

**COMPENSADOR ESTÁTICO SÍNCRONO (STATCOM):
MODELADO Y SIMULACIÓN**

EDGAR ENRIQUE SIERRA RODRÍGUEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2006**

**COMPENSADOR ESTÁTICO SÍNCRONO (STATCOM):
MODELADO Y SIMULACIÓN**

EDGAR ENRIQUE SIERRA RODRÍGUEZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director

HERMANN RAÚL VARGAS TORRES

Doctor Ingeniero Electricista

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2006**

A Dios por darme la fortaleza

A la memoria de Denis Rodríguez

A mi papá

A mi hija Denis

A Alba Yaneth con su apoyo incondicional

A mis hermanos Claudia y Juan Carlos

AGRADECIMIENTOS

Quiero extender el mas grande agradecimiento a las personas que siempre estuvieron presentes cuando mas las necesitaba , a mi hermana Claudia Sierra y su esposo Marcelo Vergara.

A mis Tias Denis, Euderis y Aleida, siempre atentas.

A mis primos Pedro, Alma, Yelitza, y a todos los que en este proceso aportaron con sus palabras de ánimo y hermandad.

A mis amigos Guido Gonzales, Guido Polo, Dayana, Rafael Peñate.

Al Dr. Hermann Raúl Vargas, director del proyecto, quien me propuso la idea de vincularme y entrar al mundo del ATP/ATPDraw y por darme la orientación necesaria.

A los Ingenieros Carlos Rodríguez y Lizeth Mejía, cuyas orientaciones fueron bastante precisas, importantes y oportunas.

RESUMEN

TÍTULO: COMPESADOR ESTÁTICO SÍNCRONO: MODELADO Y SIMULACIÓN*

AUTOR: EDGAR ENRIQUE SIERRA RODRÍGUEZ**

PALABRAS CLAVES: Sistemas de Potencia, FACTS, STATCOM, ATP/EMTP.

DESCRIPCIÓN:

El rápido desarrollo de la tecnología de la electrónica de potencia proporciona oportunidades de desarrollar nuevos equipamientos para mejorar el desempeño de los sistemas de potencia actuales. Durante las últimas décadas han sido propuestos e implementados varios dispositivos de control llamados “Flexible AC Transmission Systems” (FACTS). Los dispositivos FACTS se pueden emplear para el control del flujo de potencia, control de lazo de flujo, regulación de tensión, mejoramiento de la estabilidad transitoria y amortiguamiento de las oscilaciones de potencia.

En este trabajo se describe la teoría y la técnica de modelado de un dispositivo para los Sistemas de Transmisión Flexible en AC (FACTS), llamado, Compensador Estático Síncrono (STATCOM), utilizando un programa de simulación para transitorios electromagnéticos (ATP/EMTP). El STATCOM es una fuente inversora de tensión de estado sólido acoplado con un transformador, conectado en paralelo con una línea de transmisión. El STATCOM inyecta una corriente casi senoidal, de magnitud variable, en el punto de conexión. Esta corriente inyectada está casi en cuadratura con la tensión de la línea, mientras emula una reactancia inductiva o capacitiva en el punto de conexión con la línea de transmisión. La funcionalidad del STATCOM se verifica por la regulación del flujo de corriente reactiva a través de él. Esto es útil para regular la tensión de la línea.

También se presenta un modelo reducido del STATCOM, implementado bajo una herramienta de simulación de sistemas de potencia ante grandes perturbaciones (HAGP).

*Proyecto de Grado

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Hermann Raúl Vargas Torres.

ABSTRACT

TITLE: STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR: MODELLING AND SIMULATION*

AUTHOR: EDGAR ENRIQUE SIERRA RODRÍGUEZ**

KEY WORDS: Power Systems, FACTS, STATCOM, ATP/EMTP.

DESCRIPTION:

The rapid development of power electronics technology provides opportunities to develop new power equipment to improve the performance of the actual power systems. During the last decade, a number of control devices called Flexible AC Transmission Systems (FACTS) technology have been proposed and implemented. FACTS devices can be used for power flow control, loop-flow control, voltage regulation, enhancement of transient stability and damping of power oscillations.

