

MODELIZACIÓN Y SIMULACIÓN DE UN COMPENSADOR ESTÁTICO SÍNCRONO PARA
SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

JAVIER RUIZ THORRENS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
2024

MODELIZACIÓN Y SIMULACIÓN DE UN COMPENSADOR ESTÁTICO SÍNCRONO PARA
SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

JAVIER RUIZ THORRENS

Trabajo de grado como requisito para optar al título de
MAGISTER EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Director
Omar Pinzón Ardila, PhD

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
2024

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mi madre y a mi hija por el tiempo que me regalaron de sus vidas para poder dedicarlo a la maestría. Igualmente estoy agradecido con mi maestro y director de tesis, el Doctor Ómar Pinzón Ardila por guiarme en estos temas complejos y apasionantes, los cuales explica con gran sencillez.

TABLA DE CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN	3
2 JUSTIFICACIÓN	4
3 OBJETIVOS	5
3.1 Objetivo General	5
3.2 Objetivos específicos	5
4 CONVERTIDORES DE CC A CA	6
4.1 Compensadores VAR estáticos	6
4.1.1 Configuraciones básicas	6
4.1.2 Convertidores de conmutación con elementos de almacenamiento mínimo de energía	7
4.2 El convertidor fuente voltaje - VSC	8
4.3 Fasores espaciales	10
4.3.1 Definición	11
5 EL COMPENSADOR ESTÁTICO SÍNCRONO DE DISTRIBUCIÓN - D-STATCOM	13
5.1 Operación y estructura del compensador	13
5.1.1 Principio de operación	13
5.1.2 El inversor o VSC	14
5.1.3 Estructura del D-STATCOM	15
5.2 Modelización del VSC	17
5.3 Modelo dinámico para control de tensión en el PCC	20
5.3.1 Dinámica del voltaje del PCC a gran señal	20
5.3.2 Dinámica del voltaje del PCC en pequeña señal	22
6 CONTROL DEL D-STATCOM	26
6.1 Diseño del sistema de control del D-STATCOM del VSC	26
6.2 Diseño del sistema de control del D-STATCOM para el PCC	28
6.3 Diseño del sistema de control del D-STATCOM para la tensión en el bus CC	30
6.4 Determinación de ganancias para los compensadores k_d y k_q en el control modo corriente del VSC	31
7 SIMULACIÓN DEL D-STATCOM	35
7.1 Diagramas de bloques en Simulink de Matlab	35
7.1.1 Diagrama trifilar del SEP	35
7.1.2 Bloques de conversión del marco de referencia abc a dq	36
7.1.3 Bloques de control modo corriente del VSC en el marco de referencia dq	37
7.1.4 Subsistema de generación de señales PWM y puente trifásico de IGBT's	39

	III
7.2 Simulación del D-STATCOM conectado al SEP	40
7.2.1 Simulación del D-STATCOM con fuente externa de tensión DC	41
7.2.1.1 Determinación del ángulo ωt del SEP	42
7.2.1.2 Generación de señales m_d y m_q	43
7.2.1.3 Generación tensión PWM para un transistor IGBT	44
7.2.2 Simulación del D-STATCOM sin fuente externa de tensión DC	48
7.2.2.1 Control de la tensión del bus DC	49
7.2.2.2 Control de la tensión del PCC	54
8 ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS	58
8.1 Bloques de control con fuentes de voltaje controladas	58
8.2 Modelo simplificado del D-STATCOM	58
8.3 Comparación de respuestas de los modelos de D-STATCOM	60
8.4 Análisis de respuesta transitoria y estacionaria	63
8.5 Índices de desempeño	64
8.6 Error medio cuadrático	65
9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	67
9.1 CONCLUSIONES	67
9.2 RECOMENDACIONES	68
Referencias	69

LISTA DE TABLAS

7.1	Valores de parámetros usados en la simulación de Simulink	38
7.2	Parámetros para el cálculo de $V_{DC_setpoint}$	49
7.3	Ganancias compensador del voltaje bus DC	52
7.4	Ganancias compensador de la tensión AC	55
8.1	Registros tiempo de retardo y tiempo de asentamiento. Fuente: Elaboración propia.	63
8.2	Indices de desempeño del error. Fuente:(Castaño Giraldo, 2021)	64
8.3	Tabla de índices de error de los lazos de control los ejes k_d y k_q	65
8.4	Valores calculados de RMSE	66

LISTA DE FIGURAS

4.1 Inversor de modo conmutado en un motor de CA. Fuente: (Mohan, Undeland, y Robbins, 2003)	6
4.2 Control VAR instantáneo. Fuente: (Mohan y cols., 2003)	7
4.3 Convertidor Fuente Voltaje. Fuente: (Iravani y Yazdani, 2010, pag 24)	8
4.4 Control VSC medio puente. Fuente: (Iravani y Yazdani, 2010, pag 50)	10
4.5 Ecuación (4.8) conversión de f_{abc} a \vec{f} . Fuente: (Iravani y Yazdani, 2010, pag 72) . .	12
4.6 Ecuación (4.18) conversión de $f_{\alpha\beta}$ a f_{dq} . Fuente: Elaboración propia.	12
5.1 Principio de operación del D-STATCOM. Fuente: (Samruddhi Shaha Parimal Borse, 2014)	13
5.2 Puente de IGBT's del VSC. Fuente: (Iravani y Yazdani, 2010)	14
5.3 Diagrama de bloques del D-STATCOM o (sistema VSC) y el SEP (sistema AC). Fuente: (Iravani y Yazdani, 2010)	15
5.4 Estructura del D-STATCOM. Fuente: (Iravani y Yazdani, 2010, pag 314)	16
5.5 Compensador con sistema AC sin carga. Fuente: (Iravani y Yazdani, 2010)	17
6.1 Diagrama de bloques ecuaciones (6.3) y (6.4). Fuente: Elaboración propia	26
6.2 Diagrama de bloques ecuaciones (6.3) y (6.4) en el marco de referencia dq y VSC. Fuente: Elaboración propia.	27
6.3 Diagrama de bloques del D-STATCOM de control en modo corriente. Fuente: (Iravani y Yazdani, 2010, pag 220)	28
6.4 Lazo de Control del PCC. Fuente: (Iravani y Yazdani, 2010, pag 320)	29
6.5 Lazo completo de control de la tensión del PCC. Fuente: (Iravani y Yazdani, 2010, pag 320)	30
6.6 Control del bus de CC. Fuente: Elaboración propia.	31
6.7 Bloques simplificados de lazos de control desacoplados en ejes d y q . Fuente: (Giroux, Sybille, y Le-Huy, 2001, pag. 221)	32
7.1 Diagrama de bloques en Simulink del D-STATCOM y el SEP. Fuente: Elaboración propia.	35
7.2 Bloques de conversión de mediciones de tensiones V_{source} y V_{Load} del marco de referencia abc al marco de referencia dq . Fuente: Elaboración propia.	36
7.3 Bloque de toma de ángulo ωt de la tensión del PCC. Fuente: Elaboración propia. .	37
7.4 Bloques conversión de mediciones de corrientes I_{source} , I_{Load} y I_{vsc_PCC} . Fuente: Elaboración propia.	37
7.5 Bloques en Simulink de control en modo corriente en el marco de referencia dq . Fuente: Elaboración propia.	39
7.6 Bloque de generación de señales PWM. Fuente: Elaboración propia.	40
7.7 Puente trifásico de IGBT's. Fuente: Elaboración propia.	40

	VI
7.8 VSC con fuente de tensión DC externa. Fuente: Elaboración propia.	42
7.9 Valor instantáneo del ángulo ωt . Fuente: Elaboración propia.	42
7.10 Generación de señales de modulación en dq y abc del D-STATCOM. Fuente: Elaboración propia.	43
7.11 Detalle de generación de señales de modulación en dq y abc del D-STATCOM. Fuente: Elaboración propia.	44
7.12 Señal portadora de 10kHz, moduladora m_a y PWM1. Fuente: Elaboración propia.	44
7.13 Vista más detallada de señal portadora de 10kHz, moduladora m_a y PWM1. Fuente: Elaboración propia.	45
7.14 Tensiones trifásicas de la fuente, carga y D-STATCOM. Fuente: Elaboración propia.	45
7.15 Comparación corrientes I_D e I_Q con su respectivo set-point. Fuente: Elaboración propia.	46
7.16 Acercamiento de comparación corrientes I_D e I_Q con su respectivo set-point. Fuente: Elaboración propia.	46
7.17 Potencia activa fuente, carga y D-STATCOM. Fuente: Elaboración propia.	47
7.18 Potencia reactiva fuente, carga y D-STATCOM. Fuente: Elaboración propia.	48
7.19 Diagrama de bloques con control del voltaje del bus DC. Fuente: Elaboración propia.	49
7.20 Diagrama de bloque control bus DC. Fuente: (Iravani y Yazdani, 2010, pag 237).	50
7.21 Diagrama de Bode en lazo abierto del eje D . Fuente: Elaboración propia.	51
7.22 Diagrama de bloques control bus DC en Simulink. Fuente: Elaboración propia.	51
7.23 Cálculo parámetros compensador voltaje bus DC con PID Turner de Simulink. Fuente: Elaboración propia.	51
7.24 Voltaje del bus DC. Fuente: Elaboración propia.	52
7.25 Potencia activa fuente, carga y D-STATCOM con control del bus DC. Fuente: Elaboración propia.	53
7.26 Potencia reactiva fuente, carga y D-STATCOM con control del bus DC. Fuente: Elaboración propia.	53
7.27 Diagrama completo del control modo corriente del D-STATCOM. Fuente: Elaboración propia	54
7.28 Comparación de tensión $VD_{setpoint}$ y VD_{PCC} controlada por el D-STATCOM. Fuente: Elaboración propia.	55
7.29 Tensiones abc fuente, carga y D-STATCOM. Fuente: Elaboración propia.	56
7.30 Potencia activa de la fuente, carga y D-STATCOM. Fuente: Elaboración propia.	56
7.31 Potencia reactiva de la fuente, carga y D-STATCOM. Fuente: Elaboración propia.	57
7.32 Voltaje del bus DC con transitorio en 0.2 s con control de la tensión PCC. Fuente: Elaboración propia.	57
8.1 Diagrama de bloques del SEP y el D-STATCOM con fuentes de voltaje controladas. Fuente: Elaboración propia.	59

8.2	Diagrama de bloques del D-STATCOM con control de las fuentes de voltaje dependientes. Fuente: Elaboración propia.	60
8.3	Comparación de respuestas VD_PCC con curvas superpuestas. Fuente: Elaboración propia.	61
8.4	Comparación de respuestas VD_PCC. Fuente: Elaboración propia.	61
8.5	Comparación de respuestas VD_PCC . Fuente: Elaboración propia.	62
8.6	Comparación de respuestas VD_PCC , acercamiento. Fuente: Elaboración propia.	62
8.7	Comparación tiempo de retardo t_d . Fuente: Elaboración propia.	63
8.8	Comparación tiempo de asentamiento t_s . Fuente: Elaboración propia.	64

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: Modelización y simulación de un compensador estático síncrono para sistemas de distribución de energía eléctrica

AUTOR(ES): Javier Ruiz Thorrens

PROGRAMA: Maestría en Ingeniería Electrónica

DIRECTOR(A): Omar Pinzón Ardila

RESUMEN

En esta Tesis se aborda la modelización y simulación de un DSTATCOM (Compensador Estático Síncrono de Distribución) en conexión paralelo para compensar un sistema eléctrico de potencia. La simulación en el software seleccionado determinará el desempeño, la estabilidad, la corrección del factor de potencia y la regulación de voltaje en sistemas de distribución trifásicos. El comportamiento del DSTATCOM será probado en simulación ante diferentes condiciones que afectan la calidad de la energía del sistema.

PALABRAS CLAVE:

VSC, PWM, D-STATCOM, potencia reactiva, potencia activa, PCC

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: Modeling and simulation of a static synchronous compensator for power distribution systems

AUTHOR(S): Javier Ruiz Thorrens

FACULTY: Maestría en Ingeniería Electrónica

DIRECTOR: Omar Pinzón Ardila

ABSTRACT

This Thesis deals with the modeling and simulation of a DSTATCOM (Distribution Synchronous Static Synchronous Compensator) in parallel connection to compensate an electrical power system. The simulation in the selected software will determine the performance, stability, power factor correction and voltage regulation in three-phase distribution systems. The behavior of the DSTATCOM will be tested in simulation under different conditions that affect the power quality of the system.

KEYWORDS:

VSC, PWM, D-STATCOM, reactive power, active power, PCC.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

1. INTRODUCCIÓN

En la industria, en el comercio y residencias son muchos los equipos eléctricos y electrónicos que contienen inductancias y capacitancias, como son los motores eléctricos, transformadores, inductancias en fuentes electrónicas, entre otras (Zhang y cols., 2015). Lo anterior genera que los sistemas eléctricos de potencia, deban proporcionar no sólo energía útil como lo es el caso de la potencia activa, sino que deban aportar más potencia reactiva, generando una disminución en la transmisión de energía útil. Por otro lado, es importante destacar que en la conexión y desconexión de los dispositivos electrónicos y cargas no lineales se producen “perturbaciones” en los sistemas eléctricos que también desmejoran la forma de la onda sinusoidal tanto en tensión como en corriente (Khetarpal y Tripathi, 2020).

Para dar solución a lo anterior, ha requerido la aplicación de sistemas de compensación basado en electrónica de potencia. Estos sistemas comenzaron a ser implementados desde los años 1970 (Shinde y Pulavarthi, 2017) cuando se dio lugar a la introducción al mercado del tiristor creado por *General Electric* y al mismo tiempo el transistor de puerta aislada IGBT por *Mitsubishi Electric*. Posteriormente se desarrollaron diferentes dispositivos en electrónica de potencia como es el caso del Compensador Estático Síncrono (STATCOM) (Jing y Maklakov, 2018).

El D-STATCOM es un dispositivo *Flexible AC Transmission System* FACTS, siendo este una aplicación del STATCOM en Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) y que ahora se utiliza en redes de distribución, cuyo propósito es compensar la potencia reactiva buscando mantener regulada la tensión de la red a la cual este conectado. Este dispositivo puede inyectar corrientes tanto en atraso como en adelanto independiente de la tensión del sistema eléctrico (Hingoranl, Gyugyi, y El-Hawary, 1999).

En la presente tesis se plantea un SEP básico, compuesto por una fuente trifásica, una carga inductiva y el compensador estático. La aplicación de las leyes de voltaje y corriente de Kirchhoff, permiten la determinación de las ecuaciones dinámicas del sistema. Las tensiones del sistema trifásico serán transformadas a un fasor espacial (Stepina, 1995). Este fasor espacial es descompuesto en su proyección en el eje real (eje D) y eje imaginario (eje Q), cuyas componentes tienen un comportamiento constante en este marco de referencia siempre y cuando el sistema trifásico sea balanceado. Esto simplificará el sistema de control permitiendo la utilización de compensadores proporcional integral (**PI**). Una vez establecidas las ecuaciones dinámicas se construirán los bloques que las representan, para implementarlas en el entorno diagrama de bloque de *Simulink* de *Matlab*. En *Simulink* se simularán los bloques construidos para luego obtener los datos a analizar y validar el comportamiento del compensador conectado a Punto Común de Conexión (PCC) del SEP.

2. JUSTIFICACIÓN

Esta tesis se centra en un dispositivo FACTS (Flexible AC Transmission System), específicamente el equipo conocido en la industria como D-STATCOM del inglés Distribution Static Synchronous Compensator. En (Edris y cols., 1997) se definen los D-STATCOM como *dispositivos aplicados a sistemas de distribución de corriente alterna que incorporan controladores basados en electrónica de potencia y otros controladores estáticos para mejorar la controlabilidad y aumentar la capacidad de transferencia de potencia.*

Dispositivos como el D-STATCOM en la actualidad ofrecen varios beneficios como de proporcionar estabilidad al sistema de distribución de energía eléctrica, mejorar la confiabilidad, ofrecer mayor seguridad a los sistemas eléctricos de potencia (Paserba, 2004), reducir pérdidas económicas, e igualmente disminuir pérdidas de energía en las redes de transporte y distribución (Jiménez, Serebrisky, y Mercado, 2014).

El propósito fundamental del presente trabajo de grado es prever el comportamiento del D-STATCOM mediante simulaciones llevadas a cabo en la plataforma de cálculo numérico denominada Matlab. Para lograr este objetivo, resulta esencial desarrollar un modelo matemático tanto del D-STATCOM como del SEP, fundamentado en principios físicos, con el fin de su integración en bloques en la plataforma de cálculo numérico. Posteriormente, se llevará a cabo un análisis detallado de las diversas gráficas generadas, que representan el comportamiento de las diferentes variables físicas involucradas en el sistema.

La modelización matemática del D-STATCOM permite probar diferentes algoritmos de control comparando su rendimiento, con la posibilidad de implementarlo en hardware en un laboratorio. Esto permitirá desde la UPB impactar al foco estratégico de energía, dado que al contar con mayor información sobre estos dispositivos y posteriores desarrollos, facilitará su implementación ya sea a nivel local como a nivel nacional, impactando en la reducción de las pérdidas técnicas en las redes de distribución y mejorando los indicadores característicos de una buena calidad de la energía en estos (Douglas y cols., 2005).

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

Modelizar y simular un compensador estático síncrono para su aplicación en sistemas de distribución de energía eléctrica.

3.2. Objetivos específicos

- Modelizar matemáticamente un compensador estático síncrono.
- Diseñar el sistema de control de un compensador estático síncrono.
- Controlar un sistema básico de potencia utilizando la compensación estática de un D-STATCOM.
- Analizar el desempeño del compensador al conectarse a un sistema de potencia.
- Validar los resultados proporcionados por las simulaciones mediante el contraste con los resultados teóricos.

4. CONVERTIDORES DE CC A CA

El convertidor de Corriente Continua (CC) a Corriente Alterna (CA), también llamado Inversor, es un circuito encargado de tomar una tensión de CC y convertirla en una tensión de CA con frecuencia y amplitud controladas por el usuario. El voltaje de CC se obtiene mediante la rectificación y filtrado de la tensión de línea, generalmente utilizando circuitos con diodos rectificadores y obtener una tensión de CA se utilizan elementos de conmutación como transistores de potencia, por ejemplo los IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), obteniéndose así una salida con tensión y frecuencia deseada, aplicando técnicas como PWM (Pulse-Width Modulation) o similares.

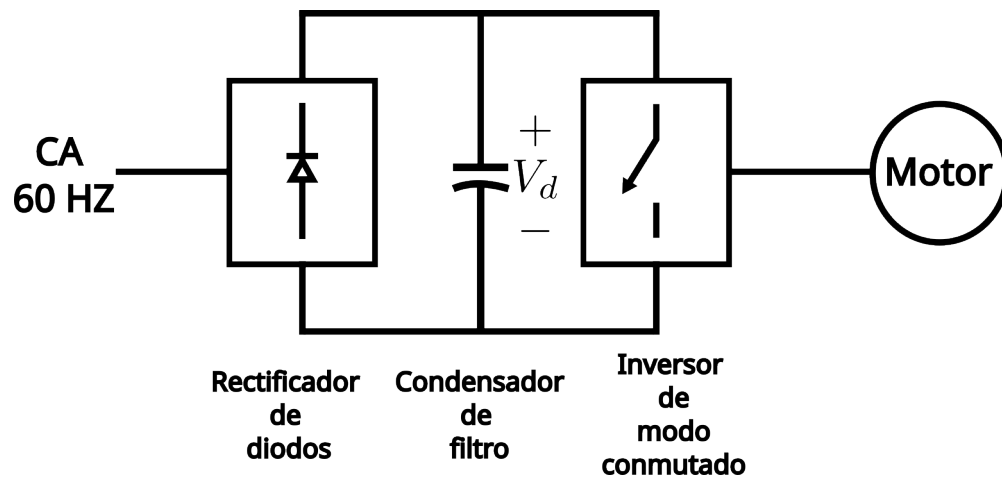


Figura 4.1. Inversor de modo conmutado en un motor de CA. Fuente: (Mohan y cols., 2003)

4.1. Compensadores VAR estáticos

Los compensadores VAR estáticos, como su nombre lo indica, son dispositivos convertidores de CA a CC, sin partes móviles que tienen la capacidad de igualar o compensar potencia reactiva en un sistema eléctrico.

4.1.1. Configuraciones básicas

Se conocen tres tipos de compensadores VAR estáticos según (Mohan y cols., 2003):

1. Inductores Controlados por Tiristores (TCI)
2. Condensadores Conmutados por Tiristores (TCS)
3. Convertidores de conmutación con elementos de almacenamiento mínimo de energía

En la presente tesis se tratará el último tipo de compensador estático.

4.1.2. Convertidores de conmutación con elementos de almacenamiento mínimo de energía

Los convertidores de conmutación están compuestos por un circuito rectificador y un inversor o también llamado VSC. Este en el lado de CC solo tiene el condensador con una capacidad de almacenamiento mínimo, pero del valor suficiente como para controlar su nivel de tensión.

En el lado CC no se requiere fuente de alimentación externa, ya que hay intercambio de potencia activa, sin embargo el circuito debe tomar de la red eléctrica una pequeña cantidad de potencia activa para compensar sus pérdidas tanto en los transistores de potencia como en la caída de tensión del condensador. Es indispensable que el condensador mantenga constante su nivel de tensión, para que el circuito funcione correctamente y compense potencia reactiva.

En el circuito de la figura 4.2 se muestra un inversor conectado al sistema de CA a través de una bobina de acoplamiento por cada fase. En este equipo se realiza la medición de las tensiones de cada fase y sus respectivas corrientes. Los valores de estas mediciones se llevan al controlador de modo corriente que según la potencia reactiva deseada, genera las señales de control de los interruptores. Las corrientes tendrán la amplitud y fase deseadas según la consigna de flujo de potencia reactiva que se quiera aportar o absorber del sistema de CA.

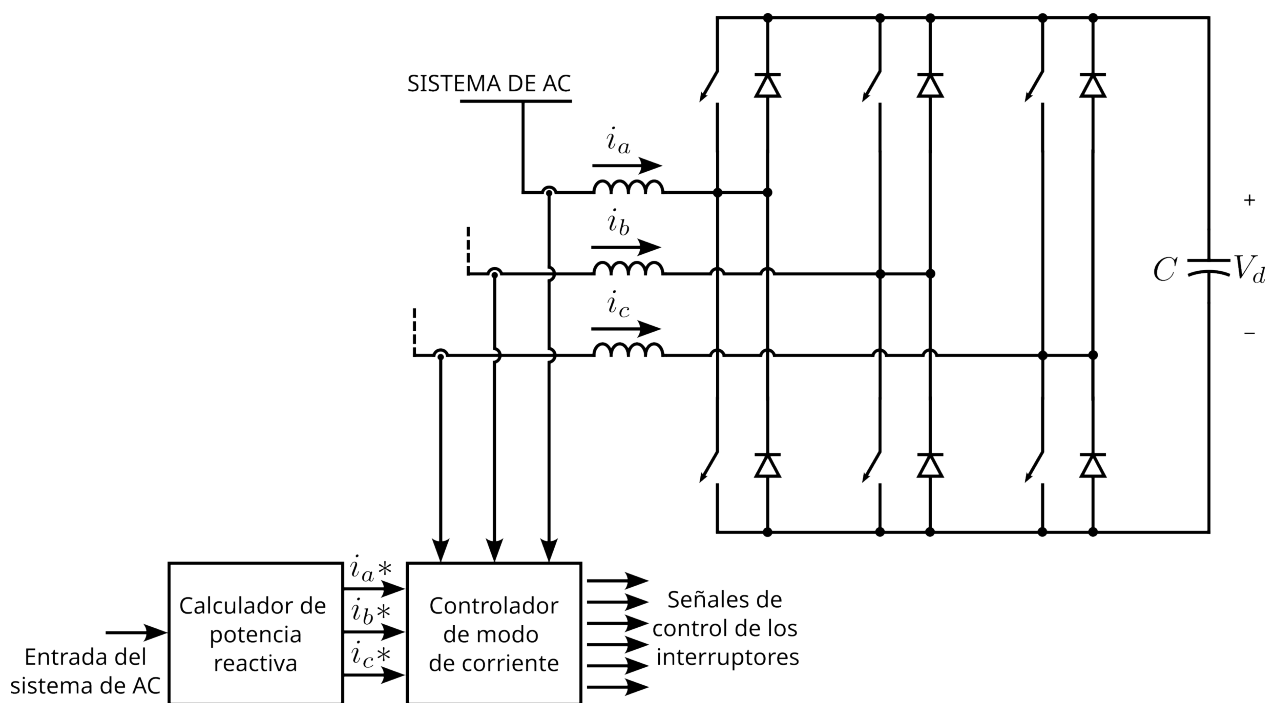


Figura 4.2. Control VAR instantáneo. Fuente: (Mohan y cols., 2003)

En este trabajo se busca que el compensador inyecte al sistema una corriente en adelanto con amplitud deseada, controlando la tensión en punto de conexión del sistema CA con la carga.

4.2. El convertidor fuente voltaje - VSC

El convertidor fuente voltaje VSC es el mismo inversor indicado en la sección 4.1. Inicialmente se revisará la topología tipo puente medio o por fase, para comprender su funcionamiento y posteriormente se ampliará a otra con tres ramas conformando un VSC trifásico como el que se utilizará en la presente tesis.

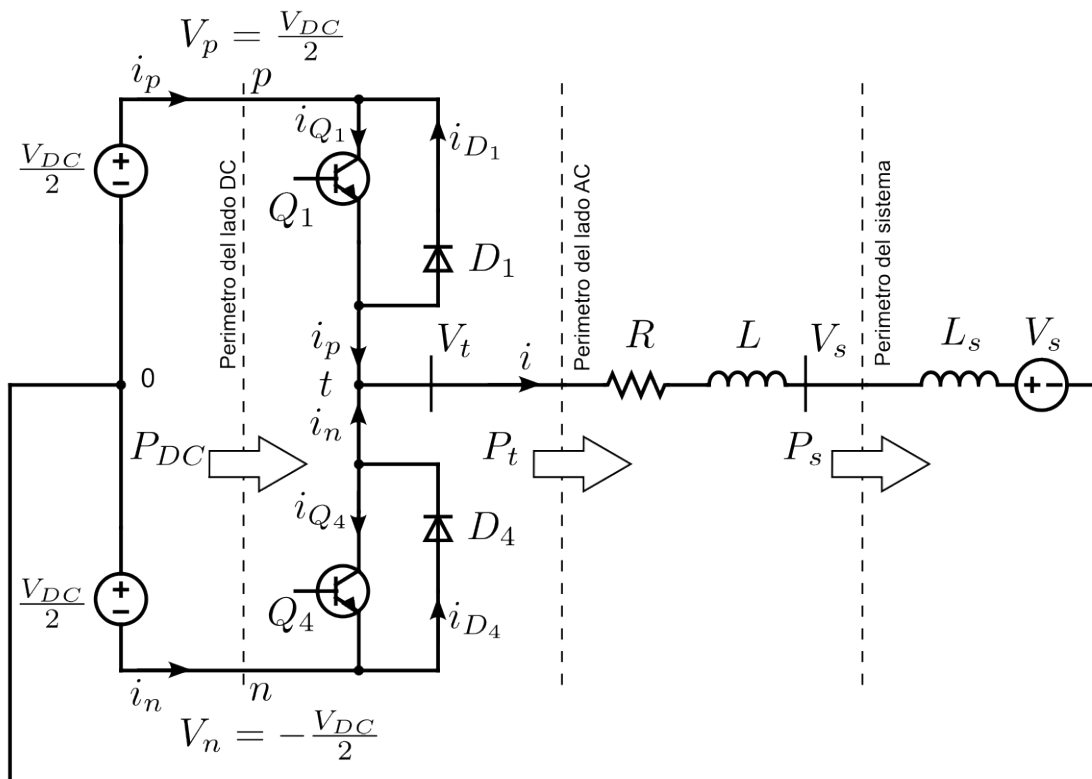


Figura 4.3. Convertidor Fuente Voltaje. Fuente: (Iravani y Yazdani, 2010, pag 24)

En la figura 4.3 se muestra un inversor o VSC conectado a un sistema de CA a través de un arreglo RL . El valor R es la resistencia interna del inductor de fuga o también llamado inductor de acoplamiento o inductor de enlace.

Del lado de CC se representan dos fuentes de voltaje CC (V_{DC}) con valor $V_{DC}/2$. El propósito de esta división en dos fuentes, es que el punto medio se convierta en el nodo de referencia del sistema. El VSC permite el intercambio de potencia del lado de CC al lado de CA, convirtiendo la tensión CC en tensión con modulación PWM. El voltaje en el terminal del VSC llamado V_t dependerá del valor de la modulación (m), cuyo valor podrá estar entre -1 y 1 y la magnitud de la tensión de CC representado por V_{DC} .

