donde está fuera de servicio la compensación.

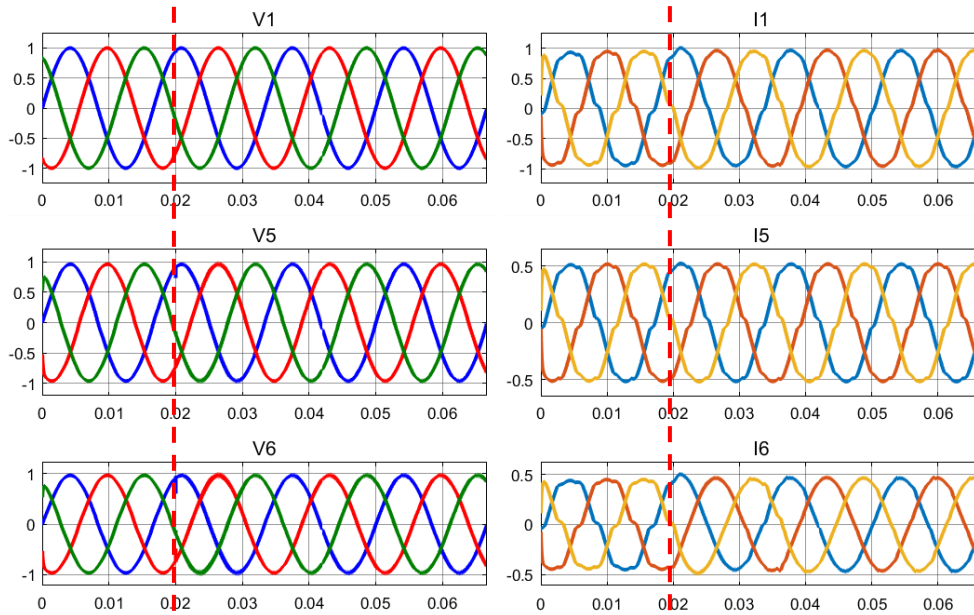


Figura 4. 4: Corrientes de las barras 1,5 y 6 con cargas no lineales y con entrada del DSTATCOM.

4.6. Señales de voltajes y corrientes de las barras de cargas del sistema cuando entra en operación el DSTATCOM de la barra 6 en el tiempo de simulación igual a 0,02.

En la Figura 4.5 se puede observar que las señales de voltajes de las barras 1, 5 y 6 del sistema cuando entra en operación el DSTATCOM de las barras 5 y 6 no varían mucho dado a que los armónicos no afectan notablemente a las señales de voltaje en este sistema, mientras que las corrientes si se vuelven senoidales en todas las barras en el tiempo de simulación de 0,02 ya que entra en operación ambos compensadores.

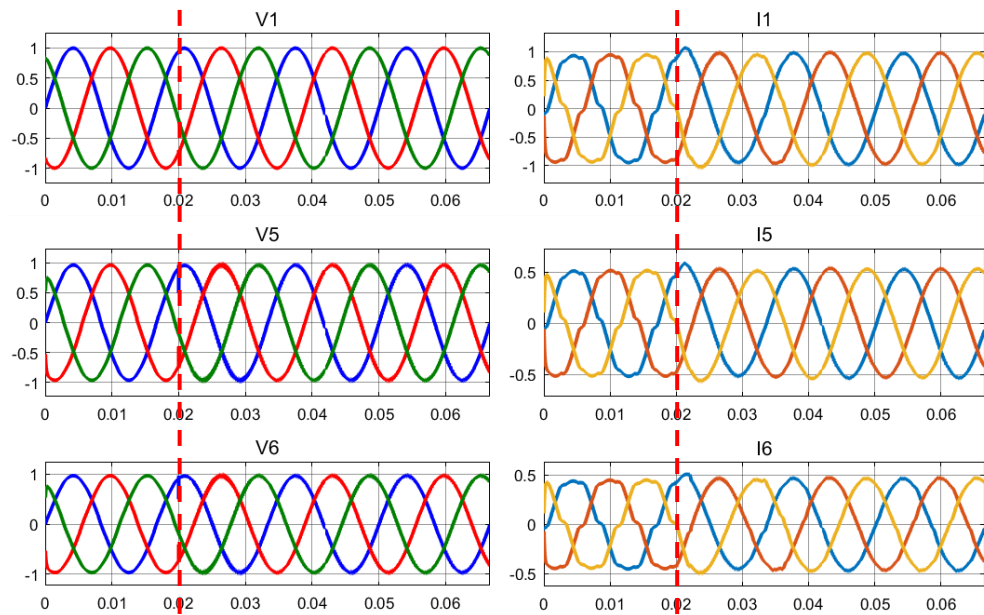


Figura 4. 5: Corrientes de las barras 1,5 y 6 con cargas no lineales y con entrada del DSTATCOM.