This work describes the theory and the modelling technique of a Flexible Alternating Currents Systems (FACTS) device, namely, STATic synchronous COMPensator (STATCOM) using an electromagnetic transients program (ATP/EMTP) simulation package. The STATCOM, a solid-state voltage source inverter coupled with a transformer, is tied to a transmission line. A STATCOM injects an almost sinusoidal current, of variable magnitude, at the point of connection. This injected current is almost in quadrature with the line voltage, thereby emulating an inductive or a capacitive reactance at the point of connection with the transmission line. The functionality of the STATCOM model is verified by regulating the reactive current flow through it. This is useful for regulating the line voltage.

A reduced model of the STATCOM is also presented, implemented under a tool of simulation of systems of power before big interferences (HAGP).

*Degree Project

**School of Electrical Engineering, Hermann Raúl Vargas Torres.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Introducción	2
1.2. Historia de los dispositivos FACTS	2
1.3. Tipos de dispositivos FACTS	3
1.4. Historia del STATCOM	7
1.5. Motivación del trabajo	10
1.6. Objetivos	10
2. El STATCOM	12
2.1. Funcionamiento del STATCOM	13
2.2. Componentes del STATCOM	14
2.2.1. Inversores	15
2.2.1.1. Función	15
2.2.1.2. Válvulas utilizadas	15
2.2.1.3. Topologías	16
2.2.1.4. Frecuencia de conmutación	18
2.2.2. Capacitor del lado de corriente continua	18
2.2.2.1. Función	18
2.2.2.2. Topologías	18
2.2.3. Transformadores	19

2.2.3.1.	Transformadores en zig-zag	20
2.2.3.2.	Transformadores en estrella - delta	24
3.	Análisis detallado del STATCOM de 6 y 12 pulsos	26
3.1.	Introducción	27
3.2.	Fuente inversora de Tensión (FIT)	27
3.3.	Análisis armónico	31
3.4.	Compensador estático síncrono (STATCOM) basado en un inversor de seis pulsos	33
3.4.1.	Intercambio de potencia reactiva	33
3.4.1.1.	Análisis de las señales de corrientes AC	34
3.4.1.2.	Corriente en el capacitor	38
3.4.1.3.	Tensión DC en el capacitor	39
3.4.2.	Intercambio de potencia activa y reactiva	41
3.5.	Convertor de 12 pulsos	44
3.5.1.	Señales de corriente AC	47
4.	Control vectorial de inversores trifásicos	49
4.1.	Introducción	50
4.2.	Representación de señales eléctricas en el espacio vectorial	51
4.2.1.	Sistemas trifásicos a cuatro hilos	51
4.2.2.	Sistema trifásico de tres hilos	54
4.3.	Estados de conmutación en inversores VSI	56
4.4.	Modulación de vectores espaciales	61
5.	Modelado del STATCOM	63
5.1.	Introducción	64
5.2.	Representación vectorial de cantidades trifásicas instantáneas	64

5.3. Ecuaciones del circuito equivalente	67
5.4. Sistemas de control del STATCOM	68
5.4.1. Técnica de control por intermedio de la modulación SVPWM	69
5.4.1.1. Implementación digital del modelo del STATCOM	70
5.4.2. Técnica de control de fase	73
5.4.2.1. Componentes básicos del sistema de control	74
5.4.2.2. PLL, <i>phase locked loop</i>	74
5.4.2.3. Control de reactivos	75
5.4.2.4. Generación de la señal de desfase	77
6. Modelo reducido del STATCOM	78
6.1. Introducción	79
6.2. Modelos del STATCOM	79
6.2.1. Modelo de estabilidad transitoria	79
6.2.2. Modelo en estado estable	81
6.2.2.1. Sistema de 3 máquinas y 9 nodos	82
6.3. Análisis dinámico de estabilidad	85
7. Resultados de simulaciones	90
7.1. Introducción	91
7.2. Ejemplos implementados en ATP/EMTP y HAGP	91
7.2.1. Caso1	91
7.2.2. Caso 2	97
7.2.2.1. Modelo del STATCOM en el software HAGP	100
7.2.2.2. Técnica de control de fase	101
7.2.2.3. Esfuerzos en los elementos de conmutación	104
7.2.3. Caso 3	104
7.2.3.1. Inversor	105