Autores como (Iravani y Yazdani, 2010), (Madhusudan y Rao, 2012), (Singh y Dahiya, 2018), (Anaya-Lara, Campos-Gaona, Moreno-Goytia, y Adam, 2014) y otros, enuncian que el

voltaje en el terminal del VSC (V_t) con topología de dos niveles es:

$$V_t = \frac{V_{DC}}{2} * m \quad (4.1)$$

V_t Tensión en los terminales
 V_{DC} Tensión del bus CC
 m Modulación

Note que en la figura 4.3 no hay carga conectada y solo esta presente el VSC y el sistema de CA. Para la modelización de este circuito se aplica ley de voltajes de Kirchhoff como se muestra a continuación:

$$Ri + r_{on}i + L\frac{di}{dt} + V_s - V_t = 0 \quad (4.2)$$

reescribiendo la ecuación (4.2) se tiene

$$L\frac{di}{dt} + i(R + r_{on}) = V_t - V_s \quad (4.3)$$

Dado que el sistema es lineal, se puede reescribir la ecuación (4.3) en el dominio de la frecuencia o plano s . Sustituyendo la ecuación (4.1) en (4.3) se obtiene la ecuación (4.4)

$$Ls + i(R + r_{on}) = m \frac{V_{DC}}{2} - V_s \quad (4.4)$$

y con base en la ecuación (4.4), es posible construir el modelo en bloques para su posterior utilización en la simulación. La figura 4.4 muestra la representación en bloques que se emplearan en el VSC trifásico.

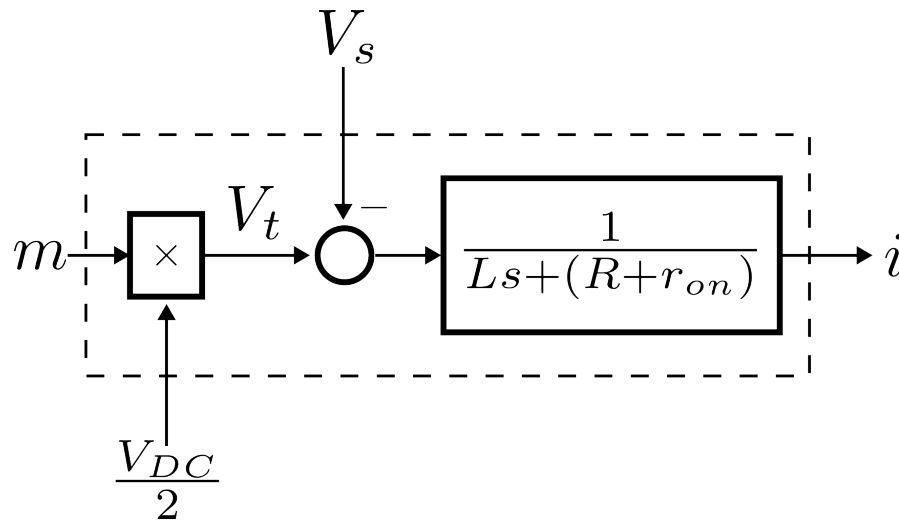


Figura 4.4. Control VSC medio puente. Fuente: (Iravani y Yazdani, 2010, pag 50)

4.3. Fasores espaciales

El *fasor* o *phasor* en inglés, se define como una *representación compleja de formas de ondas sinusoidales puras* (Shafiullah, Abido, y Al-Mohammed, 2022).

El profesor Jaroslav Stepina en su artículo *"Space-phasor theory? - what is that for?"* (Stepina, 1995) comenta acerca de la importancia de la aplicación del método de fasores espaciales desarrollada desde muchos años atrás de la publicación de su artículo y trata de darle un sentido más profundo a este método en su exposición del tema.

Igualmente (Iravani y Yazdani, 2010, pag 69) dedica el capítulo 4 de su libro *"Voltage-Source Converters in Power Systems: Modeling, Control, and Applications"* a la explicación de este método en los marcos de referencia de dos ejes $\alpha\beta$ y dq . Los autores (O'Rourke, Qasim, Overlin, y Kirtley, 2019) muestran la interpretación geométrica de las transformadas de Park y Clark que coinciden con el método de fasor espacial y los autores (Marlés y cols., 2005) resaltan la importancia de este método para la física y su aplicación en máquinas eléctricas.

En esta sección se darán a conocer las definiciones del fasor espacial presentadas por los anteriores autores mencionados anteriormente, las cuales serán indispensables en la modelización y control del marco de referencia dq .

4.3.1. Definición

Considere el siguiente sistema trifásico balanceado (Iravani y Yazdani, 2010, pag 70)

$$f_a(t) = \hat{f} \cos(\omega t + \theta_0) \quad (4.5)$$

$$f_b(t) = \hat{f} \cos\left(\omega t + \theta_0 - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (4.6)$$

$$f_c(t) = \hat{f} \cos\left(\omega t + \theta_0 - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (4.7)$$

\hat{f} : Amplitud

θ_0 : Angulo inicial

ω : Frecuencia angular

El fasor espacial para la función f se define como:

$$\vec{f}(t) = \frac{2}{3} [e^{j0} f_a(t) + e^{j\frac{2\pi}{3}} f_b(t) + e^{j\frac{4\pi}{3}} f_c(t)] \quad (4.8)$$

Sustituyendo las ecuaciones (4.5), (4.6) y (4.7) en la ecuación (4.8)

$$\vec{f} = \frac{2}{3} \left[e^{j0} \hat{f} \cos(\omega t + \theta_0) + e^{j\frac{2\pi}{3}} \hat{f} \cos\left(\omega t + \theta_0 - \frac{2\pi}{3}\right) + e^{j\frac{4\pi}{3}} \hat{f} \cos\left(\omega t + \theta_0 - \frac{4\pi}{3}\right) \right] \quad (4.9)$$

utilizando la identidad trigonométrica de Euler

$$\cos\theta = \frac{1}{2}(e^{j\theta} + e^{-j\theta}) \quad (4.10)$$

$$\hat{f} \cos(\omega t + \theta_0) = \frac{1}{2} \hat{f} (e^{j\omega t + \theta_0} + e^{-(j\omega t + \theta_0)}) \quad (4.11)$$

$$\hat{f} \cos\left(\omega t + \theta_0 - \frac{2\pi}{3}\right) = \frac{1}{2} \hat{f} (e^{j\omega t + \theta_0 - \frac{2\pi}{3}} + e^{-(j\omega t + \theta_0 - \frac{2\pi}{3})}) \quad (4.12)$$

$$\hat{f} \cos\left(\omega t + \theta_0 - \frac{4\pi}{3}\right) = \frac{1}{2} \hat{f} (e^{j\omega t + \theta_0 - \frac{4\pi}{3}} + e^{-(j\omega t + \theta_0 - \frac{4\pi}{3})}) \quad (4.13)$$

y la equivalencia

$$e^{j0} + e^{j\frac{2\pi}{3}} + e^{j\frac{4\pi}{3}} \equiv 0 \quad (4.14)$$

Sustituyendo (4.11), (4.12), (4.13) y (4.14) en (4.9) se tiene:

$$\vec{f}(t) = (\hat{f} e^{j\theta_0}) e^{j\omega t} = \underline{f} e^{j\omega t} \quad (4.15)$$

donde

$$\underline{f} = \widehat{f} e^{j\theta_0} \quad (4.16)$$

es constante si \widehat{f} es constante en el tiempo

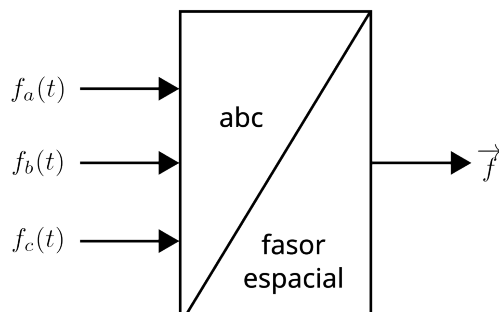


Figura 4.5. Ecuación (4.8) conversión de f_{abc} a \vec{f} . Fuente: (Iravani y Yazdani, 2010, pag 72)

se descompone a $\vec{f}(t)$ en su parte real e imaginaria se tendrán sus componentes en alfa y beta como se muestra en la ecuación (4.17), (O'Rourke y cols., 2019), (Iravani y Yazdani, 2010, pag 92).

$$\vec{f}(t) = \vec{f}_\alpha(t) + j\vec{f}_\beta(t) \quad (4.17)$$

Ahora, si $\vec{f}(t)$ se desfasa o se rota el marco de referencia $\alpha\beta$ en $-\varepsilon(t)$ (Iravani y Yazdani, 2010).

$$\vec{f}_d + j\vec{f}_q = (\vec{f}_\alpha + j\vec{f}_\beta) e^{-\varepsilon(t)} \quad (4.18)$$

Para la conversión al marco de referencia $dq0$ se utilizarán las ecuaciones (4.17) y (4.18).

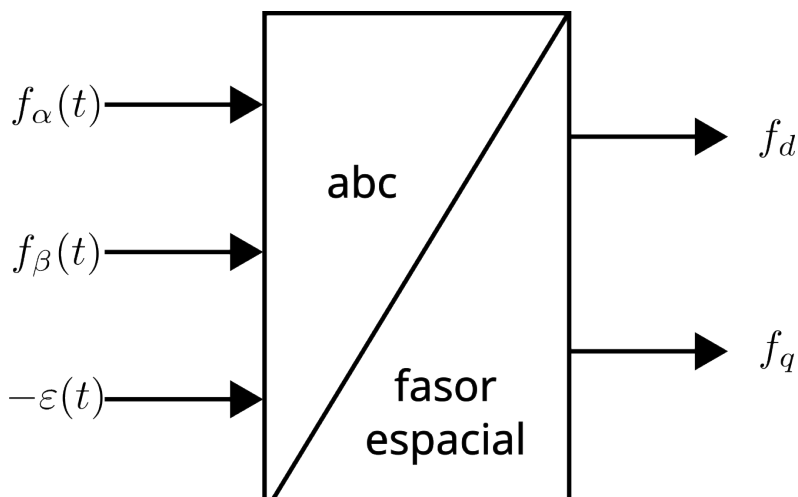


Figura 4.6. Ecuación (4.18) conversión de $f_{\alpha\beta}$ a f_{dq} . Fuente: Elaboración propia.

5. EL COMPENSADOR ESTÁTICO SÍNCRONO DE DISTRIBUCIÓN - D-STATCOM

5.1. Operación y estructura del compensador

El D-STATCOM es una aplicación particular del STATCOM para sistemas de distribución de energía eléctrica (Zaidi, Sunderland, y Conlon, 2019). Su función consiste en mantener los niveles de tensión en el PCC (*Point of common coupling* de sus siglas en inglés, Punto de acoplamiento común) (Giroux y cols., 2001, pag. 64), (Kerrouche y cols., 2020), (Iravani y Yazdani, 2010).

5.1.1. Principio de operación

El comportamiento del D-STATCOM es similar al de la máquina síncrona, pero sin partes móviles (Chapman, 2011), el cual una vez conectado al sistema de potencia SEP, aporta o consume potencia reactiva, aumentando o disminuyendo la tensión en sus bornes. El D-STATCOM está estructurado en dos partes; la primera llamada *nivel fuente* que lo compone el VSC con la electrónica de potencia y la otra parte llamada *nivel aplicación* que contiene el sistema de control como explica el autor (González, 2000).

Cuando el voltaje en los terminales del D-STATCOM es mayor al voltaje en el PCC, este aporta potencia reactiva y cuando el voltaje en los terminales del D-STATCOM es menor al voltaje del PCC este consume potencia reactiva (ver figura 5.1).

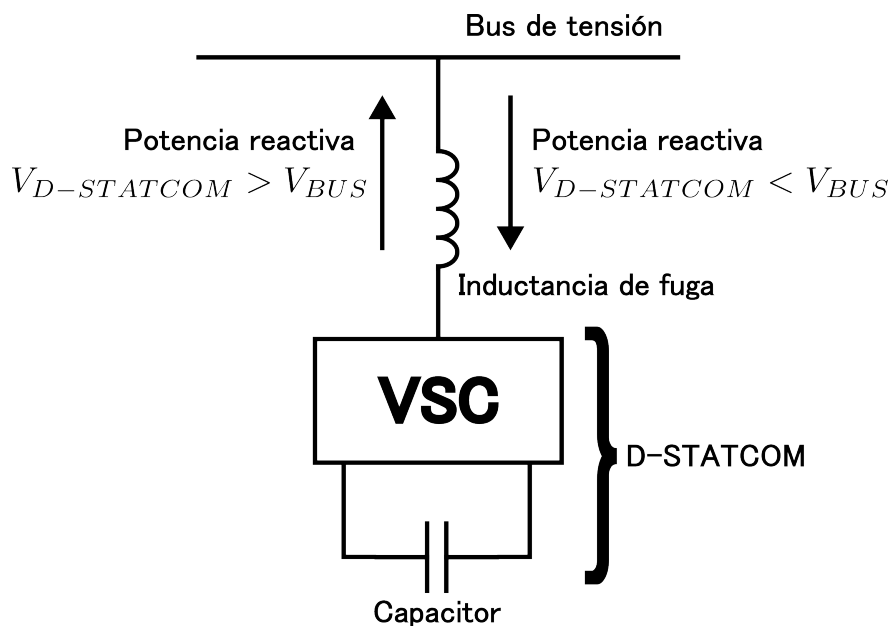


Figura 5.1. Principio de operación del D-STATCOM. Fuente: (Samruddhi Shaha Parimal Borse, 2014)

Cabe resaltar que en los SEP, los compensadores estáticos se conectan a través de transformadores de potencia y no directamente al bus de media o alta tensión (Farhad, Su-

medha, y Arindam, 2015, pag. 17). En la presente tesis con fines de hacer mas sencillo el modelo a simular se operará el compensador directamente conectado al SEP y con una tensión nominal será de 480 V en un sistema trifásico.

5.1.2. El inversor o VSC

El núcleo del D-STATCOM es el VSC, esta compuesto por un inversor completo trifásico de IGBT's (ver figura 5.2). En él se aplican señales generadas por el sistema de control para obtener corrientes a una frecuencia de 60 Hz, con amplitud y fase variable. La fase de las corrientes dependerá de cuanta potencia activa requiera consumir para compensar sus pérdidas internas, y la amplitud de la tensión en los terminales dependerá de cuanta potencia reactiva deba compensar el D-STATCOM.

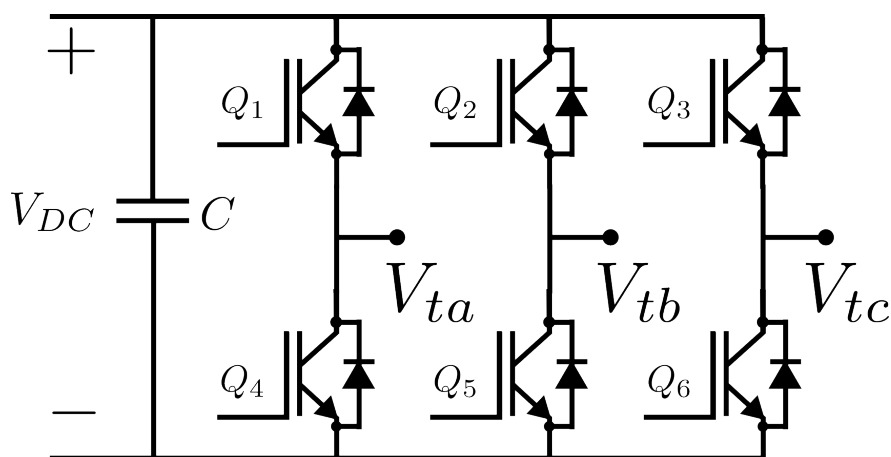


Figura 5.2. Puente de IGBT's del VSC. Fuente: (Iravani y Yazdani, 2010)

El D-STATCOM lo conforma el VSC un inversor trifásico de IGBT's, el bus de corriente directa donde esta conectado el condensador y el sistema de control con las señales m_a , m_b y m_c previamente calculadas y llevadas al VSC como se muestra en la figura 5.3 y se explicó en la sección 4.1. La conexión al PCC se realiza a través de una *inductancia de fuga* o *linkage inductor* como se denomina en la literatura.

Aunque el compensador sea un convertidor de CC a CA, en este equipo no hay fuente de tensión CC externa que le suministre potencia. El control se diseña para consumir del SEP una cantidad pequeña de potencia activa (pequeña comparada con la cantidad de potencia reactiva) para compensar sus pérdidas internas, representadas en la figura 5.3 como la fuente de corriente i_{loss} .

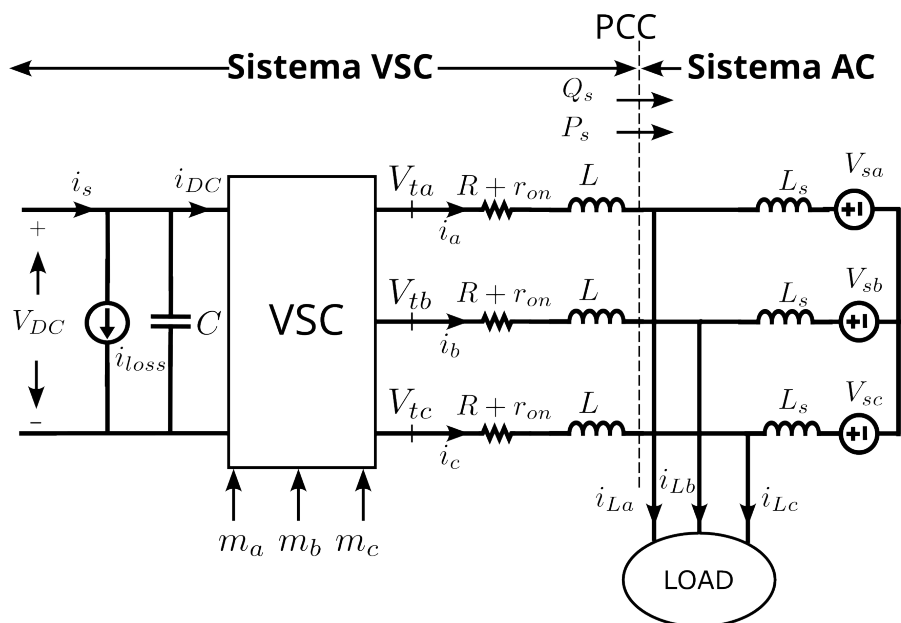


Figura 5.3. Diagrama de bloques del D-STATCOM o (sistema VSC) y el SEP (sistema AC).
Fuente: (Iravani y Yazdani, 2010)

5.1.3. Estructura del D-STATCOM

La modelización del D-STACOM iniciará con el conocimiento, comprensión y análisis de las partes que lo conforman. Además se plantearán las ecuaciones que describen su comportamiento de acuerdo a leyes físicas con las leyes de voltajes y de corrientes de Kirchhoff.

En la figura 5.4 se detallan los bloques que conforman el compensador. La línea a trazos en la figura encierra los componentes del D-STATCOM y son los siguientes:

- El VSC o inversor, alimentado por el bus CC con su condensador de capacitancia C .
- El Lazo de Seguimiento de Fase (Phase Locked Loop, PLL) se utiliza para leer la fase de la señal de alterna en el PCC y que obtener el ángulo ρ del sistema. En la presente se realiza la transformación a un sistema del marco de referencia abc a dq .
- Transformadores de corriente en cada línea y su conversión al sistema de referencia dq . Esta transformación requiere una variable de entrada, el ángulo ρ obtenido mediante un PLL para la conversión de la corriente al marco dq .
- Sistema de control con compensadores en el sistema de referencia dq . Estos compensadores se encargarán de mantener el valor de consigna de corriente seleccionado en el marco de referencia dq , para luego generar las señales de modulación m_d y m_q que se transformaran en m_a , m_b y m_c .
- Controlador de tensión del bus CC. Este medirá el voltaje del condensador y generará el punto de consigna de P para mantener la tensión en el bus consumiendo la potencia

activa necesaria.

- Generador de señales de referencia. Con base en la teoría pq o (también llamada teoría de la potencia instantánea) y teniendo como entrada la potencia activa y potencia reactiva que necesita el compensador y el sistema, calculando el valor correspondiente de la corriente i_d de referencia (i_{dref}) y la corriente i_q de referencia (i_{qref}) que son las representaciones en dq de las corrientes en abc deseadas para los compensadores en el sistema de referencia dq (Akagi, Watanabe, y Aredes, 2017).
- El generador de señal PWM mostrado en la figura 5.4, toma la modulación calculada por los compensadores en el sistema de referencia dq (m_d y m_q) posteriormente convierte al marco de referencia abc (m_a , m_b y m_c) que serán comparadas con una señal portadora de 10 kHz, la cual se determino de acuerdo al *índice de frecuencias*, el cual se define como la relación entre la frecuencia portadora y moduladora, cuyo valor debe ser mayor a 21 (Contreras, 2005).

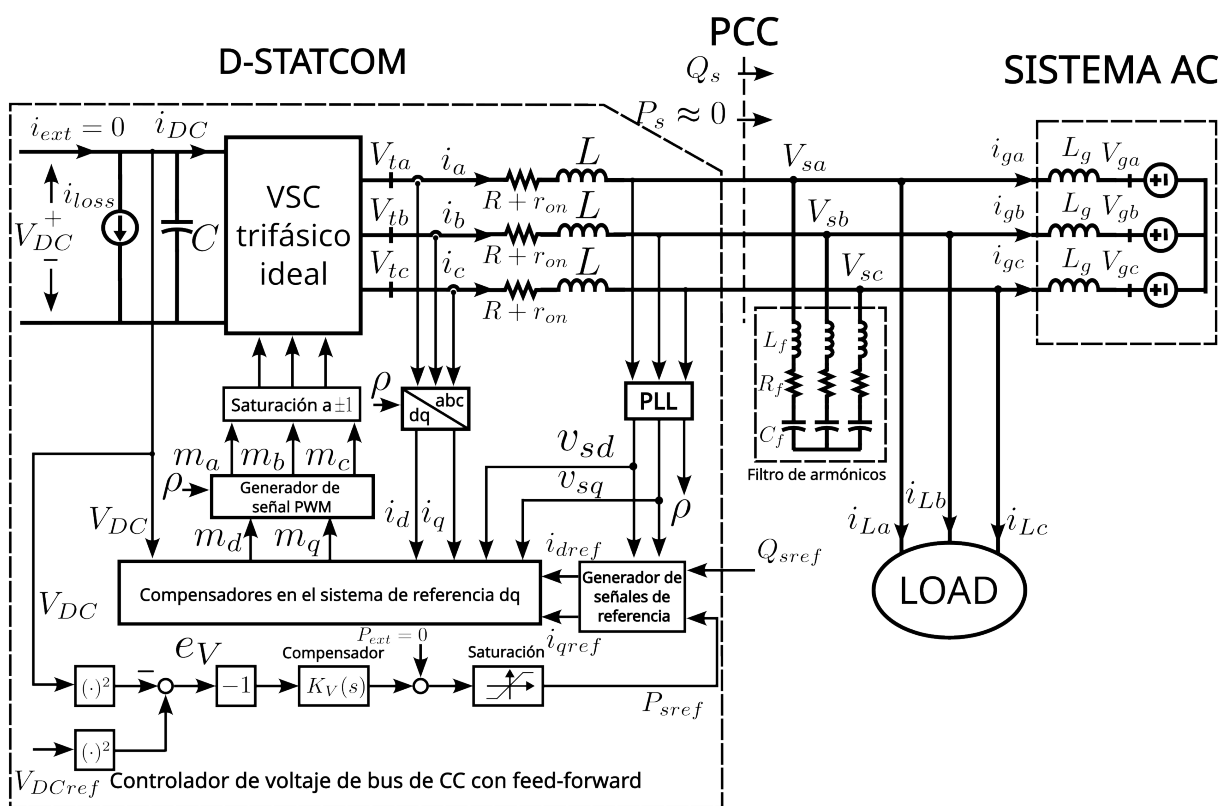


Figura 5.4. Estructura del D-STATCOM. Fuente: (Iravani y Yazdani, 2010, pag 314)

5.2. Modelización del VSC

Para llevar a cabo el control del D-STATCOM mostrado en la figura 5.4, cuyos elementos están encerrados por la línea a trazos, se requiere el modelo matemático del bloque VSC trifásico. Para simplificar la modelización inicialmente no se conecta al PCC la carga, utiliza lo que se muestra en la siguiente figura:

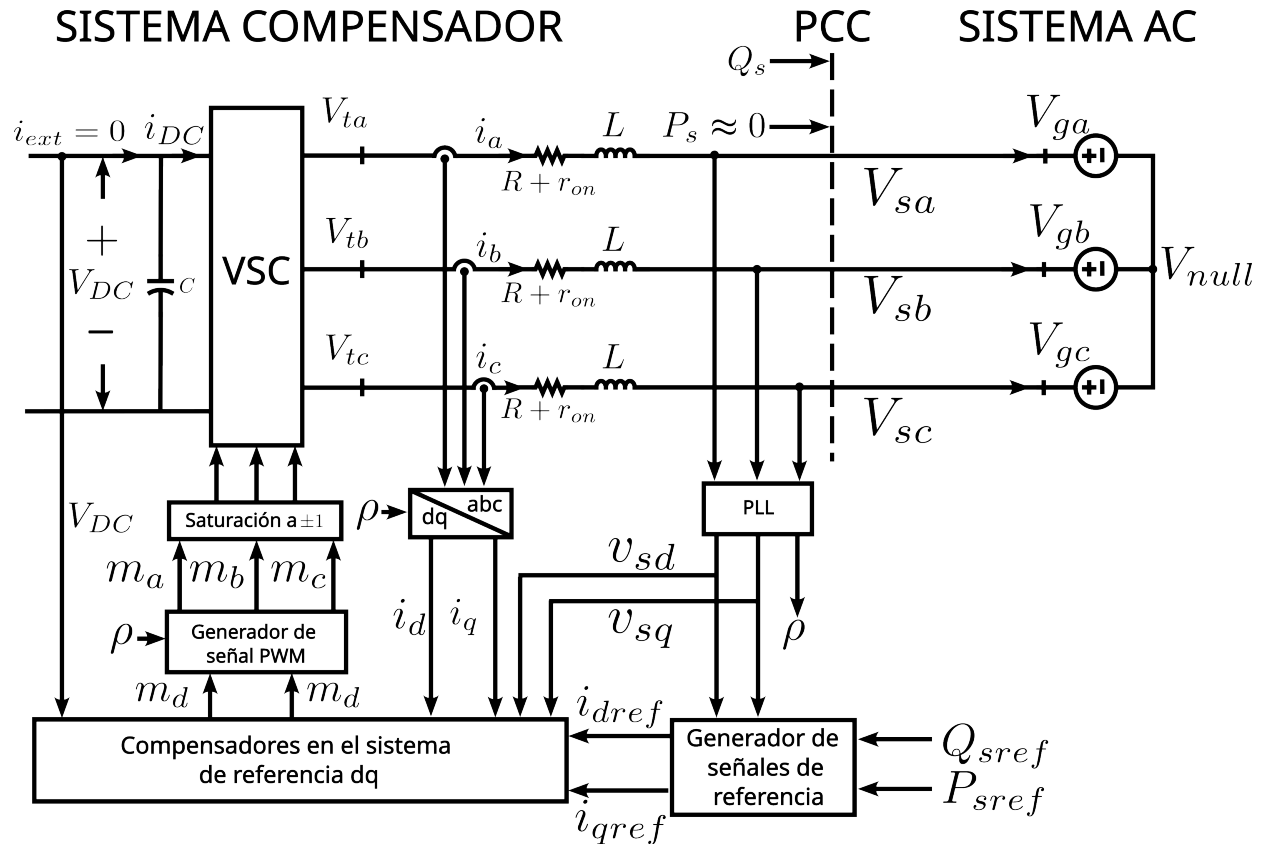


Figura 5.5. Compensador con sistema AC sin carga. Fuente: (Iravani y Yazdani, 2010)

Definiendo V_{sabc} como:

$$V_{sa} = \widehat{V}_s \cos(\omega_0 t + \theta_0) \quad (5.1)$$

$$V_{sb} = \widehat{V}_s \cos(\omega_0 t + \theta_0 - \frac{2\pi}{3}) \quad (5.2)$$

$$V_{sc} = \widehat{V}_s \cos(\omega_0 t + \theta_0 - \frac{4\pi}{3}) \quad (5.3)$$