4.7. Señales de potencia activa y reactiva del generador de la barra slack del sistema con DSTATCOM en la barra 5

En la Figura 4.6 se puede observar las señales de potencias del generador de la barra slack en donde la potencia activa (azul) se mantiene fija durante el tiempo de simulación, mientras que la potencia reactiva (roja) empieza a disminuir en el tiempo de simulación de 0,02 y se mantiene fija a partir de 0,04 lo que quiere decir que el tiempo de respuesta del DSTATCOM es de 0,02.

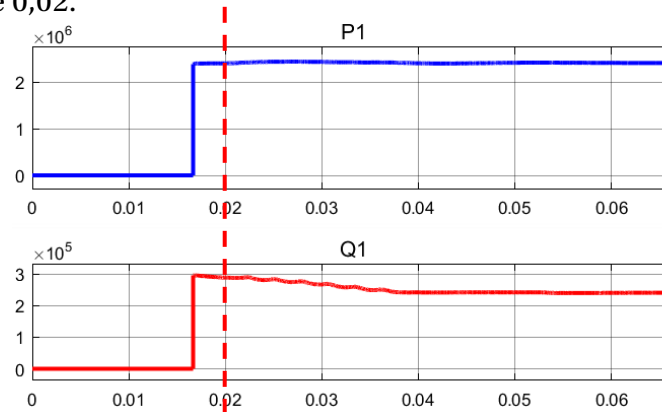


Figura 4. 6: Corrientes de las barras 1,5 y 6 con cargas no lineales y con entrada del DSTATCOM.

4.8. Señales de potencia activa y reactiva del generador de la barra slack del sistema con DSTATCOM en la barra 6

En la Figura 4.7 tal como el caso anterior la potencia activa se mantiene fija durante el tiempo de simulación, mientras que la potencia reactiva disminuye en $t=0,02$; el tiempo de respuesta es de 0,032.

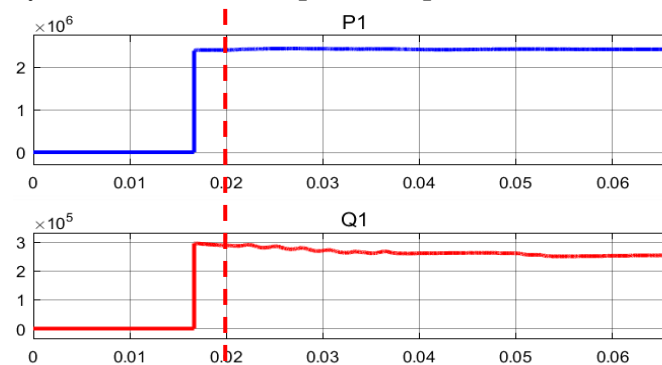


Figura 4. 7: Corrientes de las barras 1,5 y 6 con cargas no lineales y con entrada del DSTATCOM.

4.9. Señales de potencia activa y reactiva del generador de la barra slack del sistema con DSTATCOM en las barras 5 y 6

En la Figura 4.7 se puede observar que la potencia activa del generador se mantiene fija durante el tiempo de simulación, mientras que la potencia reactiva empieza a disminuir en el tiempo de simulación de 0,02 y se mantiene fija a partir de 0,05 lo que quiere decir que el tiempo de respuesta del DSTATCOM es de 0,03.

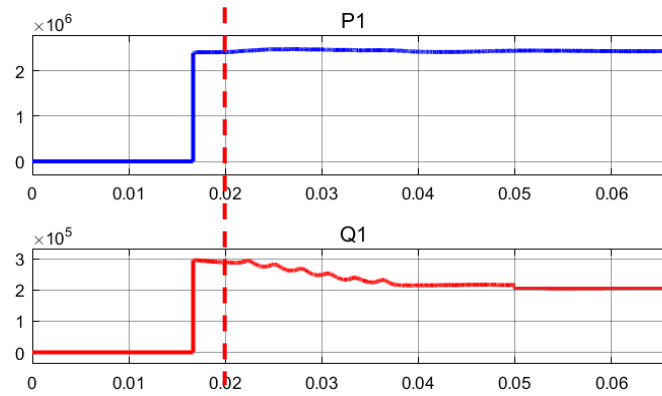


Figura 4. 8: Corrientes de las barras 1,5 y 6 con cargas no lineales y con entrada del DSTATCOM.