7.2.3.2. Transformadores	105
7.2.3.3. Resultados de la respuesta dinámica del STATCOM .	109
7.2.3.4. Esfuerzos en los elementos de conmutación	111
8. Conclusiones y sugerencias	115
8.1. Aportes originales del trabajo	116
8.2. Sugerencias para posteriores desarrollos	116
Bibliografía	118
A. Ecuaciones diferenciales para incluir en el HAGP	122
A.1. Solución en estado estable	122
A.2. Simulación dinámica	124
A.3. Ecuaciones dinámicas del modelo del STATCOM	127
B. Guía de usuario del HAGP	129
B.1. Introducción	129
B.2. Instalación y Ejecución	129
B.3. Datos de entrada	130
C. Modelos y librerías en ATP	132
C.1. Caso de simulación 1	132
C.2. Caso de simulación 2	139
C.3. Caso de simulación 3	155

Índice de figuras

1.1. Forma básica del Statcom	3
1.2. FACTS- primera generación -paralelo	4
1.3. FACTS- primera generación -serie	5
1.4. FACTS- segunda generación -paralelo-STATCOM	5
1.5. FACTS- Segunda generación- serie-SSSC	6
1.6. FACTS-Tercera generación-UPFC	6
1.7. FACTS- Cuarta generación-IPFC	7
1.8. Características V vs I del SVC y el STATCOM	7
2.1. <i>Diagrama simplificado de dos fuentes de tensión conectados por una impedancia X_L</i>	13
2.2. Diagramas fasoriales del sistema eléctrico y el STATCOM	14
2.3. Inversor de seis pulsos	16
2.4. Inversor trifásico compuesto por 3 inversores puente H monofásicos	16
2.5. Inversor de tres niveles NPC	17
2.6. Topologías de capacitores del lado de corriente continua	19
2.7. Topologías con capacitores individuales por cada inversor	20
2.8. STATCOM de 12 pulsos utilizando transformadores zig-zag	20
2.9. Esquemas de conexión de los transformadores zig-zag	21
2.10. STATCOM de 24 pulsos utilizando transformadores zig-zag	23

2.11. STATCOM de 48 pulsos utilizando transformadores zig-zag	23
2.12. Diagrama de un STATCOM quasi-24 pulsos (esquema de conexiones estrella - delta)	25
3.1. Fuente inversora de tensión	27
3.2. Señales de disparo	28
3.3. Formas de onda de las tensiones línea a línea	28
3.4. Formas de onda de las tensiones línea a neutro	29
3.5. Circuito equivalente para la secuencia 1-5-6	30
3.6. Circuito equivalente para la secuencia 1-2-6	30
3.7. Circuito equivalente para la secuencia 1-2-3	30
3.8. STATCOM con inversor de seis pulsos	34
3.9. Tensiones de fase del compensador y del sistema AC	35
3.10. Corrientes entre el sistema AC y el compensador	38
3.11. Tensión del capacitor a) generando potencia reactiva; b) absorbiendo potencia reactiva	40
3.12. Corrientes del capacitor a) generando potencia reactiva; b) absorbiendo potencia reactiva	41
3.13. Tensiones de fase del compensador y del sistema AC	42
3.14. a) $v_{ab}(t)$ y $v_{abY}(t)$; b) Tensión del conversor de 12 pulsos	46
3.15. STATCOM de 12 pulsos	46
4.1. Tensiones de fase de un sistema trifásico	52
4.2. Evolución temporal de las tensiones de un sistema trifásico	53
4.3. Evolución temporal del vector suma	53
4.4. Relación entre las tensiones de fase y tensiones de línea	55
4.5. Inversor trifásico formado por tres semipuentes	57
4.6. Estados de los interruptores	58