Las expresiones en (5.1), (5.2) y (5.3) se pueden expresar como fasor espacial (ver ecuación (4.8)) de la siguiente manera:

$$\vec{V}_s = \widehat{V}_s e^{j(\omega_0 t + \theta_0)} \quad (5.4)$$

aplicando Leyes de Voltajes de Kirchhoff al PCC se obtiene:

$$L \frac{di_a}{dt} = -(R + r_{on})i_a + V_{ta} - V_{sa} \quad (5.5)$$

$$L \frac{di_b}{dt} = -(R + r_{on})i_b + V_{tb} - V_{sb} \quad (5.6)$$

$$L \frac{di_c}{dt} = -(R + r_{on})i_c + V_{tc} - V_{sc} \quad (5.7)$$

Aplicando la ecuación (4.8) de fasor espacial para (5.5), (5.6) y (5.7) se obtiene:

$$L \frac{d\vec{i}}{dt} = -(R + r_{on})\vec{i} + \vec{V}_t - \vec{V}_s \quad (5.8)$$

sustituyendo (5.4) en (5.8) se obtiene:

$$L \frac{d\vec{i}}{dt} = -(R + r_{on})\vec{i} + \vec{V}_t - \widehat{V}_s e^{j(\omega_0 t + \theta_0)} \quad (5.9)$$

empleando la ecuación (4.18) a \vec{i} y a \vec{V}_t obtenemos la tensión en componentes dq :

$$\vec{i} = i_{dq} e^{j\rho} \quad (5.10)$$

$$\vec{V}_t = V_{tdq} e^{j\rho} \quad (5.11)$$

sustituyendo (5.10) y (5.11) en (5.9) se obtiene:

$$L \frac{d}{dt}(i_{dq} e^{j\rho}) = -(R + r_{on})(i_{dq} e^{j\rho}) + V_{tdq} e^{j\rho} - \widehat{V}_s e^{j(\omega_0 t + \theta_0)} \quad (5.12)$$

De la ecuación (5.12) i_{dq} y V_{tdq} se componen de una parte real y otra parte imaginaria de la siguiente manera:

$$f_{dq} = f_d + j f_q \quad (5.13)$$

siendo:

$$i_{dq} = i_d + j i_q \quad (5.14)$$

$$V_{tdq} = V_{td} + j V_{tq} \quad (5.15)$$

y utilizando la fórmula de Euler

$$e^{j\theta} = \cos\theta + j \sin\theta \quad (5.16)$$

sustituyendo (5.14) y (5.15) en la ecuación (5.12)

$$L \frac{d}{dt}((i_d + j i_q) e^{j\rho}) = -(R + r_{on})((i_d + j i_q) e^{j\rho}) + (V_{td} + j V_{tq}) e^{j\rho} - \widehat{V}_s e^{j(\omega_0 t + \theta_0)} \quad (5.17)$$

derivando el término izquierdo de la ecuación (5.17)

$$L \frac{d}{dt}((i_d + ji_q)e^{j\rho}) = \frac{d}{dt}(i_d + ji_q)e^{j\rho} + (i_d + ji_q) \frac{d}{dt}e^{j\rho} \quad (5.18)$$

$$L \frac{d}{dt}((i_d + ji_q)e^{j\rho}) = \frac{d}{dt}(i_d + ji_q)e^{j\rho} + (i_d + ji_q)e^{j\rho} j \frac{d\rho}{dt} \quad (5.19)$$

Sustituyendo (5.19) en el lado izquierdo de la ecuación (5.17)

$$\frac{d}{dt}(i_d + ji_q)e^{j\rho} + (i_d + ji_q)e^{j\rho} j \frac{d\rho}{dt} = -(R + r_{on})(i_d + ji_q)e^{j\rho} + (V_{td} + jV_{tq})e^{j\rho} - \widehat{V}_s e^{j(\omega_0 t + \theta_0)} \quad (5.20)$$

Eliminando de la ecuación (5.20) el termino $e^{j\rho}$, multiplicando ambos lados de la ecuación por el termino $e^{-j\rho}$

$$\frac{d}{dt}(i_d + ji_q)e^{j\rho}e^{-j\rho} + (i_d + ji_q)e^{j\rho}e^{-j\rho} j \frac{d\rho}{dt} = -(R + r_{on})(i_d + ji_q)e^{j\rho}e^{-j\rho} + (V_{td} + jV_{tq})e^{j\rho}e^{-j\rho} - \widehat{V}_s e^{j(\omega_0 t + \theta_0)}e^{-j\rho} \quad (5.21)$$

$$\frac{d}{dt}(i_d + ji_q) + j \frac{d\rho}{dt}(i_d + ji_q) = -(R + r_{on})(i_d + ji_q) + (V_{td} + jV_{tq}) - \widehat{V}_s e^{j(\omega_0 t + \theta_0 - \rho)} \quad (5.22)$$

separando la ecuación (5.22) en sus componentes d y q se tiene:

$$L \frac{d}{dt}(i_d) - L \frac{d\rho}{dt}(i_q) = -(R + r_{on})(i_d) + V_{td} - \widehat{V}_s \cos(\omega_0 t + \theta_0 - \rho) \quad (5.23)$$

$$L \frac{d}{dt}(i_q) + L \frac{d\rho}{dt}(i_d) = -(R + r_{on})(i_q) + V_{tq} + \widehat{V}_s \sin(\omega_0 t + \theta_0 - \rho) \quad (5.24)$$

ordenando las ecuaciones (5.23) y (5.24)

$$L \frac{d}{dt}(i_d) = L \frac{d\rho}{dt}(i_q) - (R + r_{on})(i_d) + V_{td} - \widehat{V}_s \cos(\omega_0 t + \theta_0 - \rho) \quad (5.25)$$

$$L \frac{d}{dt}(i_q) = -L \frac{d\rho}{dt}(i_d) - (R + r_{on})(i_q) + V_{tq} + \widehat{V}_s \sin(\omega_0 t + \theta_0 - \rho) \quad (5.26)$$

asumiendo que la variación en el ángulo en el tiempo es velocidad angular

$$\frac{d\rho}{dt} = \omega(t) \quad (5.27)$$

$$L \frac{d}{dt}(i_d) = L\omega(t)i_q - (R + r_{on})(i_d) + V_{td} - \widehat{V}_s \cos(\omega_0 t + \theta_0 - \rho) \quad (5.28)$$

$$L \frac{d}{dt}(i_q) = -L\omega(t)i_d - (R + r_{on})(i_q) + V_{tq} + \widehat{V}_s \sin(\omega_0 t + \theta_0 - \rho) \quad (5.29)$$

Las ecuaciones (5.27), (5.28) y (5.29) corresponden al modelo necesario para diseñar el siste-

ma de control en modo corriente del D-STATCOM.

5.3. Modelo dinámico para control de tensión en el PCC

5.3.1. Dinámica del voltaje del PCC a gran señal

La función del D-STATCOM mostrado en la figura 5.4 es la regulación del voltaje del PCC, voltaje abc en el PCC (V_{sabc}), en presencia de una corriente de carga (i_{Labc}), mediante el control de una corriente del D-STATCOM (i_{abc}). Aplicando ley de voltaje de Kirchhoff en el PCC, las variables del sistema quedan relacionadas de la siguiente manera (Giroux y cols., 2001, pag. 315):

$$\boxed{\sum_{m=1}^M v_m = 0}$$

$$\begin{aligned} -V_{sa} + L_g \frac{di_{ga}}{dt} + V_{ga} + V_{null} &= 0 \\ -V_{sb} + L_g \frac{di_{gb}}{dt} + V_{gb} + V_{null} &= 0 \\ -V_{sc} + L_g \frac{di_{gc}}{dt} + V_{gc} + V_{null} &= 0 \end{aligned} \quad (5.30)$$

Despejando V_{sa} , V_{sb} y V_{sc} de cada una de las ecuaciones planteadas se tiene:

$$\begin{aligned} V_{sa} &= L_g \frac{di_{ga}}{dt} + V_{ga} + V_{null} \\ V_{sb} &= L_g \frac{di_{gb}}{dt} + V_{gb} + V_{null} \\ V_{sc} &= L_g \frac{di_{gc}}{dt} + V_{gc} + V_{null} \end{aligned} \quad (5.31)$$

Aplicando la ley de corrientes de Kirchhoff en el nodo del PCC se tiene:

$$\boxed{\sum_{n=1}^N i_n = 0}$$

$$\begin{aligned} i_a - i_{La} - i_{ga} &= 0 \\ i_b - i_{Lb} - i_{gb} &= 0 \\ i_c - i_{Lc} - i_{gc} &= 0 \end{aligned} \quad (5.32)$$

Despejando la corriente del generador se tiene:

$$\begin{aligned} i_{ga} &= i_a - i_{La} \\ i_{gb} &= i_b - i_{Lb} \\ i_{gc} &= i_c - i_{Lc} \end{aligned} \quad (5.33)$$

V_{null} es el voltaje entre el neutro del sistema AC y el punto medio del lado de DC entre $2C$ (si existe) del VSC o puede ser virtual en el caso de que sea solo C (Shinde y Pulavarthi, 2017) (Anaya-Lara y cols., 2014).

Multiplicando ambos lados las ecuaciones ((5.31)) respectivamente por $(2/3)e^{j0}$, $(2/3)e^{j2\pi/3}$ y $(2/3)e^{j4\pi/3}$ y sumando a ambos lados según ((4.8)) de la sección (4.3) se obtiene:

$$\vec{V}_s = L_g \frac{d\vec{i}}{dt} + \vec{V}_g \quad (5.34)$$

donde $e^{j0} + e^{j2\pi/3} + e^{j4\pi/3} \equiv 0$ y V_{null} no aparece en la ecuación de fasor espacial.

De manera similar se realiza con ((5.33)) obteniendo la siguiente expresión:

$$\vec{i}_g = \vec{i} - \vec{i}_L \quad (5.35)$$

Añadiendo los parámetros de amplitud, frecuencia angular y fase de cada voltaje y corriente de las ecuaciones (5.31) y (5.33) en las ecuaciones (5.34) y (5.35).

Sea el voltaje de la fuente en el sistema CA

$$\begin{aligned} V_{ga} &= \widehat{V}_g \cos(\omega_0 + \theta_0) \\ V_{gb} &= \widehat{V}_g \cos\left(\omega_0 + \theta_0 - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{gc} &= \widehat{V}_g \cos\left(\omega_0 + \theta_0 - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (5.36)$$

donde \widehat{V}_g es el voltaje de línea a neutro, ω_0 es la frecuencia del sistema de CA y θ_0 es el ángulo de fase inicial de V_{gabc} . Entonces basado en (5.36) V_{gabc} es equivalente a:

$$\vec{V}_g = \widehat{V}_g e^{j(\omega_0 t + \theta_0)} \quad (5.37)$$

El D-STATCOM de la figura 5.4 se controla en el sistema de referencia dq y esta sincronizado a un ángulo ρ . Sustituyendo en (5.34) para $\vec{V}_s = V_{sdq} e^{j\rho}$, $\vec{i}_g = i_{gdq} e^{j\rho}$ y $\vec{V}_g = \widehat{V}_g e^{j(\omega_0 + \theta_0)}$ se tiene:

$$V_{sdq} e^{j\rho} = L_g \frac{d}{dt} (i_{gdq} e^{j\rho}) + \widehat{V}_g e^{j(\omega_0 + \theta_0)} \quad (5.38)$$

De manera similar con (5.35) para $\vec{i}_g = i_{gdq} e^{j\rho}$, $\vec{i} = i e^{j\rho}$ y $\vec{i}_L = i_{Ldq} e^{j\rho}$:

$$i_{gdq} = i_{dq} - i_{Ldq} \quad (5.39)$$

se puede descomponer en

$$\begin{aligned} i_{gd} &= i_d - i_{Ld} \\ i_{gq} &= i_q - i_{Lq} \end{aligned} \quad (5.40)$$

Calculando la derivada de ((5.38)), multiplicando ambos lados por $e^{j\rho}$ y descomponiendo en parte real e imaginaria se obtiene:

$$V_{sd} = L_g \frac{di_{gd}}{dt} - L_g \omega i_{gq} + \widehat{V}_g \cos(\omega_0 t + \theta_0 - \rho_0) \quad (5.41)$$

$$V_{sq} = L_g \frac{di_{gq}}{dt} - L_g \omega i_{gd} + \widehat{V}_g \sin(\omega_0 t + \theta_0 - \rho_0) \quad (5.42)$$

donde $\omega = d\rho/dt$.

El sistema resultante es claramente no-lineal por los términos $\widehat{V}_g \cos(\omega_0 t + \theta_0 - \rho_0)$ y $\widehat{V}_g \sin(\omega_0 t + \theta_0 - \rho_0)$.

El procedimiento que se ha realizado hasta este punto se conoce como la transformada de Clark y Park, el cual transforma un sistema de referencia abc en un sistema de referencia $\alpha\beta$ (esto es lo que se denomina transformada Clark) y posteriormente se hace girar este sistema de referencia para un ángulo ρ (O'Rourke y cols., 2019).

5.3.2. Dinámica del voltaje del PCC en pequeña señal

En la dinámica del voltaje del PCC en pequeña señal se analiza el sistema en régimen permanente y los cambios de cada variable son de valores pequeños alrededor del punto de operación. Esta sería la linealización de las ecuaciones (5.41) y (5.42). Para realizar lo anterior primero se definen las siguientes variables de perturbación (Iravani y Yazdani, 2010, pag 318):

$$\begin{aligned} V_{sd} &= V_{sd0} + \widetilde{V}_{sd}, \\ V_{sq} &= 0 + \widetilde{V}_{sq}, \\ i_{gd} &= i_{gd0} + \widetilde{i}_{gd}, \\ i_{gq} &= i_{gq0} + \widetilde{i}_{gq}, \\ \omega_0 t + \theta_0 - \rho &= -(\rho + \widetilde{\rho}) \rightarrow d\rho/dt = \omega_0 + d\widetilde{\rho}/dt \end{aligned} \quad (5.43)$$

El subíndice cero indica que la variable ya paso el estado transitorio y se encuentra en un valor en estado estacionario y el término con el símbolo tilde \sim indica una pequeña variación o perturbación alrededor del valor de la variable en estado estable.

En el caso de $\widetilde{\rho}/\widetilde{\rho}_0 \ll 1$ se tendrá una variación de un ángulo pequeño y por ende una

variación pequeña de la frecuencia angular ω_0 .

Aplicando las funciones trigonométricas de la ecuación (5.44) de suma de ángulos para la función seno y coseno

$$\begin{aligned} \cos(\alpha + \beta) &= \cos(\alpha)\cos(\beta) - \sin(\alpha)\sin(\beta) \\ \sin(\alpha + \beta) &= \sin(\alpha)\cos(\beta) + \cos(\alpha)\sin(\beta) \end{aligned} \quad (5.44)$$

donde

$$\begin{aligned} \cos(\rho + \tilde{\rho}) &= \cos(\rho)\cos(\tilde{\rho}) - \sin(\rho)\sin(\tilde{\rho}) \\ \sin(\rho + \tilde{\rho}) &= \sin(\rho)\cos(\tilde{\rho}) + \cos(\rho)\sin(\tilde{\rho}) \end{aligned} \quad (5.45)$$

Aplicando aproximación de ángulos pequeños a la ecuación (5.45) de la ecuación (5.46) según (Holbrow, Lloyd, Amato, Galvez, y Parks, 2010).

$$\begin{aligned} \sin(\tilde{\rho}) &\simeq \tilde{\rho} \\ \cos(\tilde{\rho}) &\simeq 1 \end{aligned} \quad (5.46)$$

Expresando la variable de perturbación ρ

$$\begin{aligned} \cos(\rho_0 + \tilde{\rho}) &\approx \cos\rho_0 - (\sin\rho_0)\tilde{\rho} \\ \sin(\rho_0 + \tilde{\rho}) &\approx \sin\rho_0 + (\cos\rho_0)\tilde{\rho} \end{aligned} \quad (5.47)$$

Sustituyendo las variables de perturbación en las ecuaciones (5.41) y (5.42)

$$V_{sd0} = -L_g\omega_0 i_{gq0} + \widehat{V}_g \cos\rho_0 \quad (5.48)$$

$$0 = L_g\omega_0 i_{gd0} - \widehat{V}_g \sin\rho_0 \quad (5.49)$$

y

$$\tilde{V}_{sd} = L_g \frac{d\tilde{i}_{gd}}{dt} - L_g\omega_0 \tilde{i}_{gq} - L_g i_{gq0} \tilde{\omega} - (\widehat{V}_g \sin\rho_0) \tilde{\rho} \quad (5.50)$$

$$\tilde{V}_{sq} = L_g \frac{d\tilde{i}_{gq}}{dt} + L_g\omega_0 \tilde{i}_{gd} + L_g i_{gd0} \tilde{\omega} - (\widehat{V}_g \cos\rho_0) \tilde{\rho} \quad (5.51)$$

De la ecuación (5.48) y (5.49) el término $\widehat{V}_g \sin\rho_0$ y $\widehat{V}_g \cos\rho_0$ respectivamente y sustituyendo en la ecuación (5.50) y (5.51) se obtiene:

$$\tilde{V}_{sd} = L_g \frac{d\tilde{i}_{gd}}{dt} - L_g \omega_0 \tilde{i}_{gq} - L_g i_{gq0} \frac{d\tilde{\rho}_0}{dt} - L_g \omega_0 i_{gd0} \tilde{\rho} \quad (5.52)$$

$$\tilde{V}_{sq} = L_g \frac{d\tilde{i}_{gq}}{dt} - L_g \omega_0 \tilde{i}_{gd} - L_g i_{gd0} \frac{d\tilde{\rho}_0}{dt} - (V_{sd0} + L_g \omega_0 i_{gq0}) \tilde{\rho} \quad (5.53)$$

$$\frac{d\tilde{\rho}}{dt} = \tilde{\omega} = H(p) \tilde{V}_{sq} \quad (5.54)$$

Las ecuaciones (5.52), (5.53) y (5.54) son lineales y pueden expresarse en el dominio de Laplace de la siguiente forma

$$\tilde{V}_{sd}(s) = L_g s \tilde{I}_{gd} - L_g \omega_0 \tilde{I}_{gq}(s) - L_g (i_{gq0} s + \omega_0 i_{gd0}) \tilde{\rho}(s) \quad (5.55)$$

$$\tilde{V}_{sq}(s) = L_g s \tilde{I}_{gq} - L_g \omega_0 \tilde{I}_{gd}(s) + [L_g i_{gd0} s - (V_{sd0} + L_g \omega_0 i_{gq0})] \tilde{\rho}(s) \quad (5.56)$$

$$\tilde{\rho}(s) = \frac{H(s)}{s} \tilde{V}_{sq}(s) \quad (5.57)$$

De las ecuaciones (5.56) y (5.57) se elimina \tilde{V}_{sq} , ya que el fasor espacial en el marco de referencia dq se alineará con el eje d y su proyección en el eje q será igual a cero. Utilizando la ecuación (5.43) se tiene:

$$0 = L_g s \tilde{I}_{gq} - L_g \omega_0 \tilde{I}_{gd}(s) + [L_g i_{gd0} s - (V_{sd0} + L_g \omega_0 i_{gq0})] \tilde{\rho}(s) \quad (5.58)$$

$$\tilde{\rho}(s) = \frac{H(s)}{s} * 0 \quad (5.59)$$

Reemplazando (5.58) y (5.59) en las ecuaciones (5.56) y (5.57) se tiene

$$\tilde{V}_{sd} = G_d(s) \tilde{I}_{gd} + G_q(s) \tilde{I}_{gq}(s) \quad (5.60)$$

$G_d(s)$ y $G_q(s)$ son dos funciones de transferencia lineales cuyos parámetros son i_{gd0} y i_{qd0} .

Dado que el D-STATCOM es un compensador de potencia reactiva este solo consume la potencia activa requerida para compensar sus pérdidas, esto hace que $i_d \approx 0$ ya que $P_{DC} = V_{DC} i_{loss}$, entonces $i_{d0} \approx 0$

$$i_{gd0} \approx -i_{Ld0} \quad (5.61)$$

$$i_{gq0} \approx i_{q0} - i_{Lq0} \quad (5.62)$$

$$\tilde{i}_{gd} \approx -\tilde{i}_{Ld} \quad (5.63)$$

$$\tilde{i}_{gq} \approx \tilde{i}_q - \tilde{i}_{Lq} \quad (5.64)$$

Sustituyendo (5.63) y (5.64) en (5.60)

$$\tilde{V}_{sd}(s) = \underbrace{-G_d(s)\tilde{I}_{Ld}(s) - G_q(s)\tilde{I}_{Lq}(s)}_{\text{efecto carga}} + \underbrace{G_q(s)\tilde{I}_q(s)}_{\text{efecto control}} \quad (5.65)$$

Los términos que acompañan a $\tilde{i}_{Ld}(s)$ y $\tilde{I}_{Lq}(s)$ son el efecto que la carga hace sobre la tensión $\tilde{V}_{sd}(s)$. El término que acompaña a $\tilde{I}_q(s)$ el efecto que tendrá el D-STATCOM sobre la tensión $\tilde{V}_{sd}(s)$.

6. CONTROL DEL D-STATCOM

6.1. Diseño del sistema de control del D-STATCOM del VSC

En esta sección se resalta la arquitectura de los bloques según las ecuaciones halladas en la sección 5.2 y sección 5.3.

Para las ecuaciones (5.28) y (5.29) dado que el sistema eléctrico de potencia mantiene la frecuencia angular constante $\omega(t)$ se asume que es ω_0 y aplicando la ecuación (4.8) a V_s y descomponiendo en dq se expresan las ecuaciones como:

$$L \frac{d}{dt} i_d = L\omega_0 i_q - (R + r_{on}) i_d + V_{td} - V_{sd} \quad (6.1)$$

$$L \frac{d}{dt} i_q = -L\omega_0 i_d - (R + r_{on}) i_q + V_{tq} + V_{sq} \quad (6.2)$$

Despejando las variables de estado i_d e i_q de las ecuaciones (6.1) y (6.2) quedando la expresión de la siguiente forma:

$$L \frac{d}{dt} i_d + (R + r_{on}) i_d = L\omega_0 i_q + V_{td} - V_{sd} \quad (6.3)$$

$$L \frac{d}{dt} i_q + (R + r_{on}) i_q = -L\omega_0 i_d + V_{tq} + V_{sq} \quad (6.4)$$

Realizando una primera aproximación en diagrama de bloques de control del sistema las ecuaciones (6.3) y (6.4) se pueden expresar como se muestra en la figura 6.1

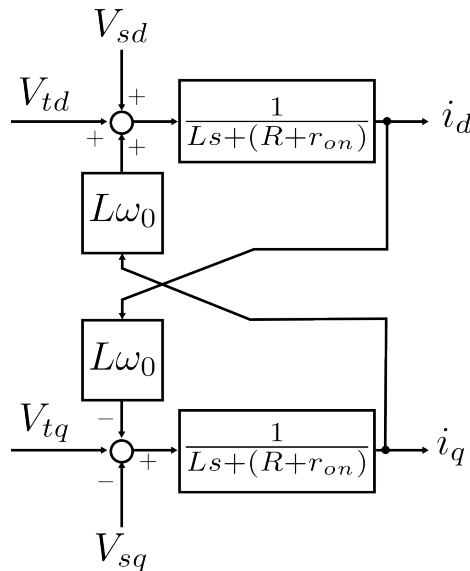


Figura 6.1. Diagrama de bloques ecuaciones (6.3) y (6.4). Fuente: Elaboración propia

Las variables de estado se definen como i_d e i_q , las variables V_{sd} y V_{sq} variables de perturbación y V_{td} con V_{tq} corresponden a las variables de entrada.

Las ecuaciones (6.3) y (6.4) la variable i_q aparece en la ecuación de estado de i_d y la variable i_d aparece en la ecuación de estado de i_q . Lo anterior muestra que las variables están acopladas, es decir una será perturbación para la otra variable y viceversa. Para evitar esta perturbación de una variable sobre la otra se requiere desacoplar el sistema de control utilizando los términos $L\omega_0$, V_{sd} y V_{sq} en el sistema de control.

Utilizando la ecuación (4.1) se construyen los bloques que la representan y se agregan a la figura 6.1 como se muestra en la figura 6.1. El sistema de bloques añadido corresponden al mostrado en la figura 6.2.

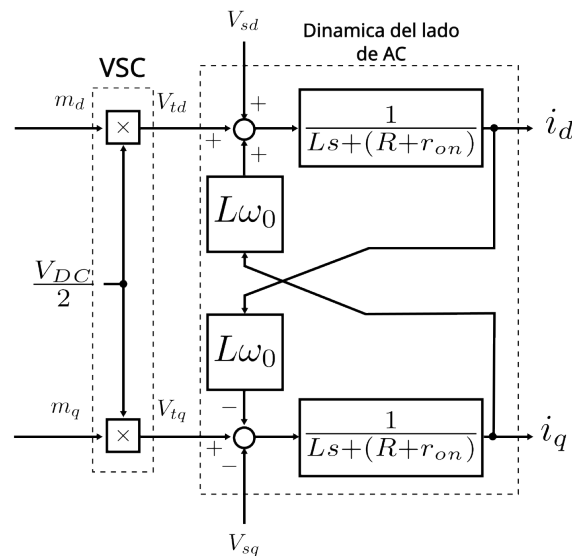


Figura 6.2. Diagrama de bloques ecuaciones (6.3) y (6.4) en el marco de referencia dq y VSC. Fuente: Elaboración propia.

Hasta este punto es claro que se requiere generar la señal correcta de m_d y m_q para controlar la corriente i_d e i_q del sistema.

$$V_{td}(t) = \frac{V_{DC}}{2} m_d(t) \quad (6.5)$$

$$V_{tq}(t) = \frac{V_{DC}}{2} m_q(t) \quad (6.6)$$

Para completar la estructura de control en modo corriente es necesario agregar un compensador que controle i_d y otro compensador que controle i_q . Además como se comentó anteriormente por estar el sistema acoplado se requiere desacoplar las variables de estado utilizando la técnica de *Feed-forward*. Los bloques del sistema de control modo corriente quedarían como se representan en la figura 6.3.

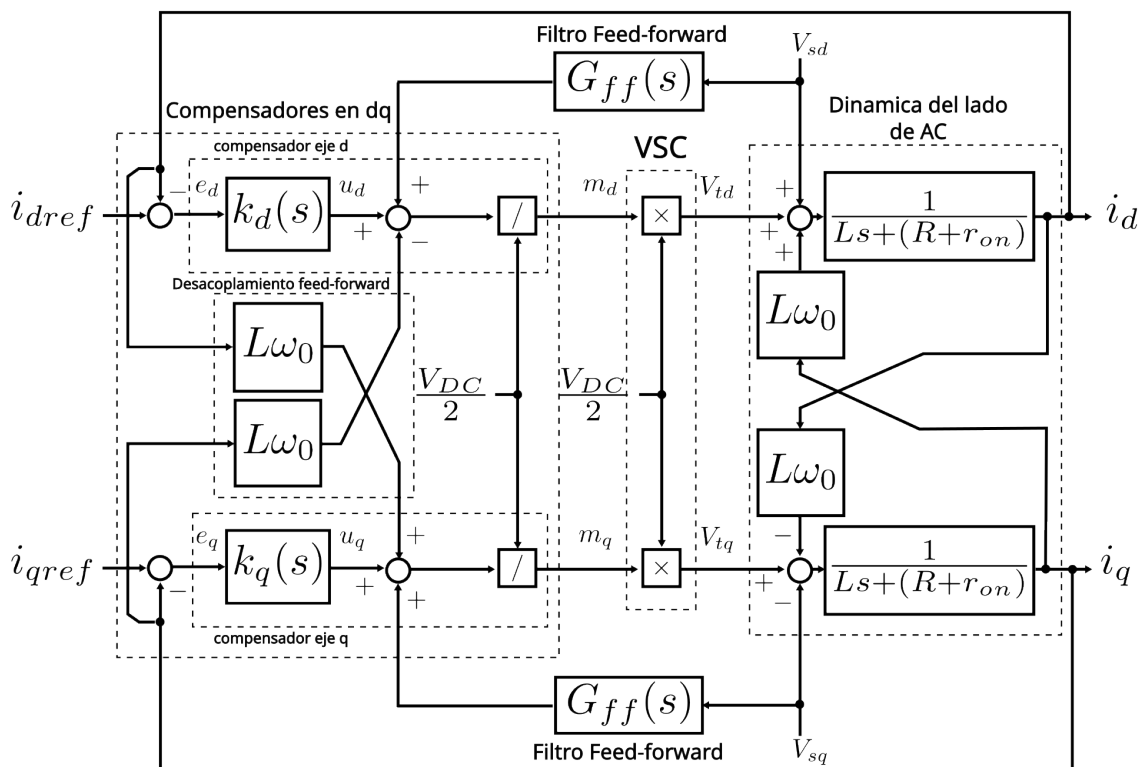


Figura 6.3. Diagrama de bloques del D-STATCOM de control en modo corriente. Fuente: (Iravani y Yazdani, 2010, pag 220)

La señal de mando u_d y u_q es generada utilizando un compensador k_d y k_q respectivamente. Igualmente se añade el desacoplamiento de $i_q L \omega_0$ y V_{sd} para la parte de control del eje d y de manera similar $i_d L \omega_0$ y V_{sq} para la componente de control en el eje q .