4.6 Corrientes de compensación del DSTATCOM de la barra 5.

En la Figura 4.5 se puede observar las corrientes de compensación de cada una de las fases del DSTATCOM que se encuentra conectado en la barra 5 el cual empieza a inyectar corriente a la red en el tiempo igual a 0,02.

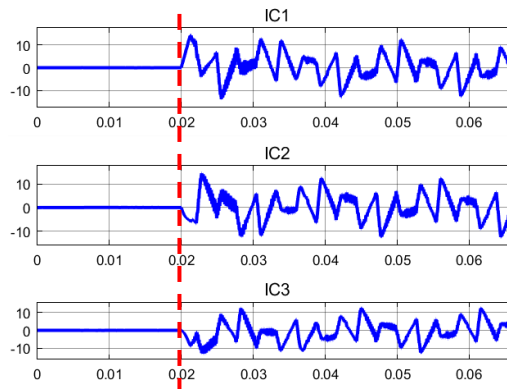


Figura 4. 9: Corrientes de compensación del DSTATCOM 1.

4.10. Corrientes de compensación del DSTATCOM de la barra 6.

En la Figura 4.6 se puede observar las corrientes de compensación de cada una de las fases del DSTATCOM que se encuentra conectado en la barra 6 el cual empieza a inyectar corriente a la red en el tiempo igual a 0,02.

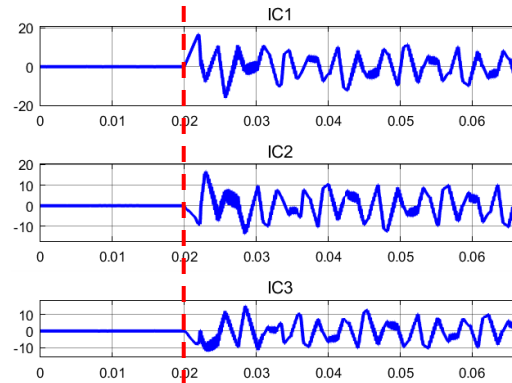


Figura 4. 10:Corrientes de compensación del DSTATCOM 2.

4.11. Análisis de Armónicos

Dado a que las corrientes son las más afectadas por los armónicos se presenta en la siguiente tabla el THD de todas las barras del sistema con y sin compensación.

Tabla 4. 1 THD de todas las barras del sistema sin la operación del DSTATCOM de la barra 5 y con la entrada de este a la red.

N° DE BARRA	THD DE LAS BARRAS	
	SIN COMPENSACION	CON COMPENSACION
1	7,69	4,36
2	3,65	2,13
3	3,56	2,30
4	7,71	4,37
5	6,48	1,31
6	9,16	7,96
7	3,66	2,14
8	2,38	5,90
9	3,58	2,31

En la Tabla 4.1 se puede observar que el THD disminuye en todas las barras del sistema cuando entra a la red el DSTATCOM de la barra 5 a excepción de la barra 8 que aumenta su distorsión de onda.

CAP 4. RESULTADOS

Tabla 4. 2 THD de todas las barras del sistema sin la operación del DSTATCOM de la barra 6 y con la entrada de este a la red.

N° DE BARRA	THD DE LAS BARRAS	
	SIN COMPENSACION	CON COMPENSACION
1	7,69	3,62
2	3,65	1,91
3	3,56	1,66
4	7,71	3,63
5	6,48	5,38
6	9,16	2,16
7	3,66	1,92
8	2,38	3,67
9	3,58	1,67

En la Tabla 4.2 se puede observar que el THD más que en el caso anterior en cada una de las barras del sistema cuando entra a la red el DSTATCOM de la barra 6.

Tabla 4. 3 THD de todas las barras del sistema sin la operación del DSTATCOM de la barra 5 y 6 y con la entrada de estos a la red.

N° DE BARRA	THD DE LAS BARRAS	
	SIN COMPENSACION	CON COMPENSACION
1	7,69	1,69
2	3,65	0,86
3	3,56	0,85
4	7,71	1,7
5	6,48	1,46
6	9,16	2,24
7	3,66	0,86
8	2,38	1,36
9	3,58	0,85

En la Tabla 4.3 se puede observar que el THD disminuye considerablemente en cada una de las barras del sistema cuando entra a la red el DSTATCOM de la barra 5 y 6.

Capítulo 5

Conclusiones

La teoría de potencias instantáneas PQ es una gran herramienta para realizar compensación reactiva ya que permite separar la potencia reactiva que genera la red y sus elementos de la que es producida netamente por las cargas no lineales, por lo que mediante un control y medición se puede replicar esta corriente evitando que sea la red la que la produzca, desapareciendo así los armónicos que afectan al sistema de transmisión y generación.