4.7. Posición de los diferentes vectores	60
4.8. Descomposición del vector intermedio \vec{V}_{ref} situado en el sector 1	61
5.1. Marco de referencia $\alpha - \beta$	65
5.2. Marco de referencia $d - q$	66
5.3. Esquema general del STATCOM	67
5.4. Esquema general del sistema de control del STATCOM	70
5.5. Controladores adicionales para las señales de referencia del sistema de control	71
5.6. Modelos del controlador desacoplados	72
5.7. Controlador de corrientes	72
5.8. Esquema de control del STATCOM para el control de fase	73
5.9. Esquema del PLL, <i>phase locked loop</i>	75
5.10. Esquema del PLL+ señal de desfasaje.	76
5.11. Controlador P-I de potencia reactiva	77
6.1. Modelo reducido del STATCOM con control de tensión PWM	80
6.2. Técnica de control PWM para control de tensión	81
6.3. Sistema 9 barras y 3 máquinas de la WSSC	83
6.4. Diagrama de flujo simplificado del HAGP	89
7.1. Sistema de potencia para el caso de simulación 1	92
7.2. Sistema de control para el caso de simulación 1	93
7.3. Señales de referencia del sistema de control para el caso de simulación 1	93
7.4. Tensiones del sistema AC y a la salida del convertidor	94
7.5. Armónicos en la tensión de salida del compensador	95
7.6. Componentes en cuadratura de las corrientes de la carga y del compensador	95

7.7. Componente en cuadratura de la corriente suministrada por la fuente de tensión	95
7.8. Compensación dinámica del factor de potencia de la carga	96
7.9. Dinámica de la tensión del capacitor en el lado DC del compensador . .	96
7.10. Configuración de un STATCOM de 12 pulsos	97
7.11. Sistema de potencia para el caso de simulación 2	99
7.12. Regulador Automático de Tensión, AVR	99
7.13. Sistema de control de fase	99
7.14. Magnitud de tensión en la barra 8	100
7.15. Ángulo del rotor del generador	101
7.16. Inclusión del STATCOM en barra 8 a los 0,5 seg	102
7.17. Forma de onda de la tensión a la salida del inversor	102
7.18. Espectro armónico de tensión en la salida del inversor	102
7.19. Ángulo del Generador	103
7.20. Ángulo de desfase del control	103
7.21. Corriente en un dispositivo de conmutación	104
7.22. Frecuencia en radianes por segundo	107
7.23. Señal de sincronismo del PLL	107
7.24. Potencia imaginaria instantánea inicial	107
7.25. Potencia activa instantánea inicial	108
7.26. Tensión del capacitor	108
7.27. Tensión del sistema V_s , tensión 48 pulsos y corriente de compensación I_c	109
7.28. Potencia imaginaria instantánea	110
7.29. Potencia activa instantánea	110
7.30. Tensión del capacitor	110
7.31. Tensión del sistema V_s , tensión 48 pulsos y corriente de compensación I_c	111

7.32. Corriente que circula por uno de los elementos de conmutación, en modo inductivo	112
7.33. Corriente que circula por uno de los elementos de conmutación, en modo capacitivo	112
7.34. Corriente que circula por uno de los elementos de conmutación, con referencia de potencia reactiva cero	112
7.35. Tensiones de los elementos de conmutación, en modo inductivo	113
7.36. Tensiones de los elementos de conmutación, en modo capacitivo	113
7.37. Tensiones de los elementos de conmutación, con referencia de potencia reactiva cero	113
A.1. Circuito equivalente del STATCOM	123
A.2. Técnica de control PWM para control de tensión	123
C.1. Caso de simulación 1	132
C.2. Caso de simulación 2	139
C.3. Caso de simulación 3 - parte 1	155
C.4. Caso de simulación 3 - parte 2	156
C.5. Caso de simulación 3 - parte 3	158