6.2. Diseño del sistema de control del D-STATCOM para el PCC

Para la construcción de la arquitectura de los bloques del D-STATCOM donde se controla la tensión del PCC se utilizan las ecuaciones del control en modo corriente del VSC y las ecuaciones para el control del PCC. Partiendo de la ecuación (5.65) planteada en la sección 5.3.2 se construye el lazo de control para la tensión en el PCC como se muestra en la figura 6.4

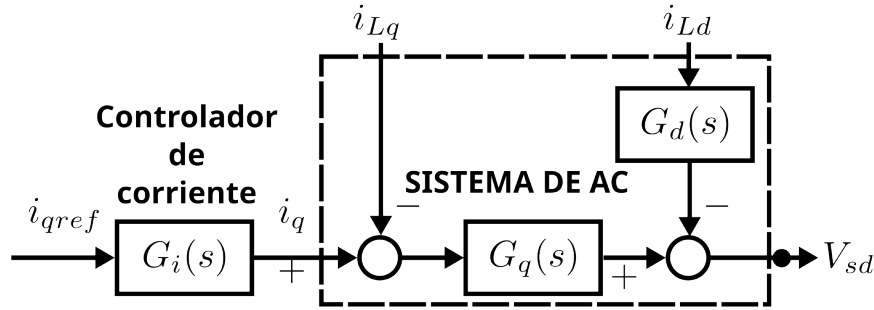


Figura 6.4. Lazo de Control del PCC. Fuente: (Iravani y Yazdani, 2010, pag 320)

Retomando el diagrama de bloques del D-STATCOM de la figura 5.4 se puede ver que se ha llamado Q_s y P_s a la potencia reactiva y activa que aporta el D-STATCOM al PCC. El autor (Akagi y cols., 2017, pag. 44) enuncia en su libro *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning* la ecuación de la potencia reactiva y activa en el marco de referencia $dq0$ lo presenta con las ecuaciones (6.7) y (6.8) adaptadas a la simbología utilizada de la figura 5.4

$$P_s = \frac{3}{2} [V_{sd}(t)i_d(t) + V_{sq}(t)i_q(t)] \quad (6.7)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} [-V_{sd}(t)i_q(t) + V_{sq}(t)i_d(t)] \quad (6.8)$$

El D-STATCOM operará en modo corriente como se enunció en la sección 5.3.1 y de acuerdo a la ecuación (5.65), $\tilde{I}_q(s)$ es la corriente que se controla utilizando el compensador para regular la tensión \tilde{V}_{sd} del PCC.

En la figura 6.4 y en la ecuación (6.8), i_q y Q_s se encuentran relacionadas. Entonces se calcula un valor de corriente i_q a partir de un valor de potencia reactiva Q_s . Este valor se calcula de la ecuación (5.49) y se asume que en estado estable V_{sq0} es cero debido al ajuste de la posición del marco dq comentado en una sección anterior. Si se reemplaza su valor en la ecuación (6.8) se obtiene la siguiente ecuación:

$$Q_s(t) = \frac{3}{2} [-V_{sd}(t)i_q(t)] \quad (6.9)$$

haciendo a $i_q = i_{qref}$, $Q_s = Q_{sref}$ y despejando a i_{qref} de (6.9) se tiene:

$$i_{qref}(t) = -\frac{2}{3V_{sd}} Q_{sref}(t) \quad (6.10)$$

el punto de consigna que es i_{qref} se genera a partir de la Q_{sref} calculada por el compensador k_{Vac} . El compensador k_{Vac} será quien reciba el error entre el valor medido de la tensión del PCC, V_{sd} y la compare con el valor de tensión V_{sdref} . Con base en la anterior ya es posible construir el diagrama de bloques completo para controlar la tensión en el PCC. Los bloques que contiene el bloque $G_i(s)$ son los mostrados en la figura 6.3.

A continuación en la figura 6.5 se tienen los bloques para controlar la tensión en el PCC.

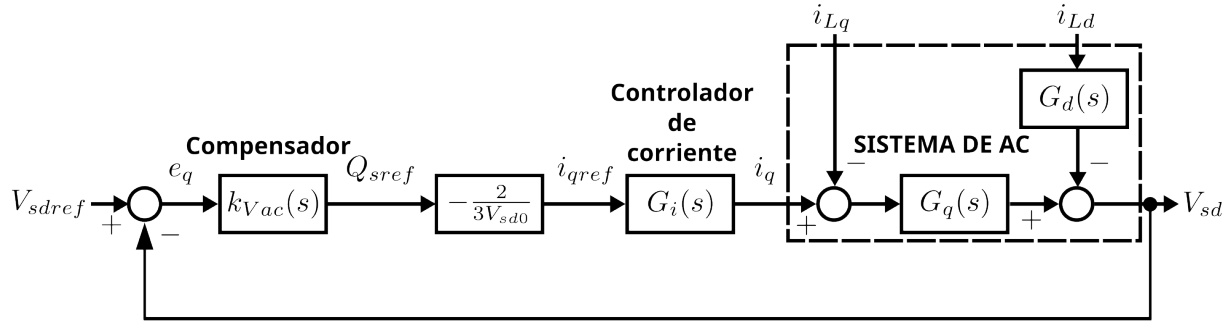


Figura 6.5. Lazo completo de control de la tensión del PCC. Fuente: (Iravani y Yazdani, 2010, pag 320)

6.3. Diseño del sistema de control del D-STATCOM para la tensión en el bus CC

El control en el bus CC, es decir la variable V_{DC} se requiere controlar debido a que la tensión del bus CC se reduce si esta no se compensa y por tanto es indispensable que se mantenga constante para que el D-STATCOM pueda compensar reactiva y generar así, las variables de corriente deseadas. Esta caída de tensión fundamentalmente se produce como consecuencia de las pérdidas internas del VSC y se compensan tomando potencia activa del sistema de CA. Para el control de la tensión del bus DC , autores como (Karare y Harne, 2017), (Samruddhi Shaha Parimal Borse, 2014), (Gidd, Gore, Jondhale, Kadekar, y Thakre, 2019) y otros, proponen calcular el valor de i_{dref} utilizando un compensador PI. Esto debido a que i_{dref} está directamente relacionado con la potencia activa P , que consume o aporte el D-STATCOM.

Para solucionar lo anterior, se realiza de manera similar como con el cálculo de Q_{sref} en la ecuación (6.10) de la sección 6.2. Utilizando la ecuación (6.7) de la siguiente manera:

$$P_s = \frac{3}{2} [V_{sd}(t)i_d(t) + V_{sq}(t)i_q(t)] \quad (6.11)$$

Asumiendo que en estado estable V_{sq0} es cero, se sustituye su valor en la ecuación (6.8) obteniendo la siguiente ecuación:

$$P_s(t) = \frac{3}{2} [V_{sd}(t)i_q(t)] \quad (6.12)$$

igualando $i_d = i_{dref}$, $P_s = P_{sref}$ y despejando i_{dref} de (6.12) se tiene:

$$i_{dref}(t) = \frac{2}{3V_{sd}} P_{sref}(t) \quad (6.13)$$

Nótese que i_{dref} es proporcional a una constante que es $\frac{2}{3V_{sd}}$ multiplicada por la potencia activa

de referencia P_{sref} . Es decir, se requiere generar un valor de potencia por parte del compensador. Utilizando la ley de Watt que dice:

$$p = \frac{v^2}{R} \quad (6.14)$$

dando como resultado el valor a generar en potencia que es proporcional al cuadrado de la tensión, por tal motivo antes de aplicar los valores de V_{DC} y V_{DCref} al compensador, estos se deben elevar al cuadrado.

Para la construcción de los bloques de control y con base en las ecuaciones anteriores, se mide la tensión en el bus CC V_{DC} y se compara con el valor V_{DCref} . Es importante señalar que hay que tener en cuenta que la acción es inversamente proporcional y por tal motivo se requiere un bloque con ganancia de -1 , como se muestra en la figura 6.6.

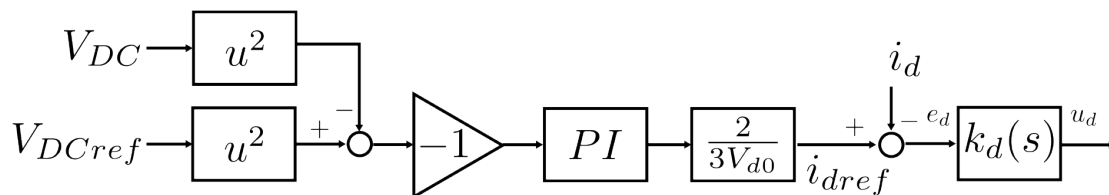


Figura 6.6. Control del bus de CC. Fuente: Elaboración propia.

La salida del compensador PI va a ser el valor de potencia activa P que requiere consumir el D-STATCOM para mantener el valor de la tensión en el bus CC .

6.4. Determinación de ganancias para los compensadores k_d y k_q en el control modo corriente del VSC

En el control modo corriente aplicado en el marco de referencia dq , las diferentes variables presentan un comportamiento con valores constantes; esto permite elegir un controlador tipo PI . Dado que se desacoplan las variables i_d e i_q , como se puede ver en la figura 6.3, donde se presenta una vista simplificada como en la figura 6.7 para los bloques de control modo corriente.

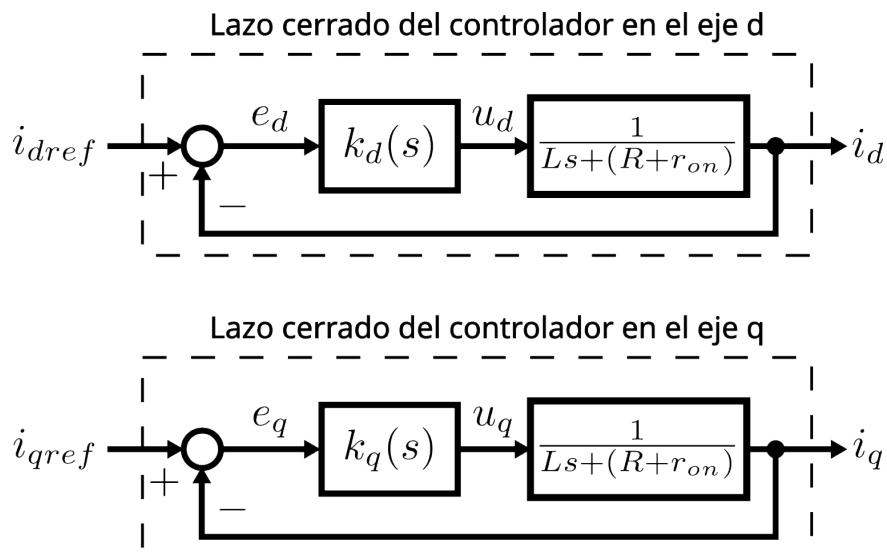


Figura 6.7. Bloques simplificados de lazos de control desacoplados en ejes d y q . Fuente: (Giroux y cols., 2001, pag. 221)

El controlador PI presenta la siguiente estructura:

$$k_d(s) = k_q = \frac{k_p s + k_i}{s} \quad (6.15)$$

donde k_d y k_q son las ganancias proporcional e integral respectivamente del controlador PI . se multiplica $G_i(s)$ por $k_q(s)$ se tiene:

$$G_i(s)k_q(s) = \frac{1}{Ls + (R + r_{on})} \frac{k_p s + k_i}{s} \quad (6.16)$$

simplificando

$$G_i(s)k_q(s) = \frac{k_p s + k_i}{s(Ls + (R + r_{on}))}$$

$$G_i(s)k_q(s) = \frac{\frac{k_p}{k_p} s + \frac{k_i}{k_p}}{\frac{s}{k_p}(Ls + (R + r_{on}))}$$

$$G_i(s)k_q(s) = \left(\frac{k_p}{s}\right) \frac{\left(s + \frac{k_i}{k_p}\right) \frac{1}{L}}{(Ls + (R + r_{on})) \frac{1}{L}}$$

$$G_i(s)k_q(s) = \left(\frac{k_p}{s}\right) \frac{\frac{1}{L} \left(s + \frac{k_i}{k_p}\right)}{\frac{Ls}{L} + \frac{R+r_{on}}{L}}$$

$$G_i(s)k_q(s) = \left(\frac{k_p}{s}\right) \frac{\frac{1}{L} \left(s + \frac{k_i}{k_p}\right)}{s + \frac{(R+r_{on})}{L}}$$

$$G_i(s)k_q(s) = \left(\frac{k_p}{Ls}\right) \frac{s + \frac{k_i}{k_p}}{s + \frac{(R+r_{on})}{L}}$$

consiguiendo la función de transferencia de lazo abierto

$$\ell(s) = \left(\frac{k_p}{Ls}\right) \frac{s + \frac{k_i}{k_p}}{s + \frac{(R+r_{on})}{L}} \quad (6.17)$$

Notese que existe un polo en

$$s = -\frac{(R + r_{on})}{L}$$

y esta cerca del origen, esto muestra que la magnitud y la fase comenzarán a caer desde una frecuencia baja. Por lo tanto, el polo de la planta se puede cancelar con el cero del compensador

$$s = -\frac{k_i}{k_p}$$

y la ganancia del bucle sería

$$\ell(s) = \frac{k_p}{Ls}$$

Entonces la función de transferencia en bucle cerrado se convertiría en

$$T(s) = \frac{\ell(s)}{1 + \ell(s)} \quad (6.18)$$

$$\frac{I_d(s)}{I_{dref}(s)} = G_i(s) = \frac{1}{\tau_i s + 1} \quad (6.19)$$

Dado que para determinar las ganancias se esta asumiendo, la cancelación del polo con el cero, en la ecuación (6.17) se asume que

$$s + \frac{k_i}{k_p} = s + \frac{(R + r_{on})}{L} \quad (6.20)$$

comparando los términos se puede decir que

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{(R + r_{on})}{L} = \omega_i = \frac{1}{\tau_i} \quad (6.21)$$

ordenando la ecuación (6.21) se tiene

$$\frac{k_i}{(R + r_{on})} = \frac{k_p}{L} = \omega_i = \frac{1}{\tau_i} \quad (6.22)$$

igualando y despejando τ_i de la ecuación (6.22)

$$\tau_i = \frac{R + r_{on}}{k_i} \quad (6.23)$$

$$\tau_i = \frac{L}{k_p} \quad (6.24)$$

Despejando k_p y k_i respectivamente, de las ecuaciones (6.23) y (6.24)

$$k_i = \frac{R + r_{on}}{\tau_i} \quad (6.25)$$

$$k_p = \frac{L}{\tau_i} \quad (6.26)$$

7. SIMULACIÓN DEL D-STATCOM

Para la evaluación del desempeño del D-STATCOM se realiza la simulación en Simulink de Matlab versión 2022 basado en las ecuaciones y bloques obtenidos de la sección 5.2, sección 5.3 y el capítulo 6. Se comenzará con una descripción de cada conjunto de bloques del sistema realizado en Simulink.

7.1. Diagramas de bloques en Simulink de Matlab

7.1.1. Diagrama trifilar del SEP

En la parte superior izquierda de la figura 7.1, se tiene la fuente AC del SEP que de ahora en adelante se llamará *Source* en la simulación. Su corriente y tensión se medirán en el barraje B1 y con esta medición se generarán dos vectores en Simulink llamados i_{Source} y V_{Source}

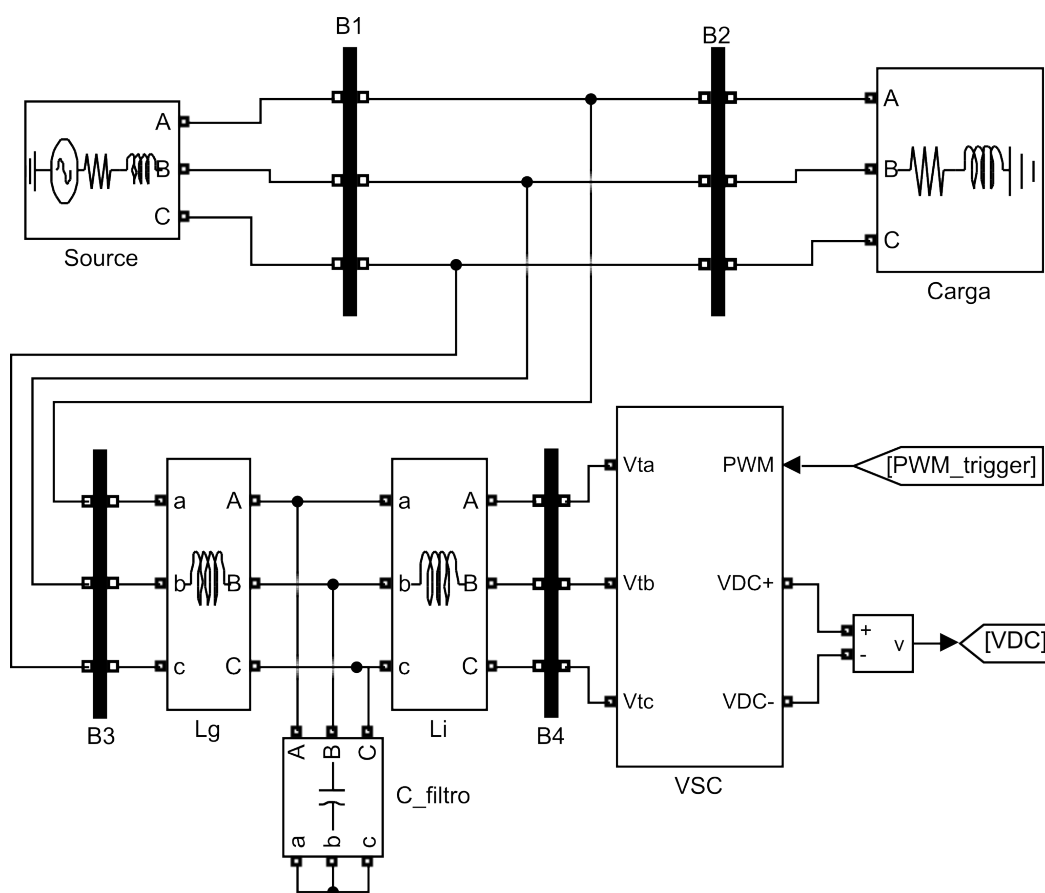


Figura 7.1. Diagrama de bloques en Simulink del D-STATCOM y el SEP. Fuente: Elaboración propia.

Para la fuente de CC en la simulación se le asigna un valor de reactancia síncrona X_s de 1.02Ω , que corresponde a 2.73 mH . Los valores seleccionados para la fuente se tomaron de

un ejercicio propuesto por (Chapman, 2011, pag. 162). En el lado superior derecho de la gráfica se tiene una carga de tipo inductiva, y en el barraje B2 se miden las corrientes i_{Load} y tensiones V_{Load} , siendo esta última la misma tensión del PCC.

En la parte inferior derecha de la figura 7.1 se implementa un VSC con un puente trifásico de IGBT's, aunque Simulink contiene el bloque del VSC en el toolbox SimScape. Para reducir los armónicos en tensión y corriente que se generan, se conecta el VSC al PCC utilizando un filtro LCL. En el barraje B4 se miden las tensiones en el terminal del VSC llamadas V_{vsc} y las corrientes de este se miden en el barraje B3 llamadas I_{vsc_PCC} ya que es la corriente que ya sale del filtro LCL y al estar con menor contenido armónico hace que el sistema de control tenga un mejor rendimiento.

7.1.2. Bloques de conversión del marco de referencia abc a dq

De los bloques de medición comentados en la sección anterior, se toman los valores instantáneos y se llevan a los bloques de conversión de marco de referencia abc a dq como se muestra en la figura 7.2

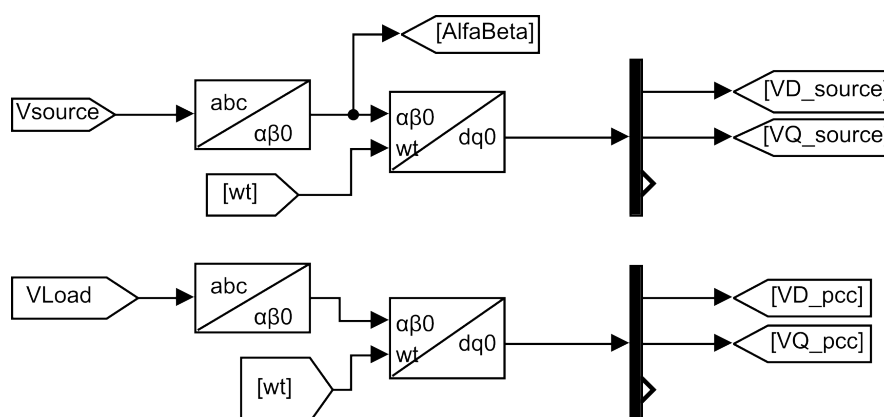


Figura 7.2. Bloques de conversión de mediciones de tensiones V_{source} y V_{Load} del marco de referencia abc al marco de referencia dq . Fuente: Elaboración propia.

Del medidor de la fuente CA se registran los datos en la variable V_{source} en la barra B1 como ya se había comentado. Este primero se convierte de abc a $\alpha\beta$ y luego de $\alpha\beta$ a $dq0$. Esto es necesario para obtener las tensiones del sistema en $\alpha\beta$ y de ahí tomar el ángulo ωt . El segundo bloque toma las mediciones de la carga y almacena en la variable V_{Load} , que igualmente se convierte primero a $\alpha\beta$ y luego a $dq0$.

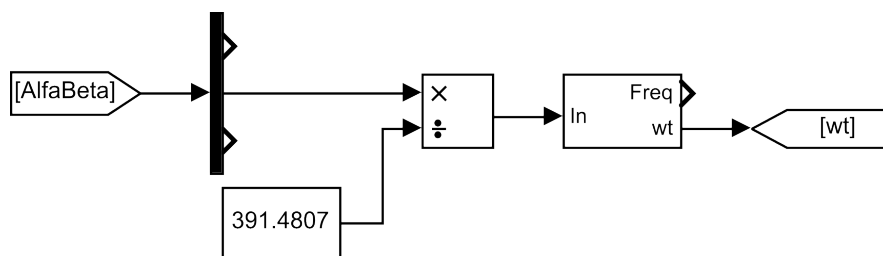


Figura 7.3. Bloque de toma de ángulo ωt de la tensión del PCC. Fuente: Elaboración propia.

Del bloque de la figura 7.3 se obtiene el ángulo instantáneo ωt que es el ángulo instantáneo del sistema, al cual se sincronizarán las tensiones y las corrientes del VSC. El valor de la constante de 391 solo se utiliza para convertir en valor unitario la entrada al PLL.

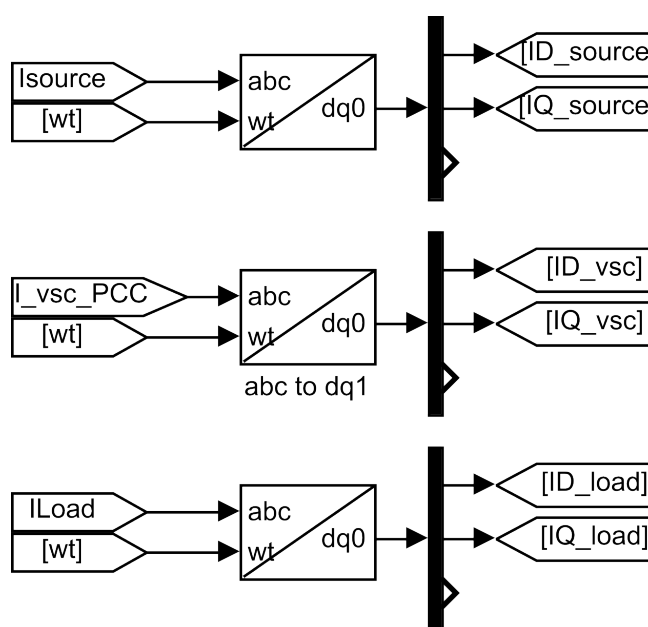


Figura 7.4. Bloques conversión de mediciones de corrientes I_{source} , I_{Load} y I_{vsc_PCC} . Fuente: Elaboración propia.

Los tres últimos bloques de las conversiones mostradas en la figura 7.4 convierten las corrientes de la fuente CA (I_{source}), corrientes del VSC (I_{vsc_PCC}) y corrientes de la carga (I_{Load}) al marco de referencia dq respectivamente.

7.1.3. Bloques de control modo corriente del VSC en el marco de referencia dq

Los valores de los parámetros a utilizar en el control van se muestran en la tabla 7.1.

Tabla 7.1. Valores de parámetros usados en la simulación de Simulink

Parámetro	Valor	Comentario
VLL source	480 V	Voltaje de línea a línea de la fuente
Ls	2.73 mH	Inductancia por fase de la fuente
PL	80kW	Potencia activa de la carga
QL	40kVAR	Potencia reactiva de la carga
C	5600 uF	Capacitancia del VSC
Li	500 uH	Inductancia lado del inversor filtro LCL
Lg	500 uH	Inductancia lado de la fuente filtro LCL
Cf	100 uF	Capacitancia del filtro LCL
kp	1	Ganancia kp controladores k_d y k_q
ki	20	Ganancia ki controladores k_d y k_q
VDC	1000V	Voltaje bus DC
ron	1 $m\Omega$	Resistencia del IGBT en estado ON
R	19 $m\Omega$	Resistencia del devanado de la inductancia L
L	1000 mH	Inductancia total igual a Li + Lg
taoi	1 ms	Constante de tiempo de la planta

Algunos parámetros se han seleccionado de acuerdo a ejemplos encontrados en diferentes artículos y ejercicios publicados en es.mathworks.com, a excepción de las ganancias de los controladores que se determinan con las ecuaciones (6.25) y (6.26). Las potencias activa y reactiva se seleccionaron por debajo de la potencia nominal de la fuente según se enunció con anterioridad que ha sido tomado de un ejemplo del libro de (Chapman, 2011). Autores como (Iravani y Yazdani, 2010, pag 222) y (Rice, 2010) recomiendan que la constante de tiempo del sistema τ (tau) o variable τ_i para esta simulación, debe tener un valor entre 0.5 y 5 ms, y el caso de la presente simulación se fijo en 1 ms.

Las constantes del controlador según las ecuaciones (6.25) y (6.26) para los valores del sistema de control de la figura 7.19 con los elementos asignados, son:

$$kp = \frac{L_i * L_g}{\tau_i} = 1 \quad (7.1)$$

$$ki = \frac{R + r_{on}}{\tau_i} = 20 \quad (7.2)$$

El control modo corriente en el marco de referencia dq genera dos señales, modulación en el eje d (m_d) y modulación en el eje q (m_q).

Estas dos señales de modulación se convierten mediante un bloque de transformación, del marco de referencia dq a abc .

Las señales de modulación m_a , m_b y m_c se comparan con una señal portadora de forma triangular, que para esta tesis se seleccionó con una frecuencia de 10 kHz ; la cual es mucho mas

rápida que la señal moduladora (Mohan y cols., 2003, pag 186).

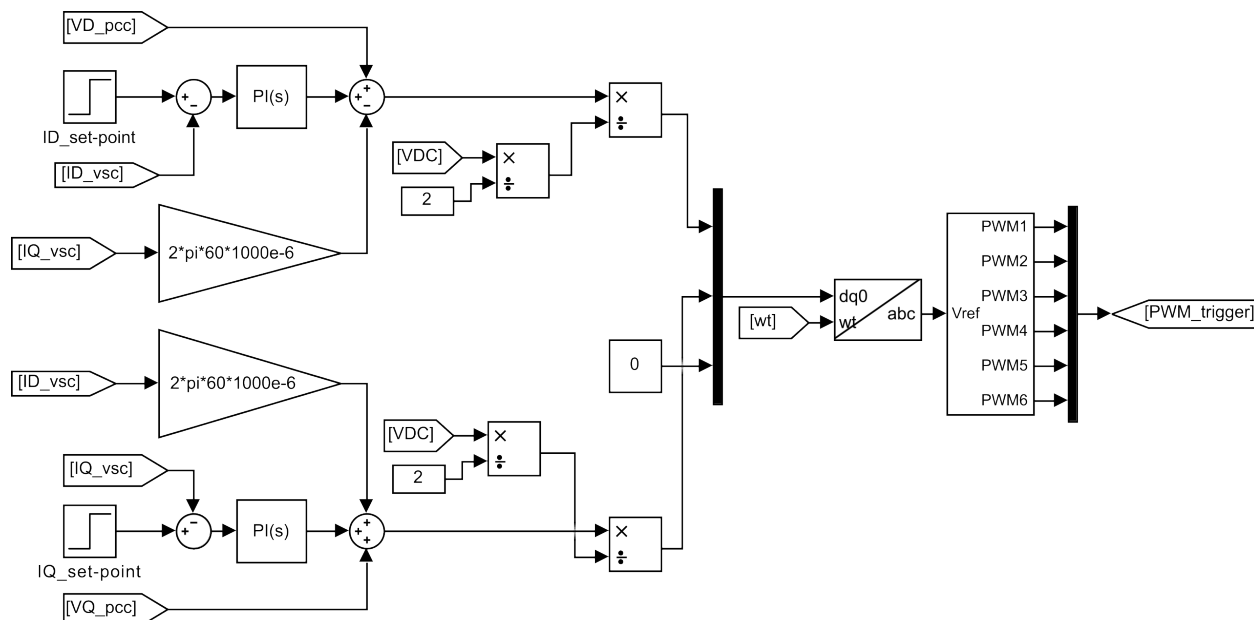


Figura 7.5. Bloques en Simulink de control en modo corriente en el marco de referencia dq .
Fuente: Elaboración propia.