La curva de la potencia reactiva en cada uno de los casos disminuye ya que al entrar en funcionamiento el DSTATCOM el mismo se encarga de suministrar toda la potencia que necesita la carga no lineal que está compensando, por lo que el generador de la red ya no necesita producir más reactivos para equilibrar el flujo de potencia.

La potencia activa de la barra slack se mantiene uniforme debido a que la compensación que realiza el DSTATCOM 1 y 2 es netamente reactiva.

El THD de las corrientes de las barras solo mejoran cuando están en funcionamiento ambos compensadores ya que solo en ese caso cumplen con los valores aceptables según la norma IEEE 512 que es una distorsión de onda menor al 5% para niveles de voltajes de 13.8 KV.

Para trabajos futuros se podría cambiar el nivel de tensión de todas las barras y utilizar un control de pulsos diferente para evaluar el tiempo de respuesta del DSTATCOM.

Bibliografía

- [1] T. Mostefa, B. Tarak, and G. Hachemi, "An automatic diagnosis method for an open switch fault in unified power quality conditioner based on artificial neural network," *Trait. du Signal*, vol. 35, no. 1, pp. 7–21, 2018.
- [2] G. Reyes Calderon, "Armonicas En Sistemas De Distribucion De Energia Eléctrica," p. 81, 1996.
- [3] P. Garcia-Gonzalez and A. Garcia-Cerrada, "Control system for a PWM-based STATCOM," *1999 IEEE Power Eng. Soc. Summer Meet. PES 1999 - Conf. Proc.*, vol. 2, no. 4, pp. 1140–1145, 1999.
- [4] B. Sourabh, "Applications of DSTATCOM Using MATLAB / Simulation in Power System," *Res. J. Recent Sci.*, vol. 1, pp. 430–433, 2012.
- [5] Tejada Alexis and Llamas Armando, "Efectos De Las Armónicas En Los Sistemas Eléctricos," *ITESM Campus Monterrey*, no. March, p. 8, 2017.
- [6] J. D. Arcila, "Armónicos En Sistemas Eléctricos," *Armónicos En Sist. Eléctricos*, pp. 1–26, 2016.
- [7] A. G. ULLOA DE SOUZA, "OPTIMA UBICACION Y DIMENSIONAMIENTO DE D-STATCOM PARA LA COMPENSACION DE POTENCIA REACTIVA EN REDES DE DISTRIBUCION CONSIDERANDO LA INCIDENCIA DE ARMONICOS," *Univ. Politécnica Sales.*, pp. 1–37, 2018.
- [8] Juan Ramirez, Gladys Caicedo, and Rosa Correa, *Sistemas de transmisión flexibles FACTS*, 1st ed. Santiago de Cali, 2010.
- [9] D. Murillo-Yarce, J. J. Marulanda-Durango, and A. Escobar-Mejía, "Estudio comparativo de técnicas PWM de banda de histéresis para el control de corriente en filtros activos de potencia paralelos," *TecnoLógicas*, vol. 21, no. 43, pp. 91–106, 2018.
- [10] P. Ángel Blasco Espinosa and D. D. José Manuel Díez Aznar Joaquín Montañana Romeu Valencia, "Formulación De La Potencia De Desequilibrio. Aplicación a Redes Eléctricas Desequilibradas Sinusoidales Tesis Doctoral," 2015.
- [11] Y. Hoon, M. A. Mohd Radzi, M. K. Hassan, and N. F. Mailah, "Enhanced Instantaneous Power Theory with Average Algorithm for Indirect Current Controlled Three-Level Inverter-Based Shunt Active Power Filter under Dynamic State Conditions," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2016, 2016.

BIBLIOGRAFIA

- [12] M. Mohanan and Y. I. Go, "Optimized Power System Management Scheme for LSS PV Grid Integration in Malaysia Using Reactive Power Compensation Technique," *Glob. Challenges*, vol. 4, no. 4, p. 1900093, 2020.
- [13] ADOLFO MUÑOZ and STEFANIA RIOS, "DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE COMPENSACIÓN PARA EL CONTROL DE TENSIÓN DE UN PARQUE EÓLICO EN EL PUNTO DE ACOPLA CON LA RED," *Univ. TECNOLÓGICA PEREIRA*, vol. 1, no. JULIO, p. 95, 2016.
- [14] C. Alejandro, D. Duarte, and A. M. Ramos, "Modelación de un compensador estático para el control de generación distribuida con energías renovables.," *Univ. Chile*, 2009.
- [15] Muhammad H. Rashid, *Power Electronics Handbook*, 3rd ed. Pensacola, FL 32414-5754, U.S.A.: Elsevier Inc, 2011.