Lista de tablas

2.1. Valores de x y de y en función de α	22
4.1. Estados de conmutación	59
6.1. Datos iniciales de los nodos	83
6.3. Datos de las líneas	84
6.5. Tensiones nodales sin la inclusión del STATCOM	84
6.7. Flujos de potencia por las líneas sin la inclusión del STATCOM	84
6.9. Valores nodales con la inclusión del STATCOM en el nodo 5	86
6.11. Flujos de potencia por las líneas con la inclusión del STATCOM	86
7.1. Parámetros del sistema de referencia	92
7.2. Parámetros de la maquina síncrona, con bases de 200MVA y 13.8kV	98
7.3. Parámetros del sistema de potencia en p.u., con potencia base de 240 MVA	98
7.4. Parámetros del STATCOM en p.u., con potencia base de 150 MVA y 12 kV	98
7.5. Secuencia de eventos de la simulación caso 2	100
7.6. Secuencia de eventos de la simulación	106

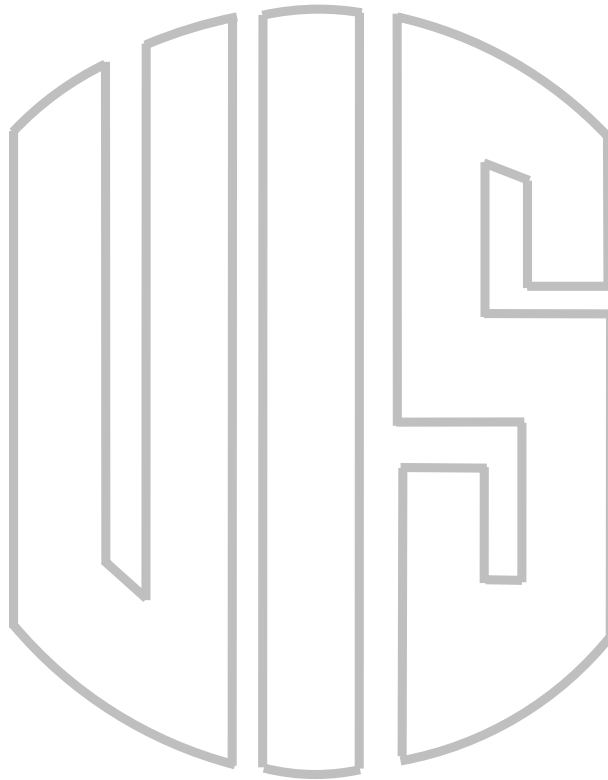
Lista de Símbolos

A_D	Partición del jacobiano correspondiente a derivadas de ecuaciones dinámicas con respecto variables de estado
B_D	Partición del jacobiano correspondiente a derivadas de ecuaciones dinámicas con respecto a tensiones λ
C_D	Partición del jacobiano correspondiente a derivadas de ecuaciones de red con respecto a variables de estado
F	Vector de ecuaciones dinámicas
G	Vector de ecuaciones de red
J	Jacobiano
Y	Matriz de admitancias de la red del sistema. Partición del jacobiano correspondiente a derivadas de ecuaciones de red con respecto a tensiones
i	Vector de corrientes del sistema
v	Vector de tensiones del sistema
x	Vector de estado del sistema
\vec{V}	Fasor de tensión de barra
\vec{I}	Fasor de corriente de barra
H	Constante de inercia
I	Magnitud de fasor de corriente de barra
I_I	Componente imaginaria de fasor de corriente de barra
Y	Admitancia
I_R	Componente real de fasor de corriente de barra
K_v	Ganancia del controlador de índice de modulación