Con base en los bloques desarrollados en las figuras 6.3, 6.5 y 6.6 se construyen los bloques en Simulink como se ve en la figura 7.5.

7.1.4. Subsistema de generación de señales PWM y puente trifásico de IGBT's

Para la generación de señales PWM que dan el disparo de los transistores, se creó en Simulink un subsistema como el mostrado en la figura 7.6, contenido en el bloque final derecho de la figura 7.5.

Cada señal PWM va en la compuerta de cada IGBT nombrado del numero 1 al 6 como se muestra en la figura 7.7. En la figura se notan los terminales del VSC con V_{ta} , V_{tb} y V_{tc} y un condensador que en sus terminales tiene como nombre V_{DC+} y V_{DC-} para permitir la medición de la tensión del bus DC.

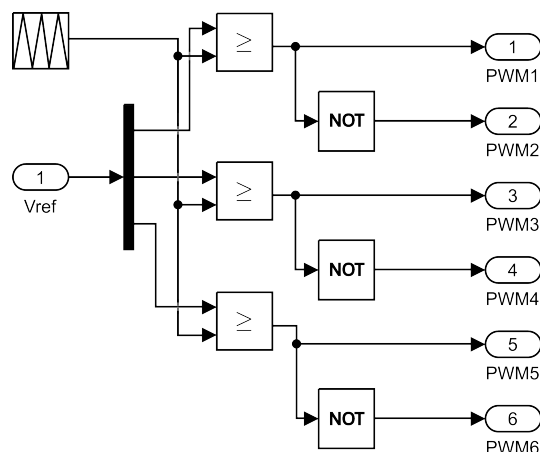


Figura 7.6. Bloque de generación de señales PWM. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 7.6, las salidas PWM se aplicaron en orden a un multiplexor y la salida del multiplexor a un bloque GOTO llamado *PWM_trigger*. Al subsistema del puente IGBT como entrada se aplica un bloque FROM con el mismo nombre *PWM_trigger* y dentro del subsistema del puente de IGBT's un demultiplexor y cada salida de este, a cada compuerta conectado en orden numérico a cada transistor.

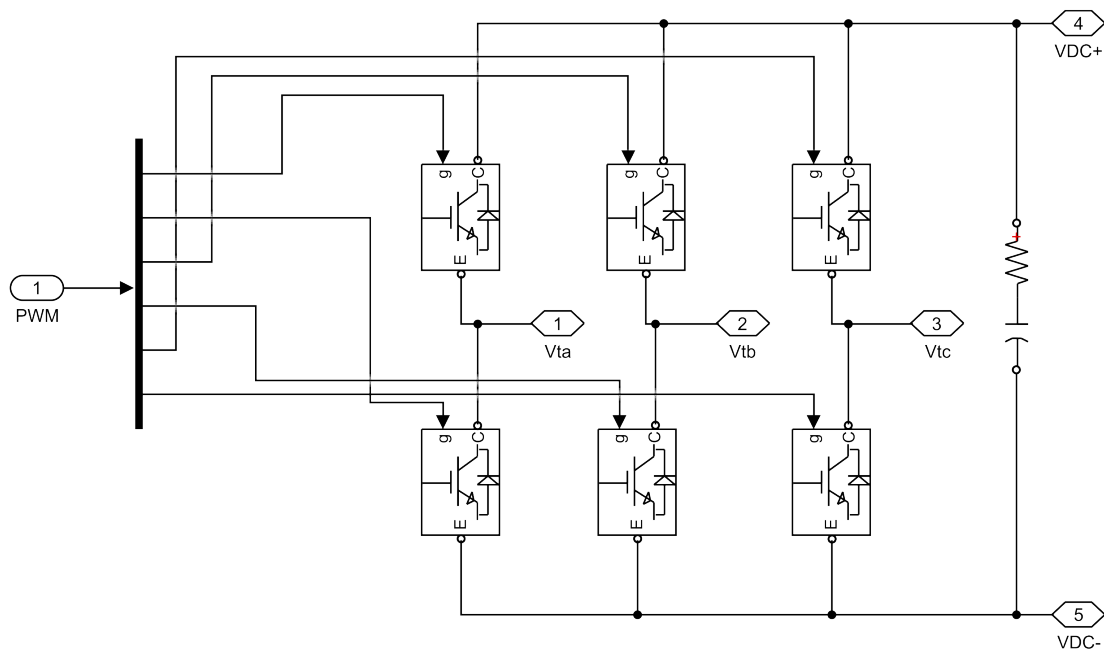


Figura 7.7. Puente trifásico de IGBT's. Fuente: Elaboración propia.

7.2. Simulación del D-STATCOM conectado al SEP

Para la ejecución de la simulación de los bloques anteriormente presentados se realiza la simulación de dos formas:

1. Simulación del D-STATCOM con fuente externa DC.
2. Simulación del D-STATCOM sin fuente externa DC.

La primera prueba consiste en probar los lazos de control modo corriente del D-STATCOM fijando un set-point de corriente I_D e I_Q respectivamente y revisando las graficas de como este aporta flujo de potencia activa y reactiva al PCC.

La segunda prueba consiste en retirar la fuente DC externa, dejando solo el condensador en el bus DC y se controla su tensión a través del consumo automático de potencia activa. Una vez comprobado la operacion satisfactoria del control de la tensión el bus DC, se varia el set-point de corriente I_Q para comprobar que efectivamente la tensión del bus DC no caiga ante la compensación de potencia reactiva.

Con los pasos anteriores operando de manera correcta el control, sólo queda controlar la tensión V_D del PCC que corresponde a la tensión de la carga, cuyo valor dependerá del set-point de I_Q generado automáticamente.

La simulación ha sido dividida en dos momentos:

1. Un primer momento es entre 0 segundos y 0.1 segundos. La fuente y la carga están conectados al PCC. El D-STATCOM igualmente esta cargado pero los set-points de ID e IQ estan con un valor de 0 amperios.
2. El segundo momento es entre un tiempo mayor de 0.1 segundos. En este momento entra en operación el valor de set-point tanto de ID como IQ .

7.2.1. Simulación del D-STATCOM con fuente externa de tensión DC

Como se menciona en la sección anterior, la primera prueba tendrá una fuente ideal de tensión DC en la ubicación del condensador. Esto con el fin de probar el control modo corriente del VSC y verificar que los lazos de control en los ejes D y Q funcionan correctamente. Si estos operan correctamente tendremos flujos de potencia activa y reactiva al SEP en los valores que sean asignados, ya sea directamente como corrientes I_D e I_Q en el set-point de cada una, o con set-point con valores de potencia activa y reactiva, calculando la corriente I_D e I_Q para cada potencia respectivamente.

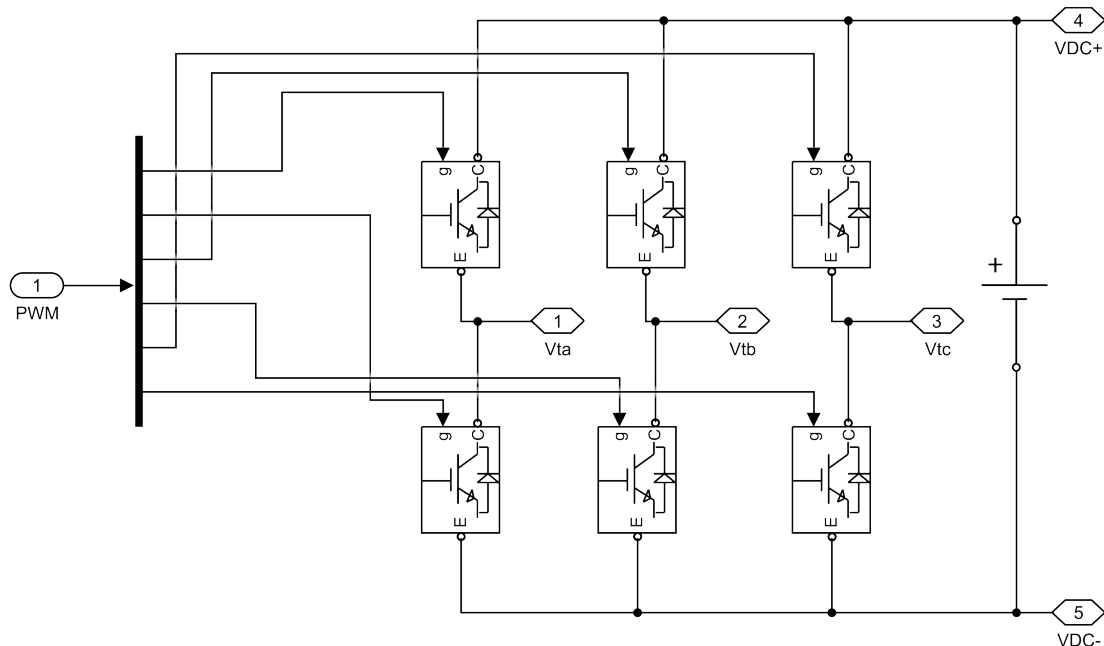


Figura 7.8. VSC con fuente de tensión DC externa. Fuente: Elaboración propia.

Aunque en el modelo de simulación la fuente de tensión DC este dentro del subsistema del puente trifásico IGBT, en la practica estaría por fuera conectada entre los puntos V_{DC+} y V_{DC-} .

7.2.1.1. Determinación del ángulo ωt del SEP. Para la determinación del valor instantáneo del ángulo se utiliza el PLL, el cual fue mostrado en la grafica 5.4. En la figura 7.9 se muestra la medición del valor instantáneo de ωt .

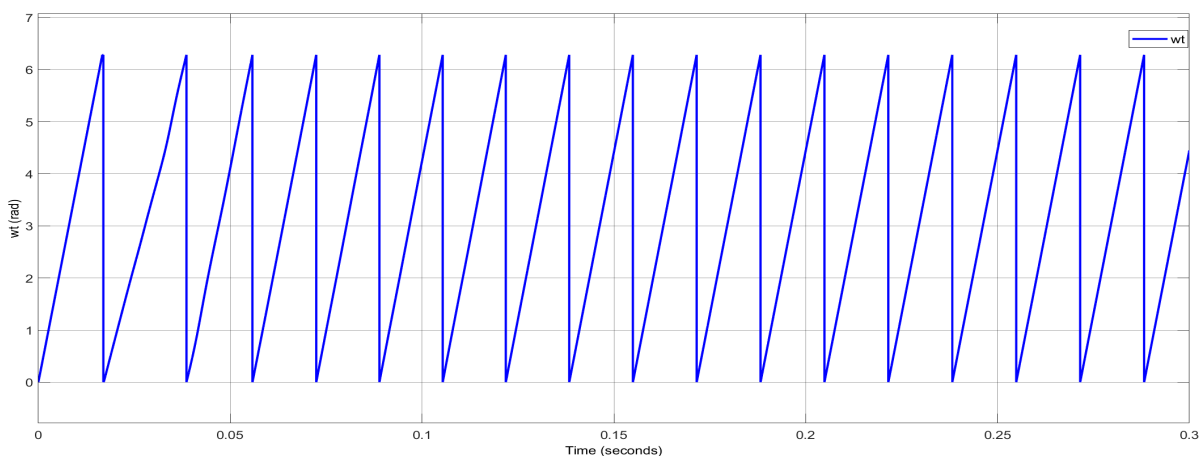


Figura 7.9. Valor instantáneo del ángulo ωt . Fuente: Elaboración propia.

El ángulo varia de 0 radianes hasta 2π radianes (6,28 radianes) y vuelve nuevamente a

zero. Este ángulo es de suma importancia porque las tensiones y corrientes generadas por el D-STATCOM deben estar perfectamente sincronizadas para obtener el control correcto sobre el SEP. La duración entre 0 radianes y 2π radianes es la duración de un ciclo de la tensión en 60 Hz.

7.2.1.2. Generación de señales m_d y m_q . Recordando la ecuación (4.1) de la sección 4.2 el voltaje en los terminales del D-STATCOM dependen de la tensión en el bus DC y la señal de modulación. Como se había explicado con anterioridad, el control se realiza en el marco de referencia dq . En la figura 7.10 la grafica de la izquierda muestra la generación de las señales m_d y m_q por parte de los lazos de control en el eje D y Q , las cuales tienen un valor DC y que puede estar en un rango de valores entre -1 y $+1$.

Estas señales se convierten al marco de referencia abc , como se ve en la grafica del lado derecho de la figura 7.10, cuyo valor también tienen un rango posible entre -1 y $+1$, para luego ser comparadas con la señal portadora de forma triangular de 10 kHz y de esta manera generar las señales PWM. El valor de la modulación en dq y por ende en abc dependerá del valor de setpoint para la corriente ID_VSC e IQ_VSC . En este ejemplo se está aplicando un valor de $+40$ amperios para $ID_setpoint$ y $+40$ amperios para $IQ_setpoint$ cuyo circuito en Simulink es el de la figura 7.5.

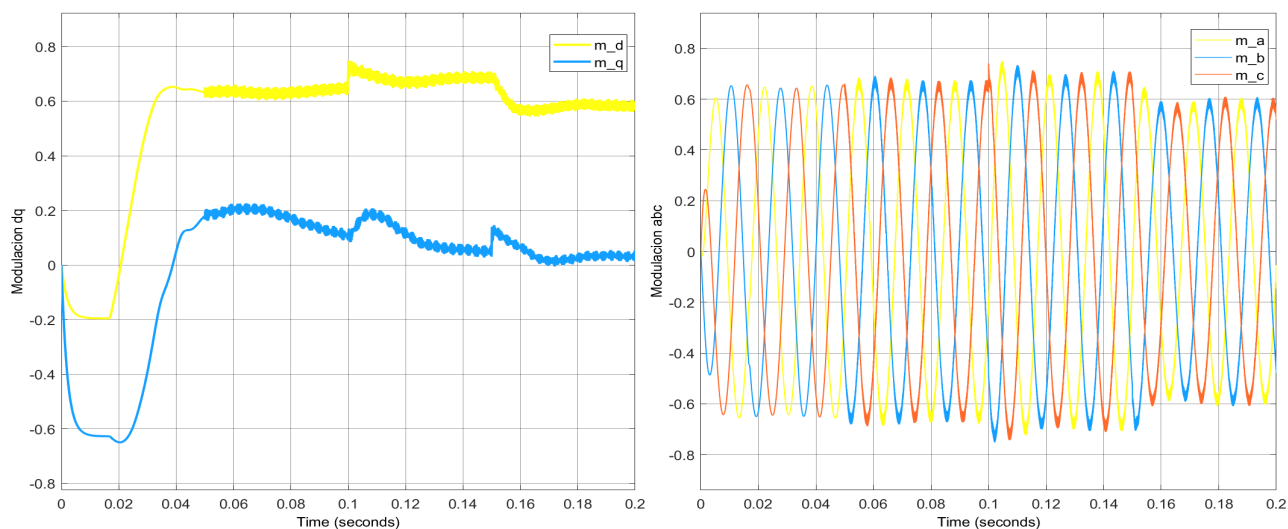


Figura 7.10. Generación de señales de modulación en dq y abc del D-STATCOM. Fuente: Elaboración propia.

La figura 7.11 hace un acercamiento a las señales de modulación en dq y abc ya mostrado en la grafica 7.10.

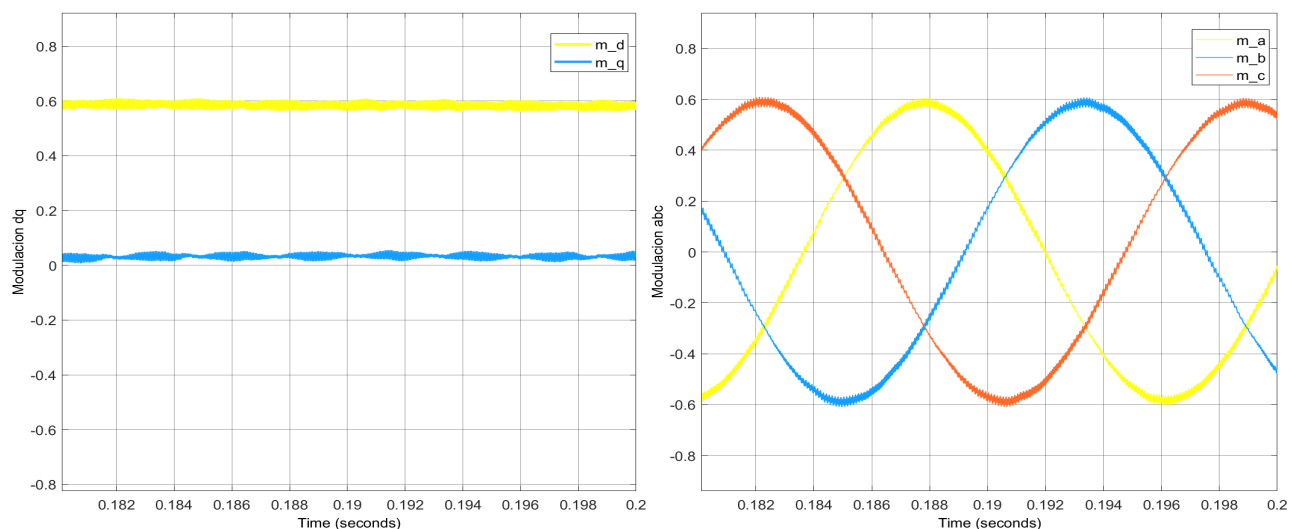


Figura 7.11. Detalle de generación de señales de modulación en dq y abc del D-STATCOM.
Fuente: Elaboración propia.

7.2.1.3. Generación tensión PWM para un transistor IGBT. La figura 7.12 muestra la señal PWM1 generada por la comparación de la portadora de 10 kHz y la señal moduladora m_a , en este caso se muestra casi medio ciclo de una señal de 60 Hz .

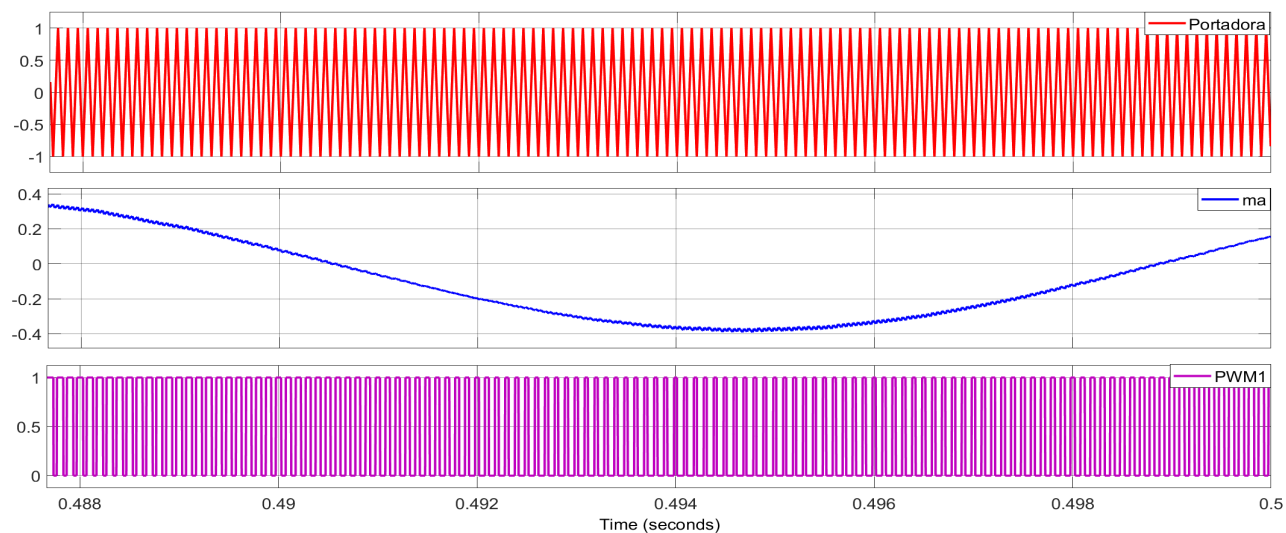


Figura 7.12. Señal portadora de 10 kHz , moduladora m_a y PWM1. Fuente: Elaboración propia.

Esta señal PWM es quien dispara al transistor $Q1$. La figura 7.13 es una vista a mas detalle de la figura 7.12.

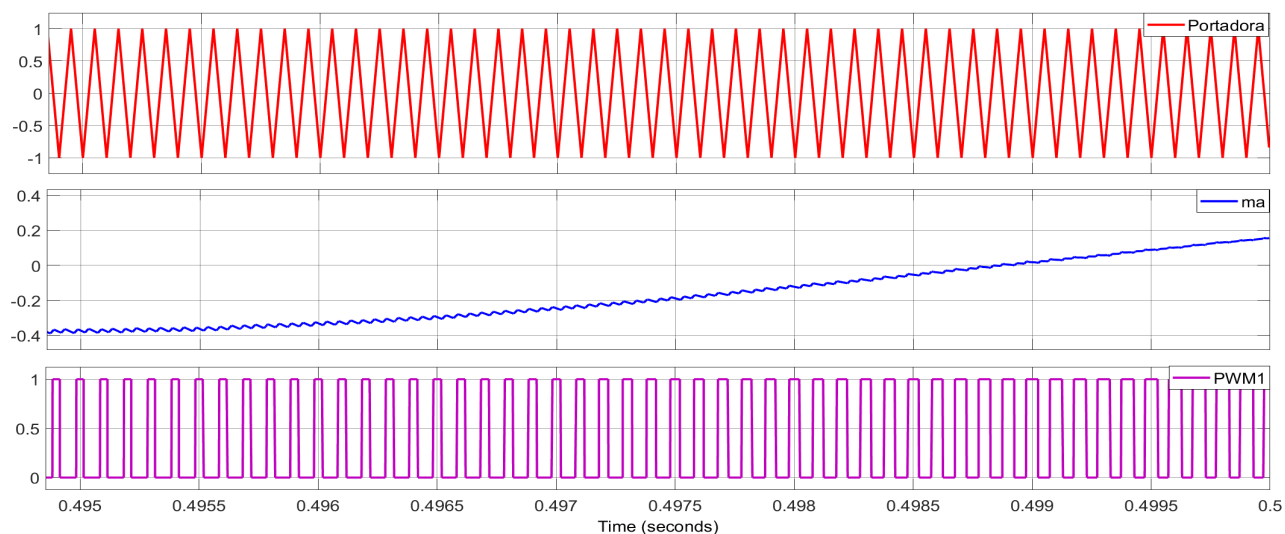


Figura 7.13. Vista mas detallada de señal portadora de 10kHz, moduladora m_a y PWM1. Fuente: Elaboración propia.

La figura 7.14 muestra en un tiempo aproximado de un ciclo de las tensiones de la fuente V_{source} , las tensiones de la carga V_{Load} y las tensiones en los terminales D-STATCOM. Nótese que las tensiones en los terminales del D-STATCOM son de ancho variable con un nivel DC y no sinusoidales como la de la fuente y la carga.

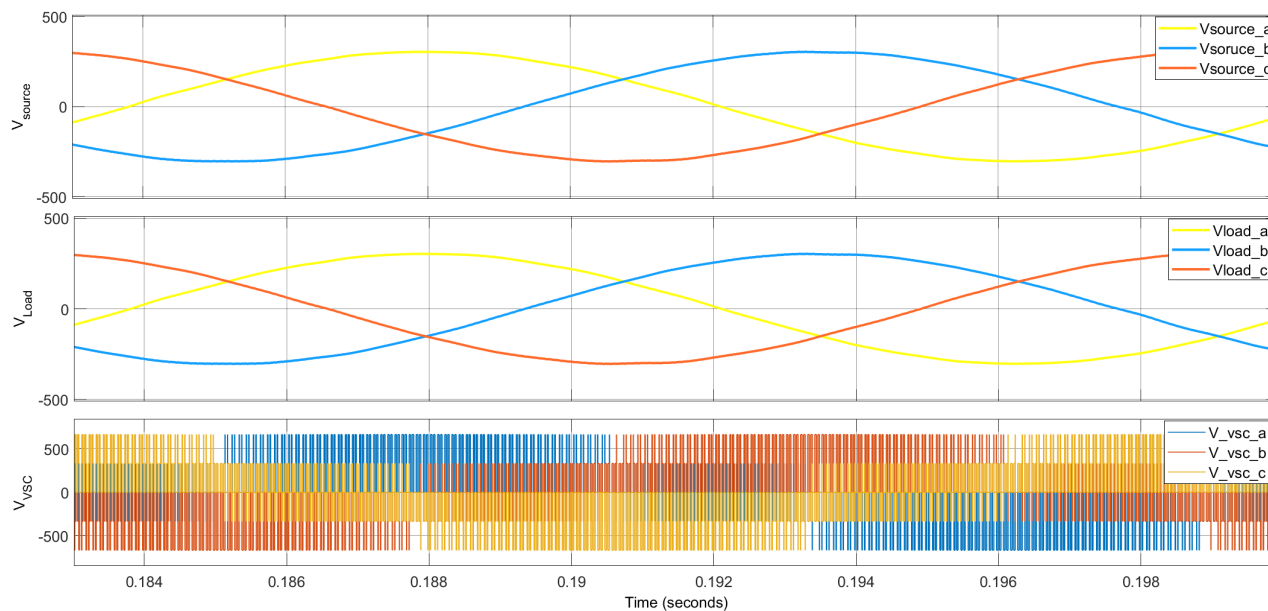


Figura 7.14. Tensiones trifásicas de la fuente, carga y D-STATCOM. Fuente: Elaboración propia.

La figura 7.15 muestra en línea de trazo continuo de color azul los valores de set-point. Entre 0 s y 0.05 s los IGBT's se encuentran bloqueados, después de este tiempo se habilitan los IGBT's. Después de 0.1 s cambia de valor $ID_setpoint$ mientras que $IQ_setpoint$ continua

en cero. Luego en 0.15 s el valor de $I_Q_setpoint$ cambia. Los valores asignados de +40 A para $ID_setpoint$ y +40 A para $IQ_setpoint$ fueron asignados de manera arbitraria.

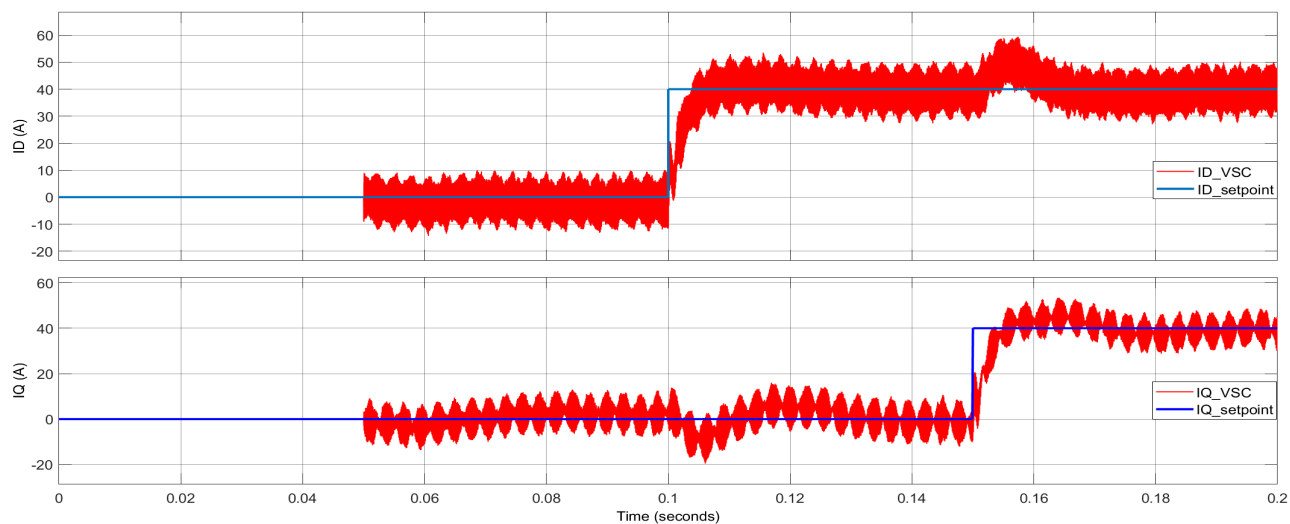


Figura 7.15. Comparación corrientes I_D e I_Q con su respectivo set-point. Fuente: Elaboración propia.