L	Inductancia
P	Potencia activa
Q	Potencia reactiva
R	Resistencia
V	Magnitud de fasor de tensión
V_m	Valor pico de onda de tensión
V_I	Componente imaginaria de fasor de tensión de barra
V_{DC}	Tensión en el lado DC del STATCOM
V_R	Componente real de fasor de tensión de barra
X	Reactancia
i	Corriente instantánea
x	Variable cualquiera
r, s, t (subíndice)	Denota cantidades de las fases de tensiones
d (subíndice)	Denota cantidades de eje directo
q (subíndice)	Denota cantidades del eje en cuadratura
t (subíndice)	Denota cantidades en terminales del generador
max (subíndice)	Denota cantidades de valor máximo
mn (subíndice)	Denota cantidades de valor mínimo
ref (subíndice)	Denota cantidades de referencia
R (subíndice)	Denota el valor de la componente real
I (subíndice)	Denota el valor de la componente imaginaria
k (superíndice)	Denota k -ésima iteración del Método de Newton
T	Matriz de transformación de marco de referencia
Δ	Incremento
Σ	Sumatorio
π	pi
φ	Ángulo de desfasaje de onda de tensión
G_c	Conductancia representativa de las pérdidas del STATCOM
K	Constante
$v_{m1}, v_{m2}, v_{d1}, v_{d2}$	Variables de estado del STATCOM
B	Suceptancia
ω	Velocidad o frecuencia angular

Capítulo 1

Introducción



En éste capítulo se presenta una breve reseña histórica sobre los dispositivos FACTS. También, se citan ejemplos de equipamientos FACTS. Además de la evolución histórica del STATCOM, se presenta la motivación y los objetivos de ésta tesis.

1.1. Introducción

La industria de los semiconductores de potencia ha producido dispositivos de conmutación que pueden operar con límites de tensión y corriente del orden de los kV y kA respectivamente. Esto permite la aplicación de la electrónica de potencia en equipos de industrias, y en los sistemas de distribución y transmisión de energía. Además tales equipos deben soportar fallas de decenas a centenas de MVAs.

La electrónica de potencia puede auxiliar el funcionamiento de los dispositivos utilizados en la industria, sustituyendo los métodos convencionales, proporcionando formas más rápidas de control, más eficientes y económicas de utilización de la energía.

En los sistemas de potencia, la utilización de la electrónica de potencia tiene sus inicios en los proyectos de transmisión de corriente continua a alta tensión, más conocidos como HVDC, *High Voltage Direct Current*. Estos sistemas utilizan convertidores de corriente alterna a corriente directa y vice-versa controlados por tiristores.

El control de los elementos semiconductores permite la construcción de equipamientos capaces de realizar alteraciones rápidas de las características del sistema eléctrico. Estos dispositivos operan dentro del concepto conocido como sistemas de transmisión flexibles en corriente alterna FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*), creado por Hingorani [N.G.Hingorani, 1988; N.G.Hingorani, 1990].

El STATCOM, sigla de *Static Synchronous Compensator*, es un dispositivo FACTS, compuesto por inversores, transformadores, capacitores y controles, como se muestra en la figura 1.1, el cual se implementa para controlar potencia reactiva, tanto capacitiva como inductiva. Este dispositivo puede ser utilizado para hacer el control del factor de potencia, regulación de tensión en el punto de conexión y para mejorar la estabilidad dinámica del sistema eléctrico [Gyugyi, 1994].

El STATCOM a pesar de ser un dispositivo relativamente nuevo, ya posee una extensa literatura. No obstante es importante saber y constatar con modelos adecuados los alcances que pueda tener el STATCOM al incluirlo en un sistema de potencia.

1.2. Historia de los dispositivos FACTS

Los equipamientos bajo el concepto de FACTS comenzaron a ser implementados a finales de la década de los 60' por diversos grupos, y bajo el nombre de FACTS, *Flexible*

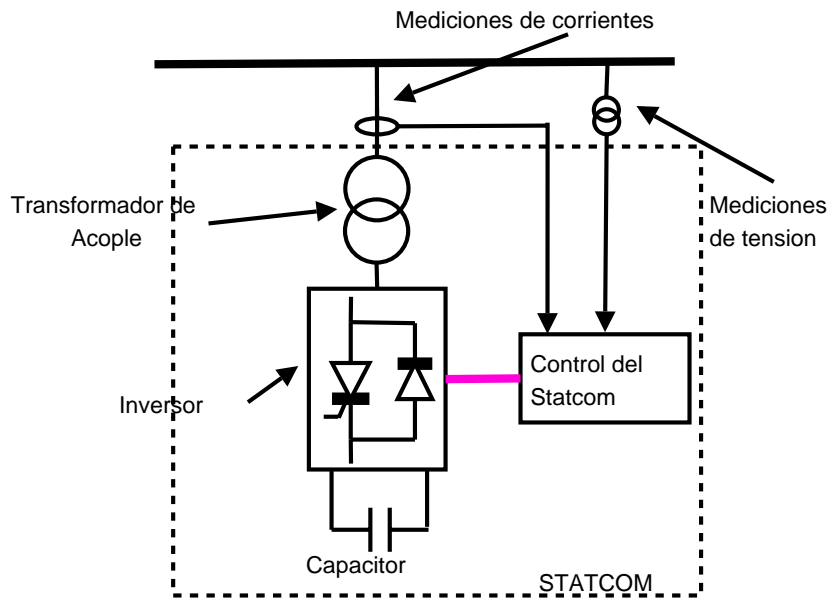


Figura 1.1: Forma básica del Statcom

Alternating Current Transmission System, empezó a existir a partir de 1988 cuando Hingorani publicó sus artículos [N.G.Hingorani, 1988; N.G.Hingorani, 1990]. En esta época Hingorani vice-presidente del EPRI (*Energy Power Research Institute*), dirigía un grupo de trabajo que investigaba sobre el empleo de la electrónica de potencia en los sistemas de potencia.

El concepto de FACTS agrupa a un conjunto de nuevos equipos de electrónica de potencia que permiten mayor flexibilidad al control de los sistemas eléctricos. En este caso entienda *flexibilidad*, como la capacidad de alteración rápida y continua de los parámetros que controlan la dinámica de funcionamiento de los sistemas eléctricos.

1.3. Tipos de dispositivos FACTS

Los dispositivos FACTS se dividen en dos grandes grupos: los compensadores conectados en paralelo y los compensadores conectados en serie.

A través de su historia los dispositivos FACTS se han clasificado por generaciones. La primera generación son dispositivos FACTS que emplean tiristores y elementos semiconductores descritos en [N. Mohan, 1995].

Ejemplos de dispositivos conectados en paralelo con la red del sistema de potencia pertenecientes a la primera generación son: el TCR(*Thyristor Controlled Reactor*), el TSC(*Thyristor Switched Capacitor*) y el SVC(*Static Var Compensator*). Diagramas de estos dispositivos, se muestran en la figura 1.2.

Ejemplos de dispositivos conectados en serie con la red y pertenecientes a la primera generación son: el TSSC(*Thyristor Switched Series Capacitor*) y el TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*) cuyos esquemas se muestran en la figura 1.3.

La segunda generación está compuesta por dispositivos que utilizan elementos semiconductores tales como los IGBT's (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) y GTO's (*Gate Turn Off Thyristor*), los cuales se describen en [N. Mohan, 1995].

Dispositivos FACTS que utilizan estos elementos de conmutación como ejemplos de compensadores paralelos son el STATCOM (*Static Synchronnous Shunt Compensator*), cuyo esquema está mostrado en la figura 1.4, y compensadores conectados en serie como el SSSC(*Static Synchronnous Series Compensator*) cuyo esquema está mostrado en la figura 1.5.

La tercera generación es compuesta por la integración de dos dispositivos serie y paralelo en una misma línea de transmisión. Un resultado de esto es el UPFC (*Unified Power Flow Controller*), el cual, es un dispositivo combinado de un SSSC y un STATCOM, conforme es mostrado en la figura 1.6.