Se nota que en 0.1 s la corriente IQ_VSC presenta una perturbación, pero esta se estabiliza nuevamente a su valor de cero.

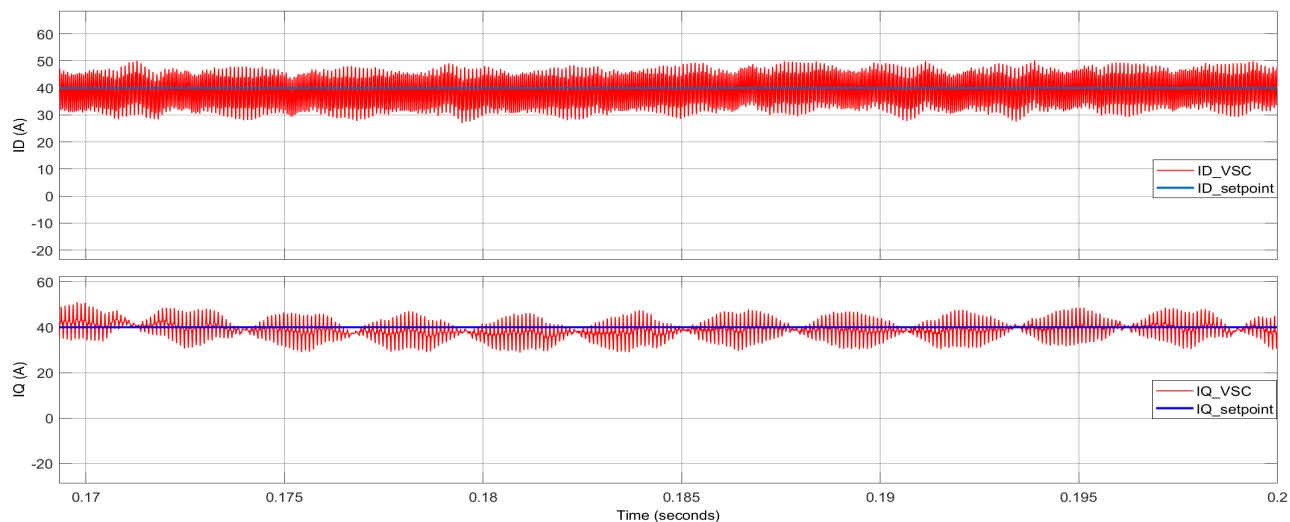


Figura 7.16. Acercamiento de comparación corrientes I_D e I_Q con su respectivo set-point. Fuente: Elaboración propia.

En 0.15 s cuando $IQ_setpoint$ cambia de valor, se nota una perturbación en la corriente ID_VSC . Esto nos confirma que el sistema de control desacopla las variables ID_VSC e IQ_VSC . Ahora la grafica 7.16 es la misma grafica de la figura 7.15 pero en un tiempo mas pequeño, de aproximadamente 3 ms. Se detalla el efecto de la portadora de 10 kHz sobre un valor

promedio igual al valor del set-point.

Graficando la potencia activa y reactiva de la fuente, la carga y el D-STATCOM tendríamos un comportamiento como el de la figura 7.17.

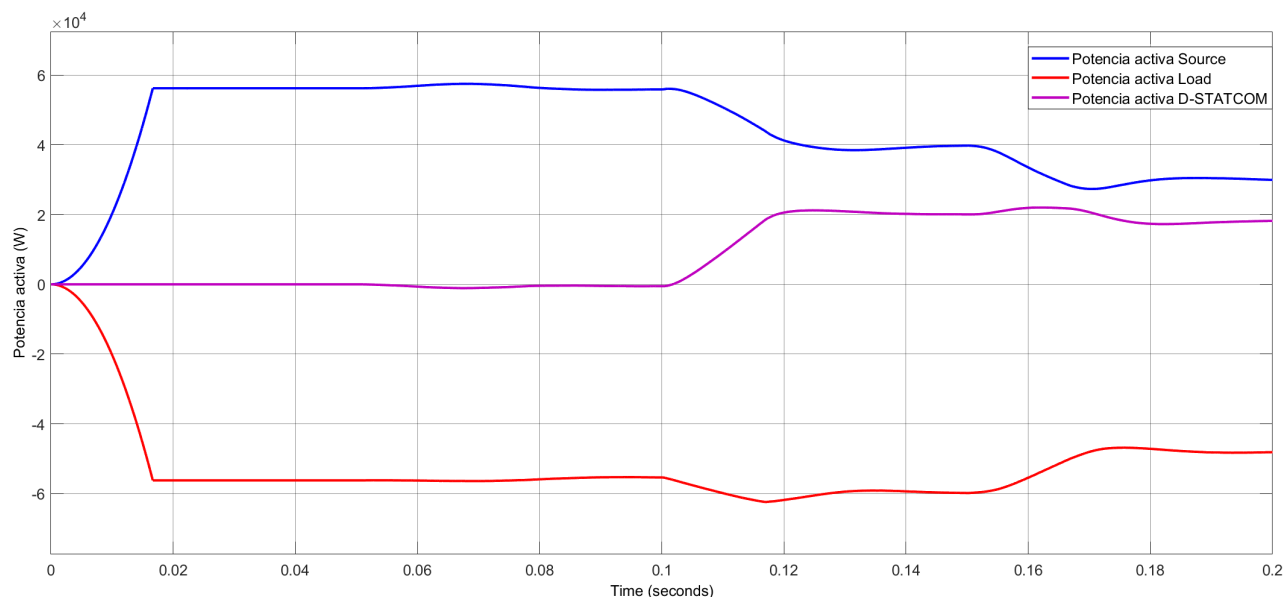


Figura 7.17. Potencia activa fuente, carga y D-STATCOM. Fuente: Elaboración propia.

La figura 7.17 muestra desde 0 s hasta 0.1 s que la fuente entrega la potencia activa que la carga pide. Luego de 0.1 s como cambio el valor de $ID_{setpoint}$ de 0 a +40 amperios, se nota un aporte de potencia reactiva al PCC haciendo que la fuente baje su valor. El total de la potencia activa que consume la carga la entrega la fuente y el D-STATCOM.

El D-STATCOM no está operando como tal, ya que su fin es compensar reactiva, mas no entregar activa, pues requeriría de una fuente DC externa como se está haciendo en esta simulación, para que este convierta su potencia en AC. *Solo para la prueba de los lazos de control de corriente es que se ha conectado una fuente DC externa.*

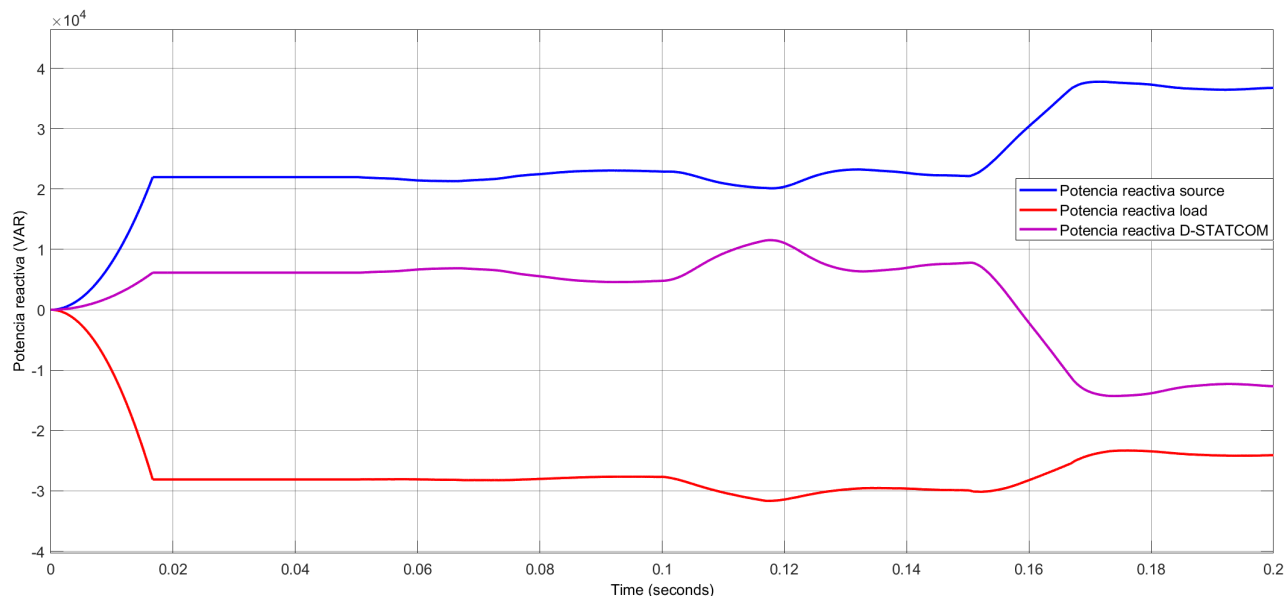


Figura 7.18. Potencia reactiva fuente, carga y D-STATCOM. Fuente: Elaboración propia.

Ya la figura 7.18 nos muestra su contraparte de potencia reactiva. La fuente y el compensador registran una potencia reactiva positiva desde 0 s hasta 0.1 s . Hay que anotar que el D-STATCOM no está aportando reactiva, sino que el valor mostrado es el consumo del filtro LCL. Después de 0.15 s es que $I_Q\text{ setpoint}$ cambia su valor de $+0$ a $+40$ amperios, mostrando un consumo de potencia reactiva menos lo registrado por el filtro LCL. El total de la reactiva de la carga y el D-STATCOM es entregada por la fuente.

Si se construyen bloques en Simulink con la ecuación (6.13) para que en vez de dar un valor de set-point en corriente I_D , se podría dar al D-STATCOM un set-point en potencia activa deseada a consumir o aportar al SEP. De la misma manera se puede aplicar lo anterior para generar la corriente I_Q a partir de un valor de potencia reactiva que se desee a consumir o aportar al SEP como se detalla en la parte inferior de la figura 5.4 de la sección 5.1.3.

Valores positivos de corriente I_D representan consumo de potencia activa del PCC, y valores negativos de esta representan entrega de potencia activa del PCC. En cuanto a I_Q y la potencia reactiva, valores positivos de corriente I_Q representan consumo de potencia reactiva del PCC y valores negativos de I_Q representan aporte de potencia reactiva al PCC.

7.2.2. Simulación del D-STATCOM sin fuente externa de tensión DC

En esta sección se reemplazara la fuente DC ubicada en el subsistema del puente trifásico de IGBT's por un condensador de valor de $5600\ \mu F$. El propósito en esta sección es simular al D-STATCOM para solo *compensar potencia reactiva*, para esto debe absorber un pequeño valor de potencia activa para compensar sus pérdidas internas, manteniendo la tensión en el bus DC en un valor preestablecido y además pueda compensar la cantidad de potencia reactiva necesaria para *mantener el valor de la tensión en el PCC* en un valor anteriormente fijado.

línea discontinua los bloques añadidos del lado del controlador en el eje d , quedando el sistema de control del eje d como un sistema de control en cascada.

Autores como (Haber, Arenas, Matia, Villalonga, y Fontanet, 2018), (Rice, 2010), (Lipták, 2013) y en páginas como (Mathworks, s.f.), se explica que en sistema en cascada, similar al de la figura 7.19 en el eje D , la dinámica del lazo de control D debe ser al menos 10 veces más rápida que la dinámica del control del bus DC, que es quien dará el set-point ID .

Con el fin de sintonizar el controlador PI del voltaje del bus DC utilizando $PIDTurner$ de Matlab, se procederá a aplicar de manera similar el bloque propuesto por (Iravani y Yazdani, 2010, pag 237), mostrado en la figura 7.20.

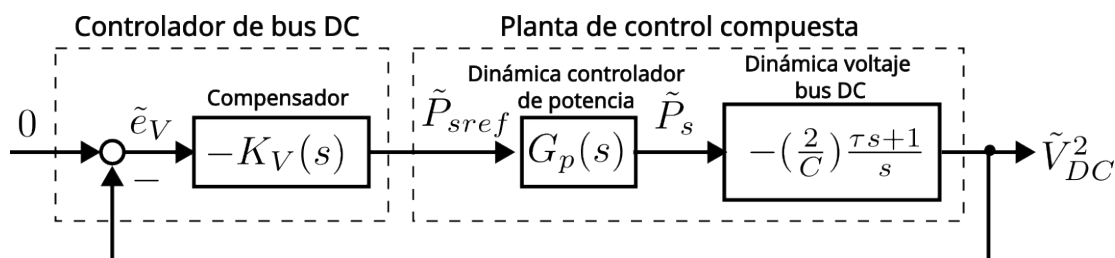


Figura 7.20. Diagrama de bloque control bus DC. Fuente: (Iravani y Yazdani, 2010, pag 237).

El bloque G_p o compensador de potencia, enunciado el autor, se puede sustituir con el mismo bloque G_i , utilizado como planta en la figura 6.7. El bloque de *dinámica voltaje bus DC* puede simplificarse, ya que la variable τ es grande según comenta el mismo autor quedando simplificado el bloque de la siguiente manera:

$$\text{Dinámica voltaje bus DC} = -\frac{2}{C} \frac{1}{s} \quad (7.4)$$

Para realizar la sintonía del compensador PI usando bode, se asignará en $PIDTurner$, como ancho de banda el valor de un décimo del ancho de banda del sistema $k_p * G_i$ en lazo abierto, esto es, $960/10$ o 96 rad/s y un margen de fase de 80 grados, como se muestra en la figura 7.21.

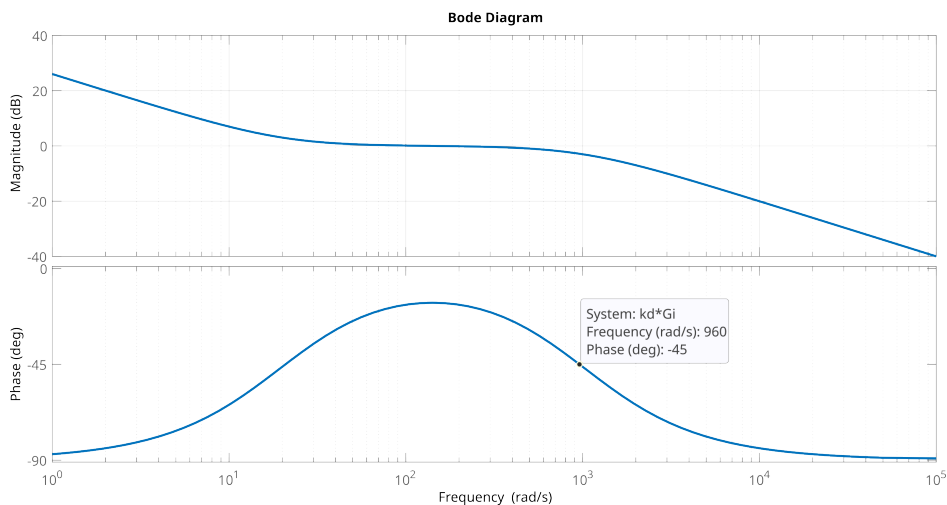


Figura 7.21. Diagrama de Bode en lazo abierto del eje D . Fuente: Elaboración propia.

Se construyen los diagramas de bloques en Simulink mostrado en la figura 7.22.

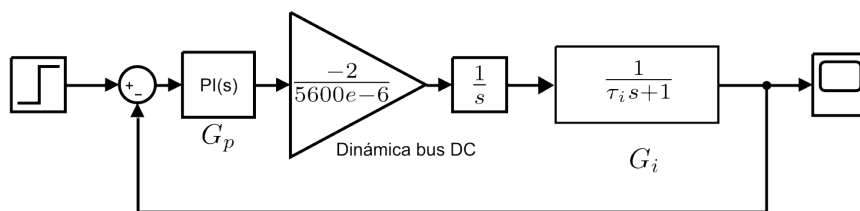


Figura 7.22. Diagrama de bloques control bus DC en Simulink. Fuente: Elaboración propia.

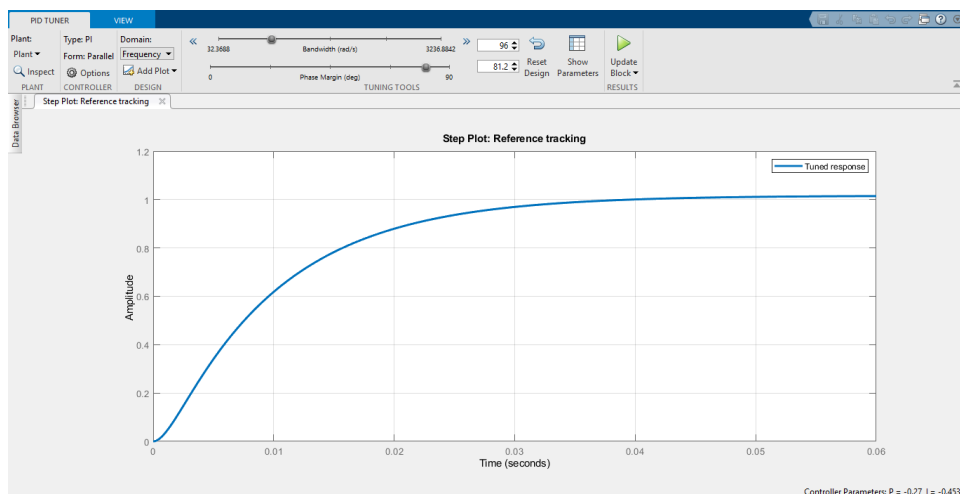


Figura 7.23. Cálculo parámetros compensador voltaje bus DC con PID Turner de Simulink. Fuente: Elaboración propia.

Los valores calculados en el PID Turner se muestran en la tabla 7.3. Las ganancias han

dados negativos, pero se han escrito con signo positivo, ya que en el diagrama de bloques del control en la figura 7.19 se agrego un bloque con ganancia -1 en el lazo.

Tabla 7.3. Ganancias compensador del voltaje bus DC

Variable	Valor	Comentario
kp_{VDC}	0.27	Ganancia proporcional bus DC
ki_{VDC}	0.4536	Ganancia integral bus DC

La figura 7.24 muestra la tensión en el bus DC. Al condensador se le da un valor de condición inicial de 1000 V y por esto en la grafica en el tiempo 0 segundos su tensión es de 1000 V. Se continua con un cambio en $ID_setpoint$ a los 0.15 s como se hizo en la simulación con fuente y por eso se nota la perturbación en la tensión del bus DC. Se concluye que el controlador PI del bus DC controla correctamente la tensión.

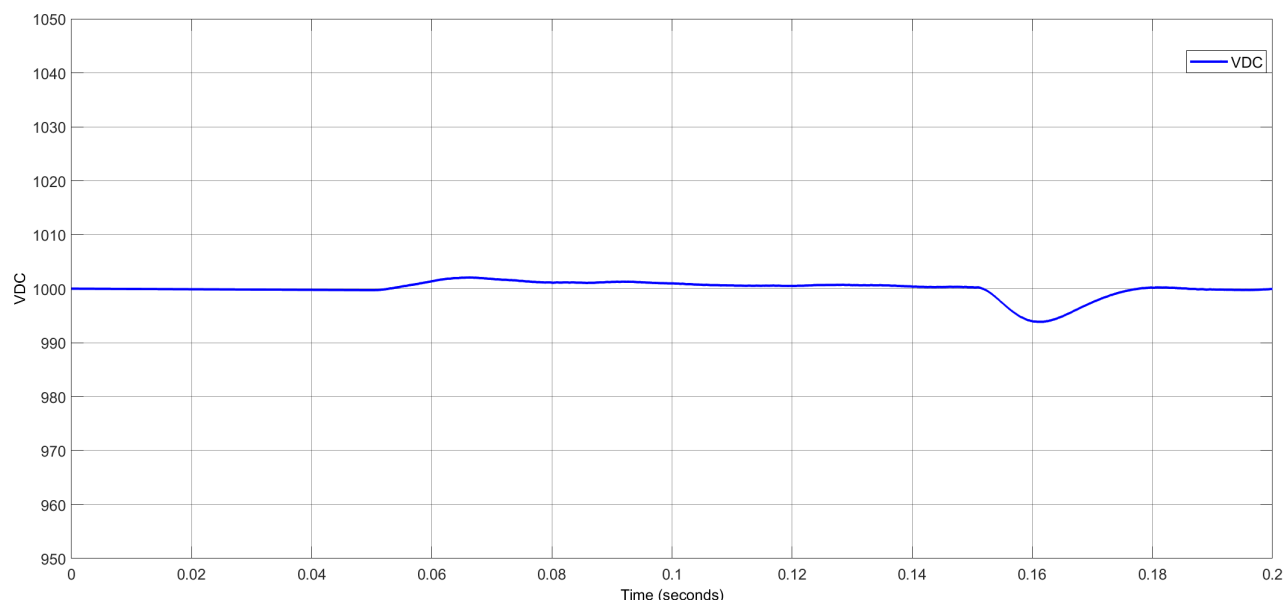


Figura 7.24. Voltaje del bus DC. Fuente: Elaboración propia.

La figura 7.25 muestra la potencia activa de la fuente, de la carga y del D-STATCOM. Es de interés en esta grafica notar como el D-STATCOM busca mantener el consumo de potencia activa en un valor cercano a 0 kW. La fuente entrega la potencia activa que la carga le pide al PCC.

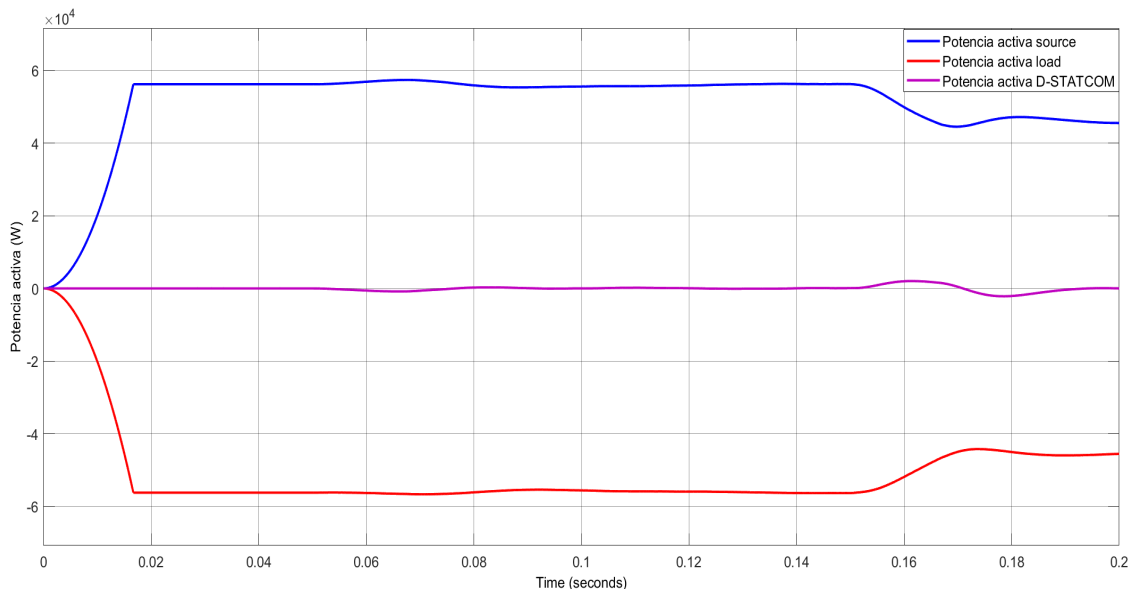


Figura 7.25. Potencia activa fuente, carga y D-STATCOM con control del bus DC. Fuente: Elaboración propia.

Las potencias reactivas son mostradas en la figura 7.26 en donde antes del tiempo 0.15 s la potencia reactiva que entrega la fuente y el D-STATCOM al PCC es consumida por la carga, recordando que el valor de potencia reactiva registrado para el D-STATCOM en el realidad es el consumo de potencia reactiva del filtro LCL.

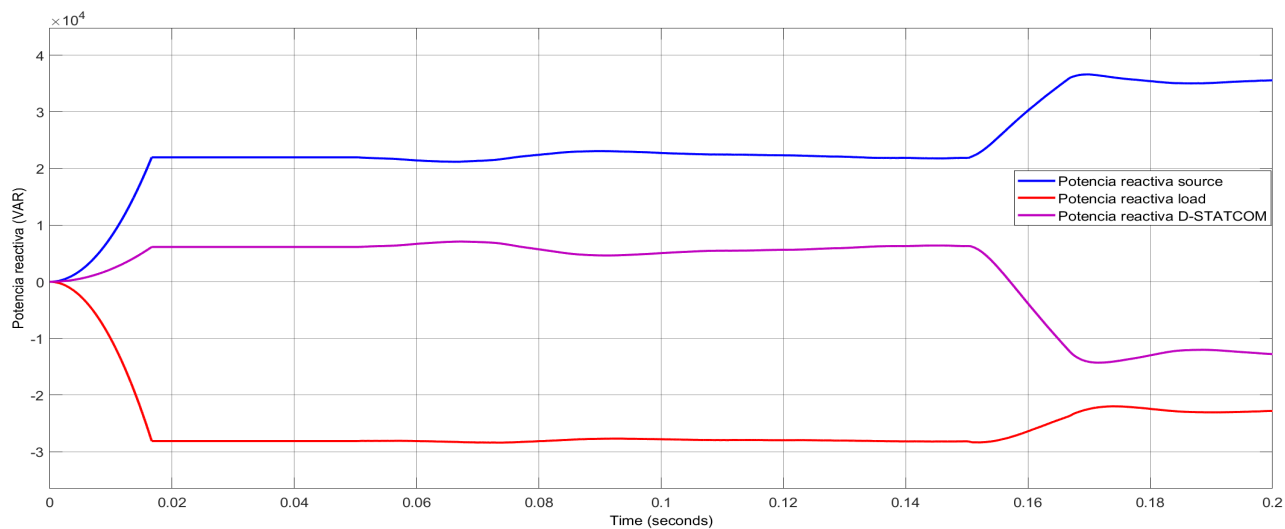


Figura 7.26. Potencia reactiva fuente, carga y D-STATCOM con control del bus DC. Fuente: Elaboración propia.

Pasados los 0.15 s el D-STATCOM comienza realmente a consumir un flujo de potencia reactiva. La fuente debe entregar potencia reactiva al D-STATCOM, al filtro LCL y a la carga.

7.2.2.2. Control de la tensión del PCC. Una vez es posible controlar la tensión del bus DC ante la inyección de flujo de potencia reactiva al PCC, como se realizó en la sección 7.2.2.1, se agregaron unos bloques para controlar la tensión del PCC. Para lograr esto, la componente en el eje D de la tensión V_{PCC} , se ajusta mediante el aporte o consumo de potencia reactiva Q . Esto se logra generando el valor de corriente $I_{Qsetpoint}$ requerido, de acuerdo a la potencia Q que calcula el sistema, y logrando mantener la I_{Qvsc} necesaria. Se agregaron al lazo de control antes del valor $I_{Qsetpoint}$ un compensador que reciba como entrada el error entre el valor del valor deseado voltaje a mantener en el PCC V_{Dref} (391V) y la componente en el eje D del voltaje medido en el PCC V_{PCC} , dato tomado en el barraje B2 según la figura 7.1. Los bloques serán construidos aplicando la ecuación (5.65) de la sección 5.3.2. Los lazos de control modo corriente del D-STATCOM quedan contruidos como se muestra en la figura 7.27.

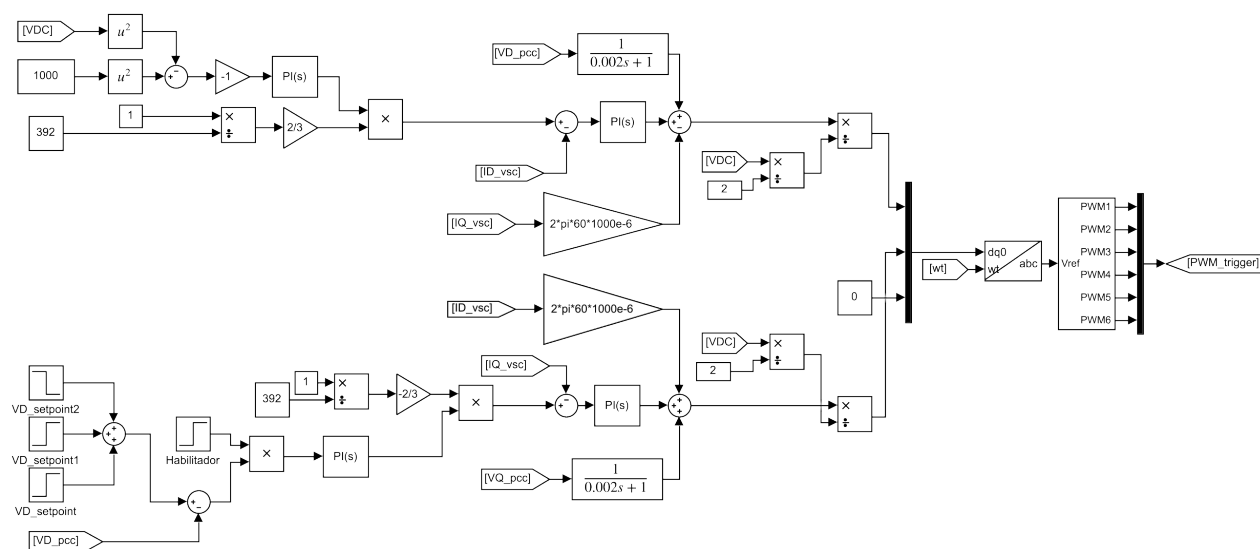


Figura 7.27. Diagrama completo del control modo corriente del D-STATCOM. Fuente: Elaboración propia

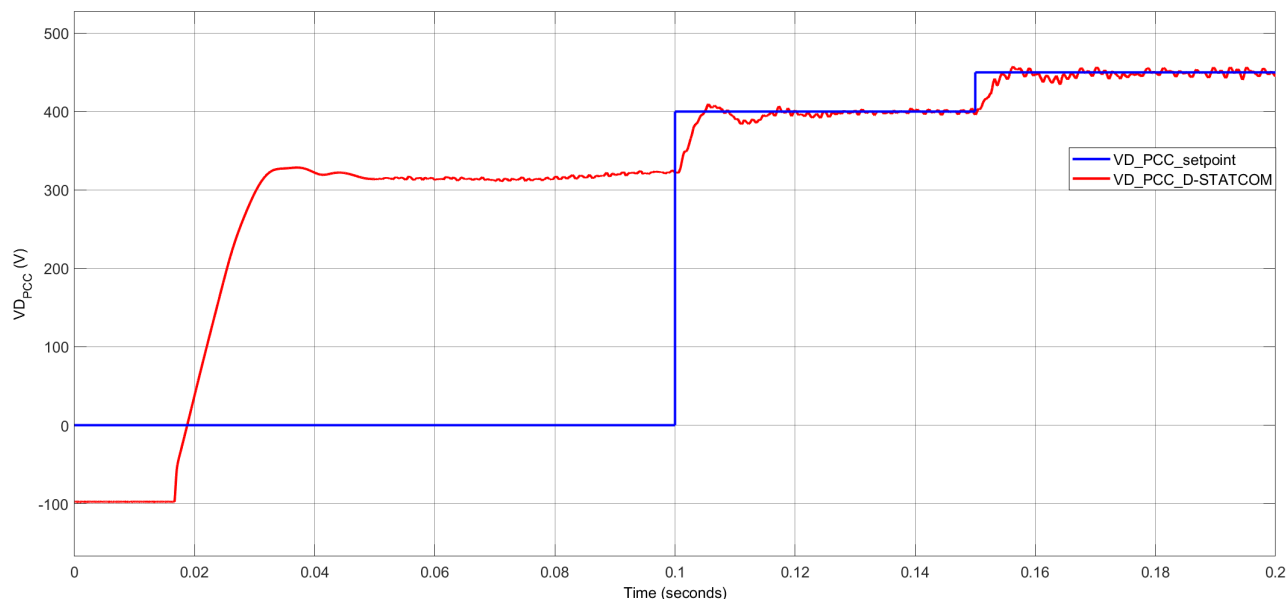


Figura 7.28. Comparación de tensión $VD_setpoint$ y VD_PCC controlada por el D-STATCOM. Fuente: Elaboración propia.

Antes de explicar la figura 7.28 se debe comprender que la tensión en el PCC es trifásica balanceada y al tomar esas tres tensiones y realizar una transformación al marco de referencia $dq0$ obtenemos un fasor espacial rotando junto con el marco de referencia a una velocidad ω . Su proyección al eje real e imaginario, es decir eje directo D y eje en cuadratura Q respectivamente representan en este caso para el PCC una tensión V_{D_PCC} y V_{Q_PCC} . El valor de la tensión V_{D_PCC} corresponde al valor del voltaje pico de la tensión de fase del sistema trifásico en el marco de referencia abc , ya que se ajusta el marco de referencia para que la proyección del fasor espacial en eje Q sea cero. Por este motivo en el D-STATCOM se controla V_{D_PCC} y es la curva que se muestra en la figura 7.28.

Para la determinación de las ganancias del controlador PI del lazo de control de tensión del PCC se determinan de forma similar al control de tensión del bus DC. Los valores son los mostrados en la tabla 7.4

Tabla 7.4. Ganancias compensador de la tensión AC

Variable	Valor	Comentario
kp_{VAC}	1200	Ganancia proporcional PI tensión AC
ki_{VAC}	150	Ganancia integral PI tensión AC

En la figura 7.28 el trazo en color azul es el set-point preestablecido con el valor en el eje D deseado en tensión para el PCC. Este inicia en un tiempo de 0.1 s. El trazo en color rojo corresponde al V_D medido de la tensión del PCC en el barraje B2. Se ve como la curva de trazo rojo se va acercando al set-point o tensión deseada en el PCC.

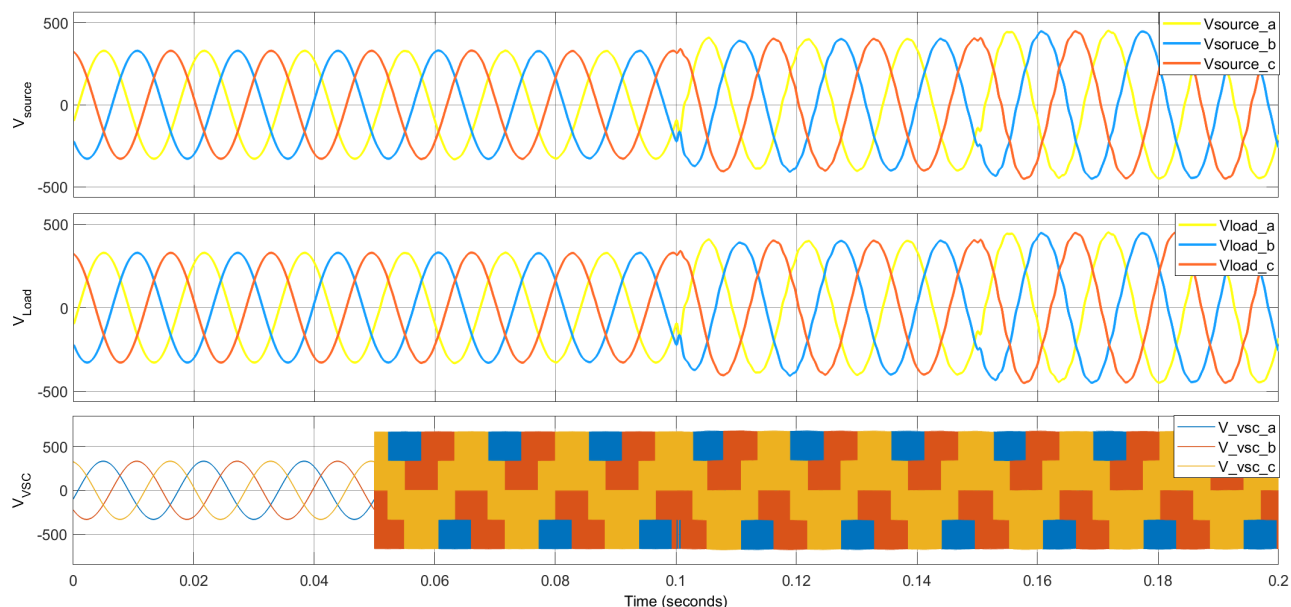


Figura 7.29. Tensiones *abc* fuente, carga y D-STATCOM. Fuente: Elaboración propia.

La grafica 7.29 muestra las tensiones *abc* tanto de la fuente, como de la carga. En el 0.1 s el valor de $VD_setpoint$ se fijo en 400 V y por tal motivo el voltaje pico a partir de ese tiempo pero antes de 0.15 s esta en 400 V pico. Luego de los 0.15 s el valor de $VD_setpoint$ se aumenta hasta llegar a 450 V. Por lo anterior la tensión en el PCC se estable hasta 450 V pico.

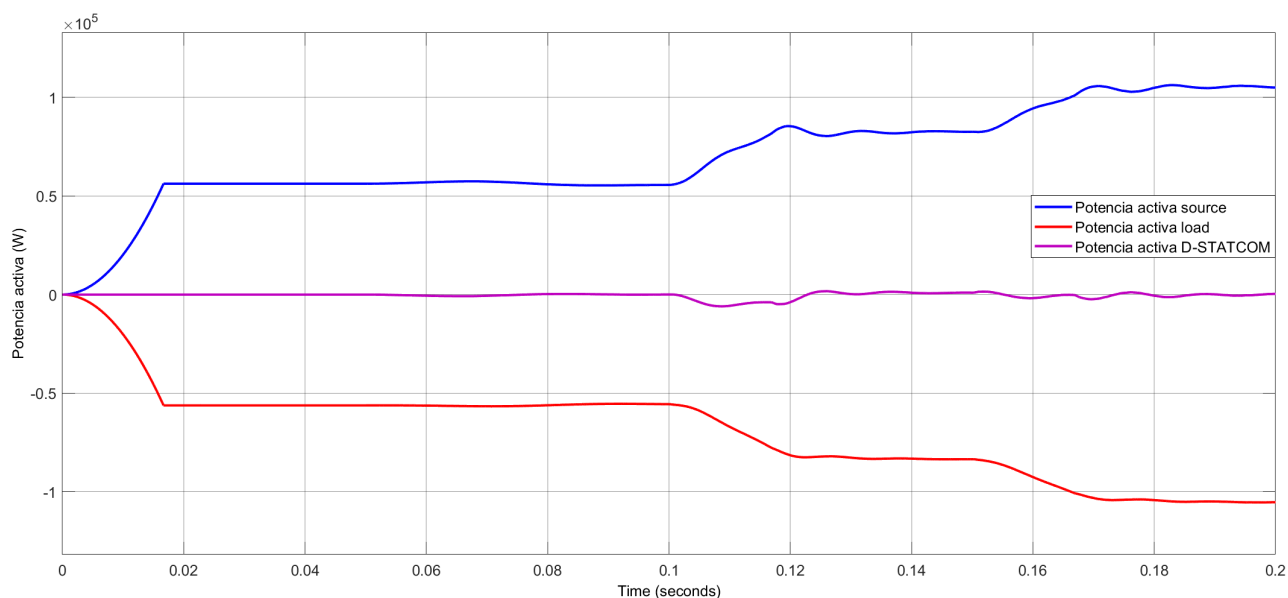


Figura 7.30. Potencia activa de la fuente, carga y D-STATCOM. Fuente: Elaboración propia.

La figura 7.30 es similar a la figura 7.25, mientras que a grafica de la potencia reactiva del D-STATCOM mostrada en la figura 7.31 el D-STATCOM debe aumentar el flujo de poten-

cia reactiva que aporta al PCC para obligar a subir la tensión primero a 400 V pico y luego de los 0.15 s hasta los 450 V pico. Se concluye que el D-STATCOM esta cumpliendo la función de mantener la tensión del PCC en el valor deseado por el $VD_setpoint$.

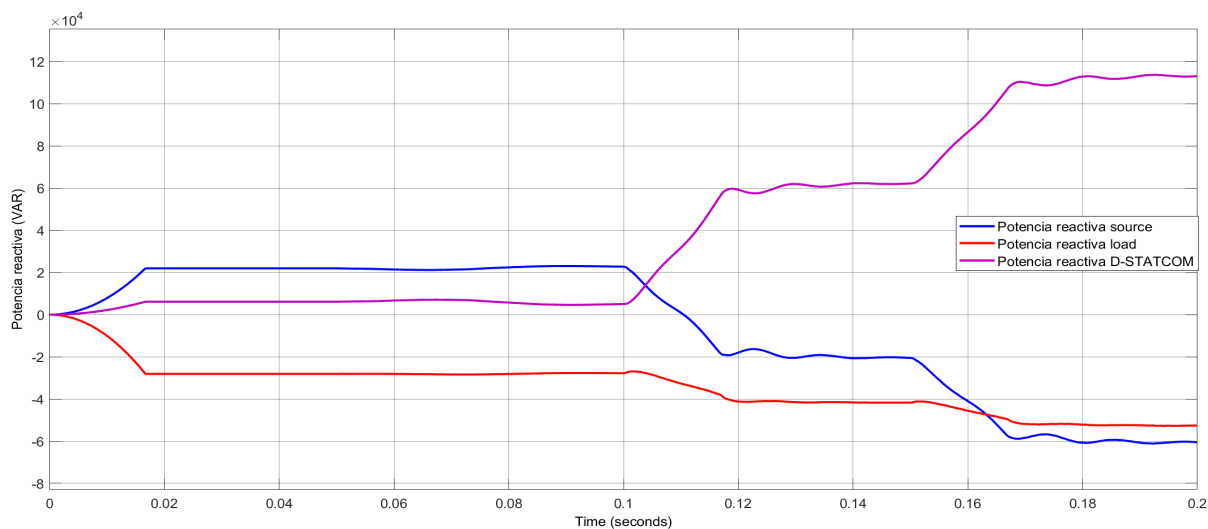


Figura 7.31. Potencia reactiva de la fuente, carga y D-STATCOM. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 7.32 se nota los transitorios en la tensión del bus DC, en los tiempos 0.1 s y 0.15 s debido al cambio del set-point del control de la tensión del PCC.

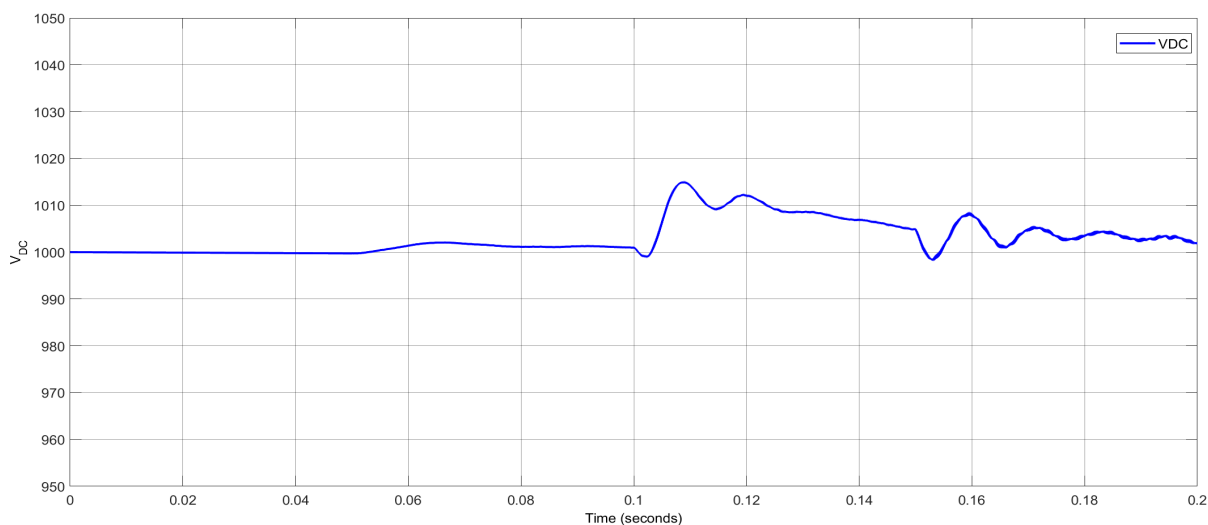


Figura 7.32. Voltaje del bus DC con transitorio en 0.2 s con control de la tensión PCC. Fuente: Elaboración propia.

8. ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo se validarán los resultados obtenidos del D-STATCOM mostrados en el capítulo 6 de *desempeño del D-STATCOM*. Se contrastarán los resultados de las simulaciones con los datos a obtener de un modelo simplificado del D-STATCOM. Este se implementará y construirá a partir de ecuaciones planteadas en el capítulo 4 del marco teórico sobre compensadores estáticos y del capítulo 5 de modelado dinámico.

8.1. Bloques de control con fuentes de voltaje controladas

Partiendo de las ecuaciones (8.1) y (8.1) que fueron presentadas en la sección 6.1 tenemos:

$$V_{td}(t) = \frac{V_{DC}}{2} m_d(t) \quad (8.1)$$

$$V_{tq}(t) = \frac{V_{DC}}{2} m_q(t) \quad (8.2)$$

e igualmente si observamos la figura 6.3 de la sección 6.1 obtenemos las siguientes ecuaciones:

$$m_d = \frac{u_d + V_{sd} - i_q L \omega_0}{\frac{V_{DC}}{2}} \quad (8.3)$$

$$m_q = \frac{u_q + V_{sq} + i_d L \omega_0}{\frac{V_{DC}}{2}} \quad (8.4)$$

si comparamos la ecuación (8.1) con (8.3) y (8.2) con (8.4) se puede deducir que:

$$V_{td} = u_d + V_{sd} - i_q L \omega_0 \quad (8.5)$$

$$V_{tq} = u_q + V_{sq} + i_d L \omega_0 \quad (8.6)$$

8.2. Modelo simplificado del D-STATCOM

El modelo simplificado del compensador, reemplazara al subsistema de generación de señal PWM y al puente trifásico de IGBT's. Para el primero se utilizarán las ecuaciones (8.5) y (8.5) y para el segundo se utilizarán tres fuentes de tensión controladas por tensión, para comprobar que el comportamiento del D-STATCOM expuesto en el capítulo 7, es el indicado según la teoría planteada. Los bloques del sistema de control seguirán siendo los mismos y los controladores usarán las mismas ganancias utilizadas en el capítulo 6. No habrá condiciones de presencia de armónicos ya que no estará el puente de IGBT's en el sistema simulado. La ausen-

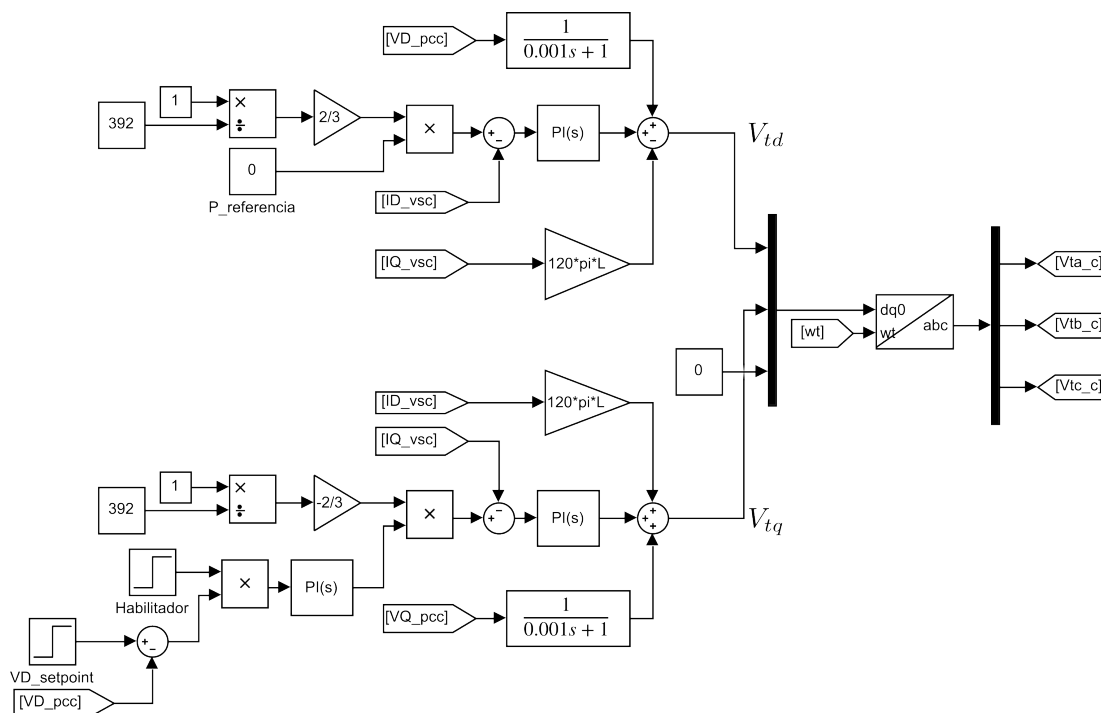


Figura 8.2. Diagrama de bloques del D-STATCOM con control de las fuentes de voltaje dependientes. Fuente: Elaboración propia.

En el lazo de control del eje Q se ha agregado un bloque llamado *habilitador*, cuyo fin es proporcionar un cero al controlador PI (k_q) hasta que no sea el tiempo de cambio de set-point para regular la tensión en el PCC. Al no agregarlo estaría entrando un valor diferente de cero al compensador de tensión, y este a su vez entregando un valor diferente de cero al set-point del compensador k_q .

8.3. Comparación de respuestas de los modelos de D-STATCOM

Para hacer posible la comparación de las respuestas del D-STATCOM del capítulo 7 y el presente capítulo se incluyó en un mismo modelo de Simulink dos SEP y dos sistemas de control, para de esta forma incluir en un mismo graficador las respuestas de los dos modelos. La figura 8.3 nos muestra la respuesta del D-STATCOM y del compensador con fuentes de tensión dependientes contra una respuesta escalón a 400 V y el cambio se da en 0.1 s.

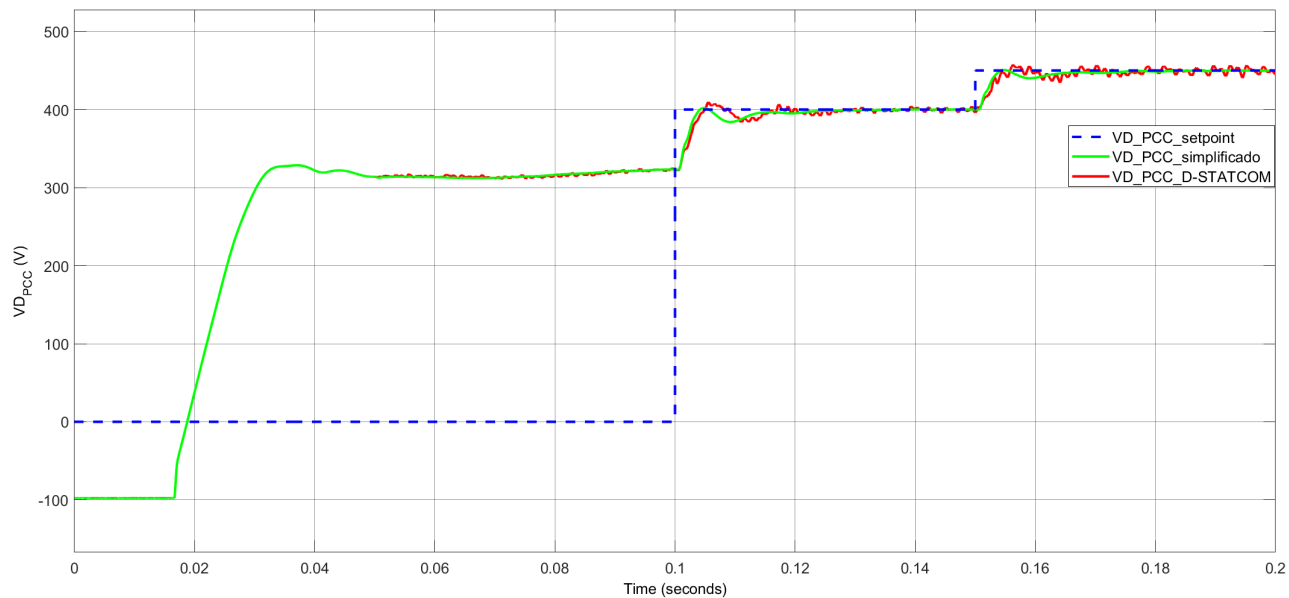


Figura 8.3. Comparación de respuestas VD_PCC con curvas superpuestas. Fuente: Elaboración propia.

En esta figura vemos las dos respuestas mas no se detallan la curvas después de la excitación al escalón. En las siguientes figuras se presentará con mas detalle la comparación de cada curva versus la curva del set-point y luego las tres curvas superpuestas.

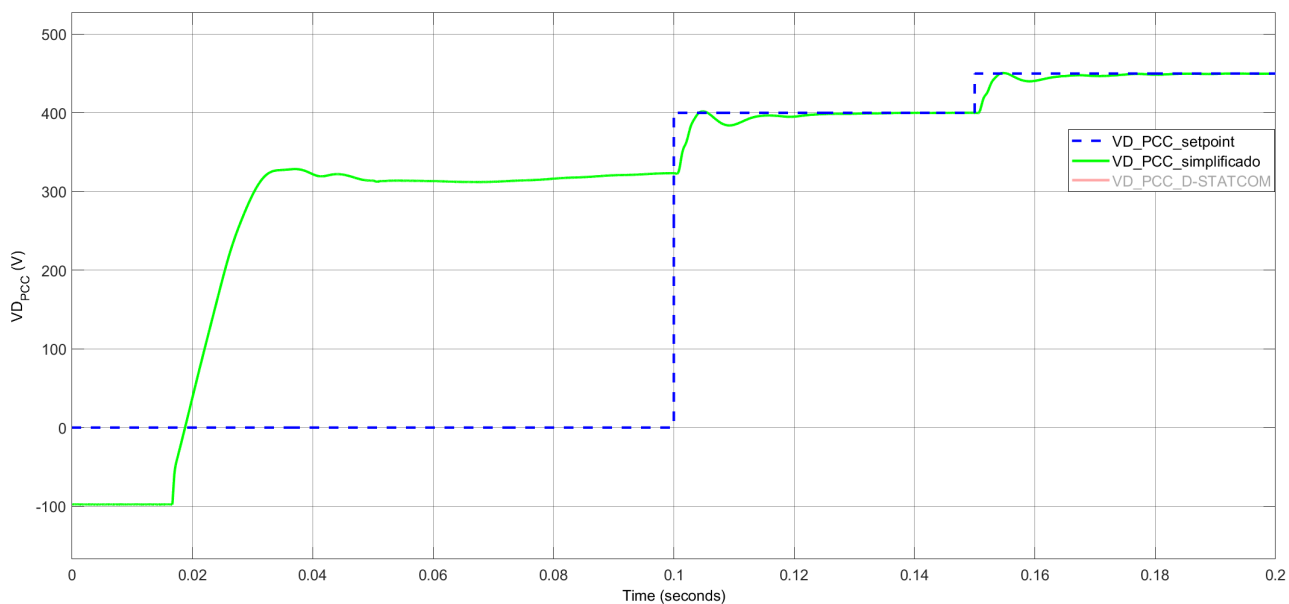


Figura 8.4. Comparación de respuestas VD_PCC. Fuente: Elaboración propia.

La figura 8.4 muestra en azul con trazo discontinuo la curva del VD_setpoint o valor deseado a seguir en el control modo corriente y de color rojo continuo la curva de respuesta

VD_PCC_simplificado, es decir de la simulación con un compensador conformado por las fuentes de tensión dependientes. Esta desactiva la presentación de la curva VD_PCC_D-STATCOM.

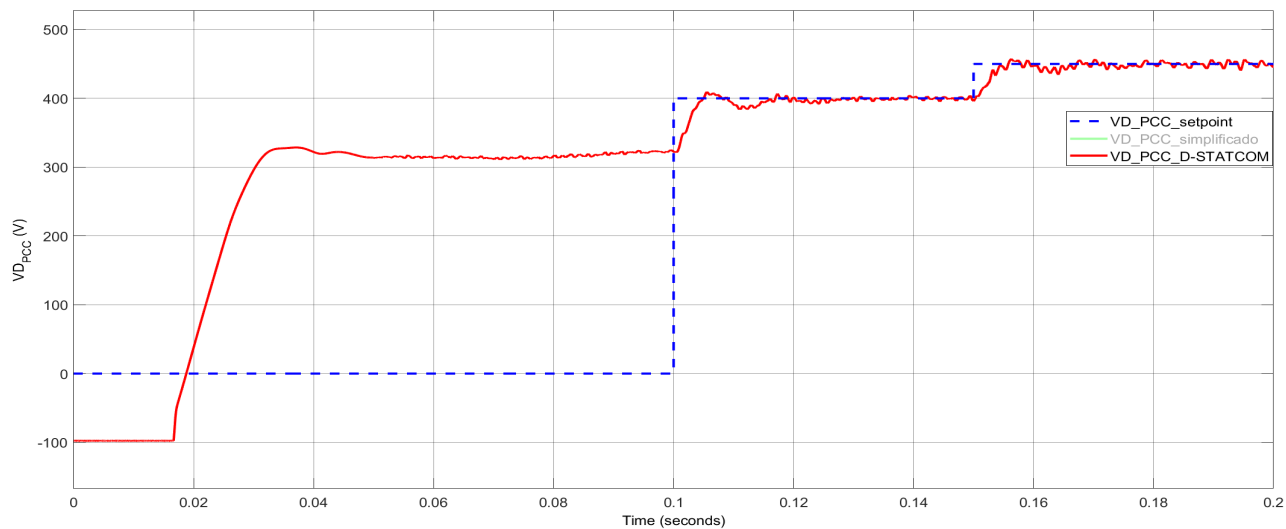


Figura 8.5. Comparación de respuestas VD_PCC . Fuente: Elaboración propia.

En la figura 8.5 la curva de color rojo continua representa el comportamiento de la tensión $VD_PCC_D-STATCOM$ versus $VD_setpoint$. Se nota los cambios bruscos debido a la velocidad del control para los disparos de los transistores. En esta figura esta desactivada la presentación de la curva $VD_PCC_simplificado$.

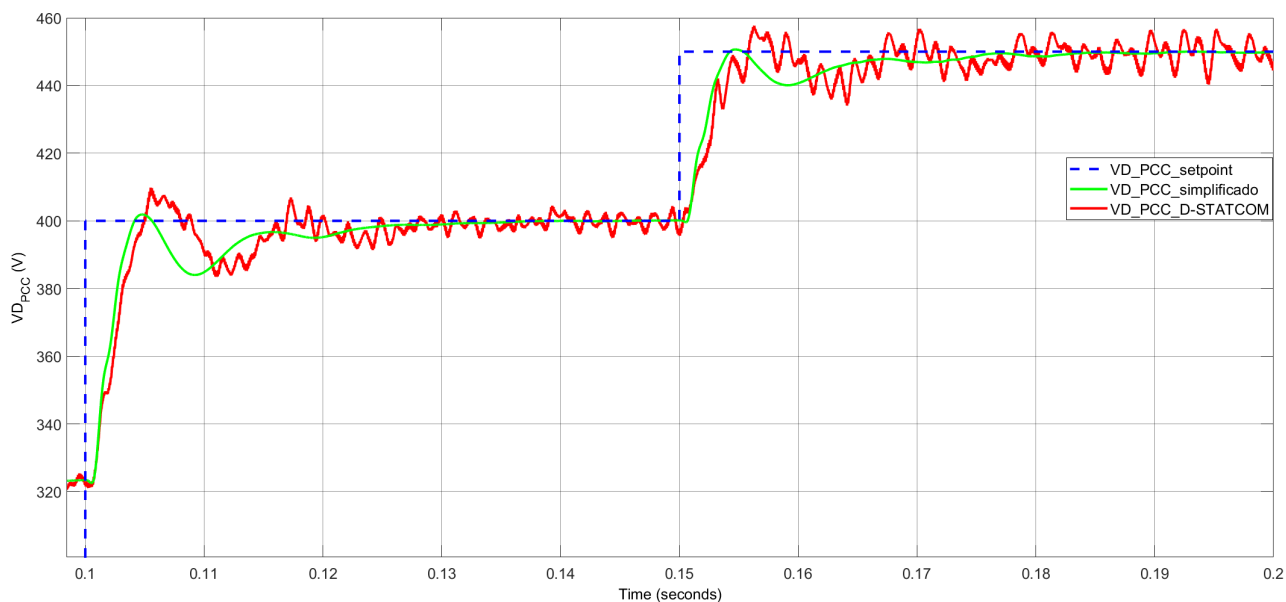


Figura 8.6. Comparación de respuestas VD_PCC , acercamiento. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 8.6 se muestran las tres curvas superpuestas. La curva generada por el sistema de control con fuentes de tensión controladas es más suave que la generada por el D-

STATCOM con elementos de conmutación.

Como conclusión el modelo realizado para el D-STATCOM con puente de IGBT's cumple con el comportamiento mostrado por el modelo simplificado construido en base a las ecuaciones teóricas planteadas con fuentes de tensión dependientes.

8.4. Análisis de respuesta transitoria y estacionaria

Basados en el autor (Ogata, Canto, y Canto, 2010), se determinaran algunas de las características de la respuesta del VD_PCC tanto para el modelo del D-STATCOM como para el modelo simplificado. Para el análisis de respuesta transitoria y estacionaria se utilizara la herramienta cursor measurements del scope de Simulink.

La tabla 8.1 registra los datos de tiempo de retardo y tiempo de asentamiento mostrados en las graficas de las figuras 8.7 y 8.8.

Tabla 8.1. Registros tiempo de retardo y tiempo de asentamiento. Fuente: Elaboración propia.

Característica	Modelo simplificado	D-STATCOM	Comentario
t_d	0.117	0.121	Tiempo de retardo
t_s	0.104	0.105	Tiempo de establecimiento

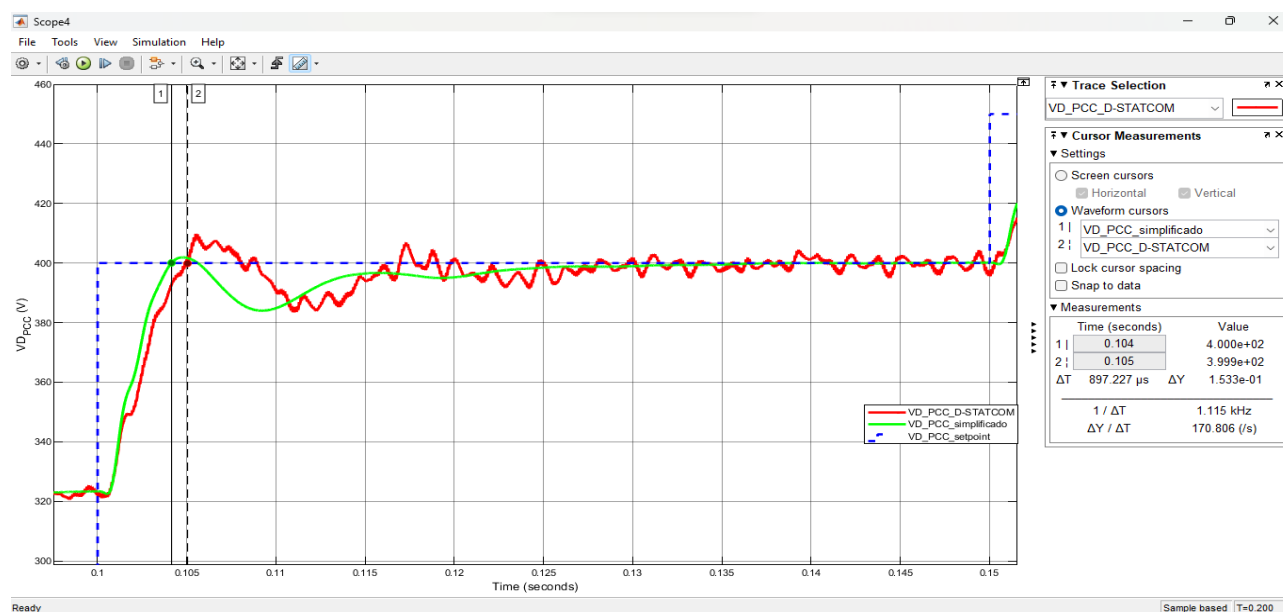


Figura 8.7. Comparación tiempo de retardo t_d . Fuente: Elaboración propia.

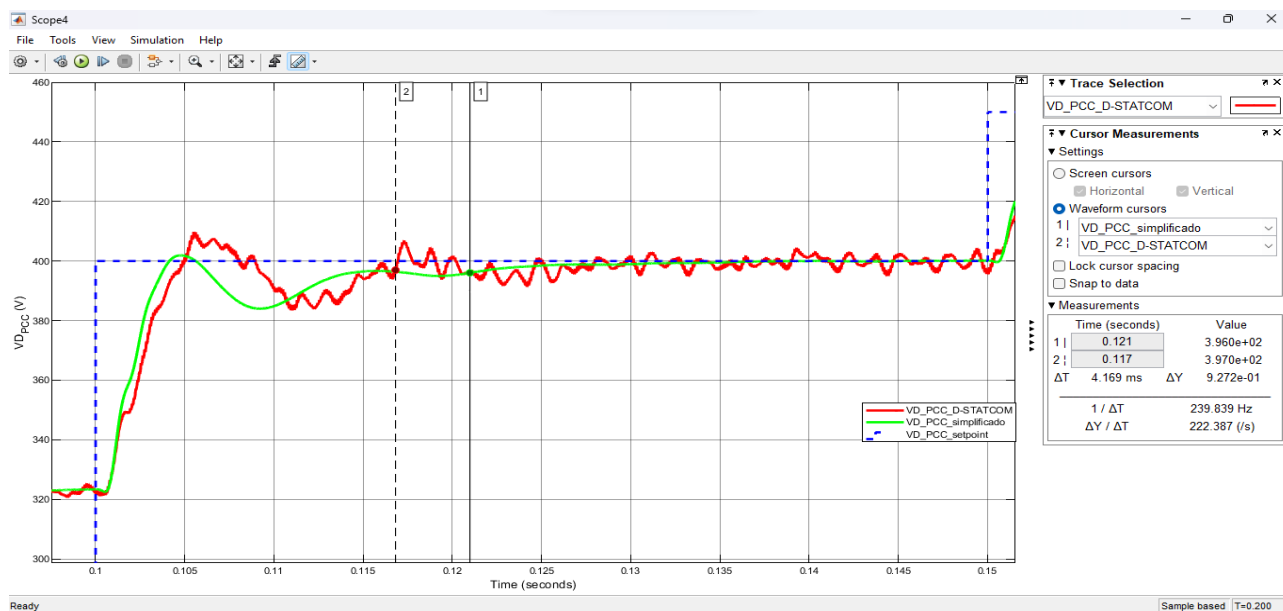


Figura 8.8. Comparación tiempo de asentamiento t_s . Fuente: Elaboración propia.

8.5. Índices de desempeño

Los métodos EPI (índice de rendimiento de errores), ofrecen una mejor respuesta de un sistema al anular efectivamente los errores de estado estacionario según (Clark, 2013). Partiendo de lo anterior en Simulink de Matlab se añaden bloques dentro de la simulación ya se realiza, para el cálculo de los índices de desempeño del error. El cálculo se realiza a los siguientes índices:

Tabla 8.2. Índices de desempeño del error. Fuente:(Castaño Giraldo, 2021)

Índice	Comentario
ISE	Integral square-error criterion (criterio de la integral del error al cuadrado)
ITSE	Integral of time multiplied squared error criterion (Integral del error cuadrado multiplicado por el tiempo)
IAE	Integral Absolute Error Criterion (Criterio de la integral del valor absoluto del error)
ITAE	Integral of time multiplied Absolute Error Criterion (Criterio de la integral del valor absoluto del error multiplicado por el tiempo)

Los valores calculados para los índices de desempeño de error se muestran en la tabla 8.3 y fueron calculados en un tiempo desde 0.1 s y 0.13 s

Tabla 8.3. Tabla de índices de error de los lazos de control los ejes k_d y k_q

Índice de error	Lazo k_d	Lazo k_q
ISE	5,061	32,34
IAE	0,2801	0,5537
ITSE	0,543	3,318
ITAE	0,03092	0,05831

En la sección 9 de conclusiones y resultados se comentarán acerca de los resultados presentados en la tabla 8.3

8.6. Error medio cuadrático

RMSE (Root Mean Square Error) es la cuantificación de la diferencia entre los valores predichos por un modelo y los valores observados (Gonzalez, 2018). Su cálculo se realiza como la sumatoria del cuadrado de esta diferencia .

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2} \quad (8.7)$$

Con base en los datos que genera el scope que muestra la figura 8.3 y con la ayuda de un script de Matlab se realiza el cálculo del valor RMSE de la comparación de la respuesta de la tensión VD_PCC_D-STATCOM contra VD_setpoint, el valor RMSE de la comparación de VD_PCC_simplificado contra VD_setpoint y el valor RMSE de la comparación de VD_PCC_D-STATCOM contra VD_setpoint. A la función a utilizar para el cálculo del valor RMSE se le da el nombre rmse.m y el script es el siguiente:

```
1 function rmse (data , estimate)
2 r = sqrt( sum (( data (:) - estimate (:) ).^2 ) / numel (data))
```

El script para utilizar con el vector de valores exportados por scope de VD es el siguiente:

```
1 VD_PCC_DSTATCOM_temp = out.VD_PCC{1}.Values.Data;
2 VD_PCC_simplificado_temp = out.VD_PCC{2}.Values.Data;
3 VD_setpoint_temp = out.VD_PCC{3}.Values.Data;
4 Pfila = 121441; % numero de primera fila en 0.1 segundos
5 Ufila = 242594; % numero de ultima fila
6 VD_PCC_DSTATCOM = out.VD_PCC{1}.Values.Data(Pfila : Ufila);
7 VD_PCC_simplificado = out.VD_PCC{2}.Values.Data(Pfila : Ufila);
8 VD_setpoint = out.VD_PCC{3}.Values.Data(Pfila : Ufila);
9 RMSE1 = rmse (VD_PCC_DSTATCOM, VD_setpoint);
10 RMSE2 = rmse (VD_PCC_simplificado , VD_setpoint);
11 RMSE3 = rmse (VD_PCC_DSTATCOM, VD_PCC_simplificado);
```

En el script se crearon tres variables para el cálculo del RMSE, la primera RMSE1 que la comparación entre los datos del D-STATCOM y VD_setpoint y la segunda RMSE2 para la comparación de los datos del modelo simplificado y VD_setpoint. El valor RMSE3 es el valor de la comparación de los datos del D-STATCOM y el modelo simplificado. Aunque se hizo de esta manera, Matlab no permite la creación más de dos valores con la misma función, por lo que se hace necesario comentar las líneas que contiene la función RMSE que no se va a determinar y luego calcular el valor RMSE deseado a obtener. La operación se repite hasta calcular los tres valores RMSE deseados.

La tabla 8.4 presenta los cálculos realizados en el script de Matlab

Tabla 8.4. Valores calculados de RMSE

Modelo	RMSE	Comentarios
D-STATCOM	13.3702	RMSE calculado entre D-STATCOM y VD_setpoint
Simplificado	12.2815	RMSE calculado entre modelo simplificado y VD_setpoint
Ambos	5.1250	RMSE calculado entre D-STATCOM y modelo simplificado

El análisis de los resultados obtenidos se realizará en el capítulo de conclusiones y recomendaciones.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1. CONCLUSIONES

Al alinear el fasor espacial con el eje D en el marco de referencia dq, se puede estimar con valor cero la proyección de este en el eje Q, facilitando la simplificación de algunas ecuaciones para la modelización del sistema. Aplicando leyes físicas como las leyes de Kirchhoff, se logró plantear las ecuaciones dinámicas que describen el comportamiento del sistema de AC con carga y acoplado a un VSC.

Utilizando Simulink de Matlab se llevó a cabo la simulación del SEP y el sistema de control del VSC para la compensación de la tensión en el PCC. El D-STATCOM exhibe una respuesta rápida ante perturbaciones, siendo efectivo para mantener los niveles de tensión del PCC en rangos aceptables y mejorando así la estabilidad del SEP. Su rápida respuesta de compensación previene caídas de tensión y oscilaciones.

Dado que el D-STATCOM compensa potencia reactiva, contribuye a mejorar el factor de potencia del SEP, lo que resulta en una mejor calidad de la energía para los usuarios finales. Además, al ser un convertidor de DC a AC, similar a los inversores de sistemas de energías renovables, existe la posibilidad de integrar estos últimos como compensadores en el SEP, modificando el algoritmo del sistema de control del VSC.

Para un correcto control de corriente, es indispensable contar con una medición precisa de las variables de tensión del PCC y de las corrientes que inyecta el D-STATCOM. En caso de una medición inadecuada, se produciría un incorrecto aporte o consumo de potencia reactiva al sistema, con la posibilidad de ocasionar inestabilidad y posibles fallas que afecten la coordinación de protecciones del SEP.

El esquema de control modo corriente utilizado en el D-STATCOM, solo puede ser aplicado en sistemas trifásicos balanceados. Se realizó una prueba en la que se simuló la pérdida de una fase en el D-STATCOM y se evidenció la imposibilidad del control en seguir las consignas tanto de i_d como en i_q .

El sistema o planta a controlar, no aparece concentrada en un bloque de función de transferencia como comúnmente se muestra en los textos de control automático. Debido a lo anterior y para facilitar el ajuste de los controladores, se asume que la planta es de primer orden aunque el sistema no es lineal como se determinó en la sección de modelización. El τ del sistema es seleccionado con un valor comprendido entre 0.1 ms y 5 ms (Iravani y Yazdani, 2010). Al realizar pruebas utilizando τ con valor menores a 0.1 ms era obtenida una respuesta del control muy rápida pero en algunas ocasiones el sistema perdía estabilidad. Ahora con pruebas de τ mayores a

5ms, la respuesta del control se hizo lenta. Se concluye que respuestas muy rápidas conducen a sistemas podrían ser inestables y respuestas muy lentas restan la virtud de estos sistemas de control de responder de manera adecuada a perturbaciones y oscilaciones en el SEP.

Las pruebas de cambio de consigna en tensión para el PCC, se realizaron en valores no mayores a 100 V pico, entre la tensión actual y la tensión deseada. Una prueba realizada de cambio de consigna de 320 V pico hasta 470 V pico, evidencio una perdida de control de la tensión del PCC. Al asignar una consigna de 470 V pico por fase, la modulación estuvo en un valor cercano al 1.0, concluyendo que a partir de este valor de consigna el control no respondería correctamente debido a la saturación que ocasionaría al sobre modularse.

La aplicación de diferentes índices de desempeño basados en la integral del error, como el índice ISE, destaca la eficacia del sistema de control. Se observa que el controlador k_d utiliza seis veces más energía que el controlador k_q al realizar la acción de control, mientras que el índice RMSE evidencia que el sistema de control no se siguen tan rápidamente los puntos de consigna como se esperaría, lo que sugiere que el sistema de control puede ajustarse para una mejorar la respuesta. El error al seguir el punto de consigna del modelo del D-STATCOM es mayor que la del modelo simplificado. El índice ITSE indica que el controlador k_q es seis veces más lento que el controlador k_d . Finalmente, el índice IAE, al ser cercano a cero dada la naturaleza subamortiguada del sistema, se destaca como el más adecuado para ser utilizado en el sistema simulado.

9.2. RECOMENDACIONES

Es importante ser balanceados en la relación de las velocidades entre los diferentes controladores del sistema. Se debe tener muy en cuenta las relaciones de ancho de banda y ganancia de estos.

En la literatura se encuentra que el valor de $L\omega_0$ utilizado para desacoplar los sistemas se utiliza como una sola constante que comparte su valor para ser multiplicado con i_d e i_q . De acuerdo a las diferentes pruebas que se realizo al modelo se recomienda crear una constante $L\omega_0$ para ser multiplicada por i_d y crear otra constante diferente con valor $L\omega_0$ para ser multiplicada por i_q . Esto debido a que se nota mejor rendimiento en cuanto a contenidos de armónicos en el sistema con la creacion de dos constantes en vez de una sola.

Referencias

- Akagi, H., Watanabe, E. H., y Aredes, M. (2017, 2). Instantaneous power theory and applications to power conditioning. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. Descargado de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119307181> doi: 10.1002/9781119307181 5.1.3, 6.2
- Anaya-Lara, O., Campos-Gaona, D., Moreno-Goytia, E., y Adam, G. (2014, 4). Appendix a: Voltage source converter topologies. En (p. 223-269). John Wiley & Sons, Ltd. Descargado de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/9781118701638.app1><https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781118701638.app1><https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118701638.app1> doi: 10.1002/9781118701638.app1 4.2, 5.3.1
- Castaño Giraldo, S. A. (2021, abril). *Índices de desempeño*. <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/indices-de-desempeno/>. (Accessed: 2024-1-23) (document), 8.2
- Chapman, S. J. (2011). *Electric machinery fundamentals*. McGraw-Hill Education. Descargado de <https://books.google.com.co/books?id=L1TZtgAACAAJ> 5.1.1, 7.1.1, 7.1.3
- Clark, R. N. (2013, 7). Integral of the error squared as a performance index for automatic control systems. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part II: Applications and Industry*, 79, 467-471. doi: 10.1109/TAI.1961.6371690 8.5
- Contreras, J. P. (2005). Modulación por ancho de pulso (pwm) y modulación vectorial (svm). una introducción a las técnicas de modulación. *El hombre y la maquina*, 70-83. 5.1.3
- Douglas, S. D., Carl, E. B., Christopher, J. M., Robert, J. S., Kenneth, M. M., Thomas, M. G., ... Mark, W. (2005). *Ieee recommended practice for powering and g rounding e l e c t r o n i c e q u i p m e n t* (Vol. 2005). Descargado de http://www2.elo.utfsm.cl/~ipd411/archivos/apuntes/Std1100-2005_Part1.pdf 2
- Edris, A. A., Adapa, R., Baker, M. H., Bohmann, L., Clark, K., Habashi, K., ... Wood, R. R. (1997). Proposed terms and definitions for flexible ac transmission system (facts). *IEEE Transactions on Power Delivery*, 12, 1848-1853. doi: 10.1109/61.634216 2
- Farhad, S., Sumedha, R., y Arindam, G. (2015). *Static compensators (statcoms) in power systems*. 5.1.1
- Gidd, A. R., Gore, A. D., Jondhale, S. B., Kadekar, O. V., y Thakre, M. P. (2019). Modelling, analysis and performance of a dstatcom for voltage sag mitigation in distribution network. *Proceedings of the International Conference on Trends in Electronics and Informatics, ICOEI 2019, 2019-April*, 366-371. doi: 10.1109/icoei.2019.8862554 6.3, 7.2.2.1
- Giroux, P., Sybille, G., y Le-Huy, H. (2001). Modeling and simulation of a distribution statcom using simulink's power system blockset. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2, 990-994. doi: 10.1109/iecon.2001.975905 (document), 5.1, 5.3.1, 6.7
- Gonzalez, L. (2018, noviembre). *Evaluando el error en los modelos de regresión*. <https://aprendeia.com/evaluando-el-error-en-los-modelos-de-regresion/>. (Accessed:

2024-1-23) 8.6

- González, P. G. (2000). *Modelado, control y aplicación de dispositivos "facts" basados en inversores fuente de tensión* (Tesis Doctoral). Descargado de <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/50491> 5.1.1
- Haber, R., Arenas, J., Matia, F., Villalonga, A., y Fontanet, J. G. (2018). Ajuste óptimo y automático de un sistema de control en cascada. aplicación al seguimiento de trayectorias en servosistemas con fricción y zona muerta. 7.2.2.1
- Hingoranl, N. G., Gyugyi, L., y El-Hawary, M. E. (1999). *Understanding facts: Concepts and technology of flexible ac transmission systems*. Descargado de <https://ieeexplore.ieee.org/book/5264253> doi: 10.1109/9780470546802 1
- Holbrow, C. H., Lloyd, J. N., Amato, J. C., Galvez, E., y Parks, M. E. (2010). Modern introductory physics. *Modern Introductory Physics*. doi: 10.1007/978-0-387-79080-0 5.3.2
- Iravani, R., y Yazdani, A. (2010). *Voltage-sourced converters in power systems: Modeling, control, and applications*. IEEE Press/John Wiley. Descargado de <https://www.wiley.com/en-us/Voltage+Sourced+Converters+in+Power+Systems+%3A+Modeling%2C+Control%2C+and+Applications-p-9780470521564> doi: 10.1002/9780470551578 (document), 4.3, 4.2, 4.4, 4.3, 4.3.1, 4.5, 4.3.1, 4.3.1, 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.3.2, 6.3, 6.4, 6.5, 7.1.3, 7.2.2.1, 7.20, 9.1
- Jiménez, R., Serebrisky, T., y Mercado, J. (2014). Dimensionando las pérdidas de electricidad en los sistemas de transmisión y distribución en américa latina y el caribe - reporte del banco interamericano de desarrollo. *Banco Interamericano de Desarrollo*, 42. Descargado de <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Electricidad-perdida-Dimensionando-las-pérdidas-de-electricidad-en-los-sistemas-de-transmisión-y-distribución-en-América-Latina-y-el-Caribe.pdf> 2
- Jing, T., y Maklakov, A. S. (2018, 11). A review of voltage source converters for energy applications. En (p. 275-281). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi: 10.1109/URALCON.2018.8544364 1
- Karare, S., y Harne, V. M. (2017). Modelling and simulation of improved operation of d-statcom in distribution system for power quality improvement using matlab simulink tool. *Proceedings of the International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology, ICECA 2017, 2017-Janua*, 346-350. doi: 10.1109/ICECA.2017.8212831 6.3
- Kerrouche, K. D. E., Lodhi, E., Kerrouche, M. B., Wang, L., Zhu, F., y Xiong, G. (2020). Modeling and design of the improved d-statcom control for power distribution grid. *SN Applied Sciences*, 2, 1-11. Descargado de <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03315-8> doi: 10.1007/s42452-020-03315-8 5.1
- Khetarpal, P., y Tripathi, M. M. (2020, 12). A critical and comprehensive review on power quality disturbance detection and classification. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 28, 100417. Descargado de <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2020.100417> doi: 10.1016/j.suscom.2020.100417 1

- Lipták, B. (2013, enero). *Cascade, scan time, PID tuning*. <https://www.controlglobal.com/control/loop-control/article/11380269/controllers-cascade-scan-time-pid-tuning>. (Accessed: 2024-1-4) 7.2.2.1
- Madhusudan, R., y Rao, G. R. (2012). Modeling and simulation of a distribution statcom (d-statcom) for power quality problems-voltage sag and swell based on sinusoidal pulse width modulation (spwm). *IEEE-International Conference on Advances in Engineering, Science and Management, ICAESM-2012*, 436-441. 4.2
- Marlés, E., Enrique, S., Quispe, C., Método, E. L., Vector, D. E. L., Una, E., ... Al, A. (2005). El método del vector espacial. *Red de Revistas Científicas de America Latina, el Caribe, España y Portugal*, 56-69. 4.3
- Mathworks. (s.f.). *Designing cascade control system with PI controllers*. <https://la.mathworks.com/help/control/ug/designing-cascade-control-system-with-pi-controllers.html>. (Accessed: 2024-1-4) 7.2.2.1
- Mohan, N., Undeland, T. M., y Robbins, W. P. (2003). *Power electronics. converters, applications and design* (third ed.). John Wiley and Sons, Inc. (document), 4.1, 4.1.1, 4.2, 7.1.3
- Ogata, K., Canto, R. D., y Canto, S. D. (2010). *Ingeniería de control moderna* (5ª ed. ed.). Pearson. 8.4
- O'Rourke, C. J., Qasim, M. M., Overlin, M. R., y Kirtley, J. L. (2019). A geometric interpretation of reference frames and transformations: Dq0, clarke, and park. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 34, 2070-2083. doi: 10.1109/TEC.2019.2941175 4.3, 4.3.1, 5.3.1
- Paserba, J. (2004). How facts controllers benefit ac transmission systems. *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004.*, 2, 1257-1262. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/document/1373058/> doi: 10.1109/PES.2004.1373058 2
- Rice, R. C. (2010). *Pid tuning guide a best-practices approach to understanding and tuning pid controllers first edition.* Descargado de <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:13404029> 7.1.3, 7.2.2.1
- Samruddhi Shaha Parimal Borse, D. A. G. T. (2014). Modeling and simulation of statcom. *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)*, 3, 200-203. Descargado de www.ijert.org (document), 5.1, 6.3, 7.2.2.1
- Shafiullah, M., Abido, M. A., y Al-Mohammed, A. H. (2022). *Power system fault diagnosis: A wide area measurement based intelligent approach*. Elsevier. Descargado de <http://www.sciencedirect.com:5070/book/9780323884297/power-system-fault-diagnosis> doi: 10.1016/B978-0-323-88429-7.00033-3 4.3
- Shinde, O. K., y Pulavarthi, V. R. (2017, 10). Statcom converters and control: A review. En (p. 145-151). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi: 10.1109/ICDMAI.2017.8073500 1, 5.3.1
- Singh, P. K., y Dahiya, A. K. (2018). Analysis modelling simulation of vsc based d-statcom for reactive var compensation. *Proceedings of the 2018 International Conference on Current Trends towards Converging Technologies, ICCTCT 2018*, 1-6. doi: 10.1109/ICCTCT.2018.8550871 4.2

- Stepina, J. (1995, 11). *Space-phasor theory? - what is that for?* (Vol. 5). John Wiley & Sons, Ltd. Descargado de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/etep.4450050608><https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/etep.4450050608><https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/etep.4450050608> doi: 10.1002/etep.4450050608 1, 4.3
- Zaidi, A. H., Sunderland, K., y Conlon, M. (2019). *Role of reactive power (statcom) in the planning of distribution network with higher ev charging level* (Vol. 13). Descargado de www.ietdl.org doi: 10.1049/iet-gtd.2018.6046 5.1
- Zhang, F., Meng, C., Yang, Y., Sun, C., Ji, C., Chen, Y., ... Yang, G. (2015). Advantages and challenges of dc microgrid for commercial building: A case study from xiamen university dc microgrid. *2015 IEEE 1st International Conference on Direct Current Microgrids, ICDCM 2015*, 355-358. doi: 10.1109/ICDCM.2015.7152068 1