La cuarta generación es conformada por la integración de dispositivos serie y paralelo pero en diferentes líneas de transmisión que da lugar al nombre IPFC (*Interline Power Flow Controller*) mostrado en la figura 1.7

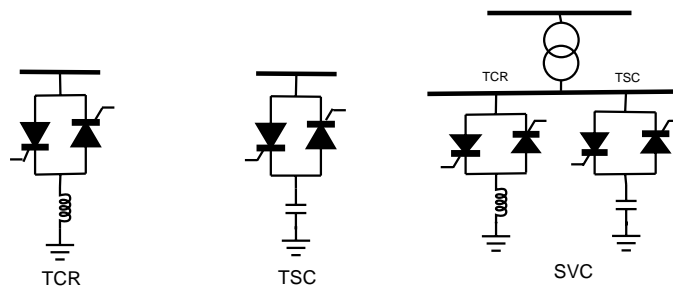


Figura 1.2: FACTS- primera generación -paralelo

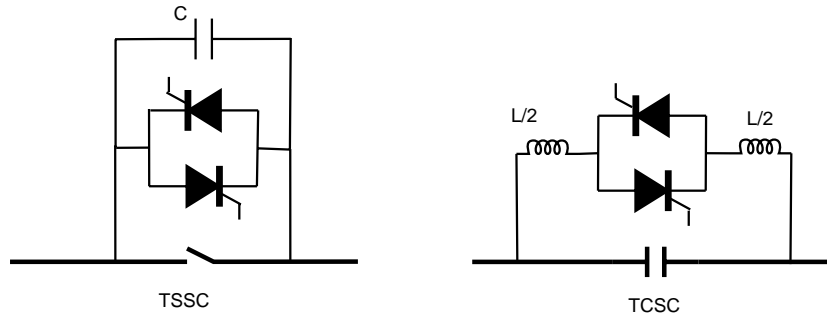


Figura 1.3: FACTS- primera generación -serie

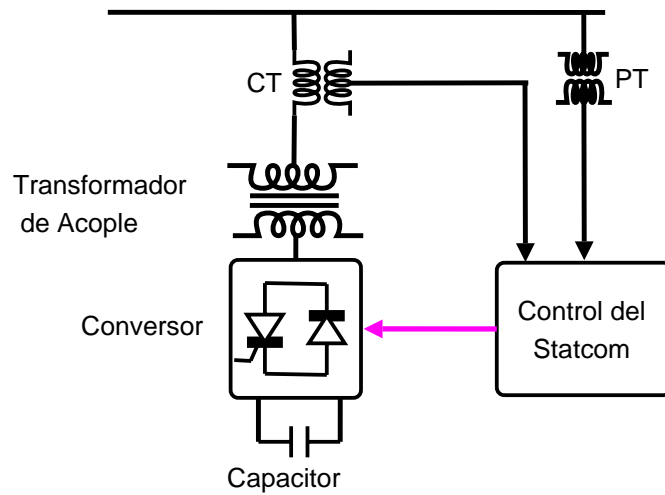


Figura 1.4: FACTS- segunda generación -paralelo-STATCOM

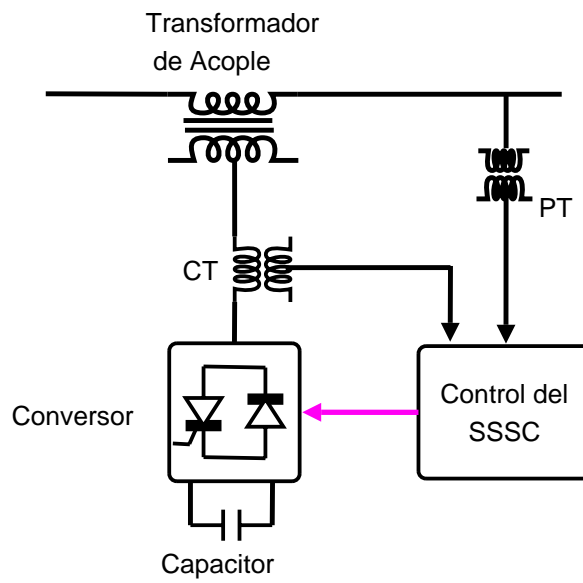


Figura 1.5: FACTS- Segunda generación- serie-SSSC

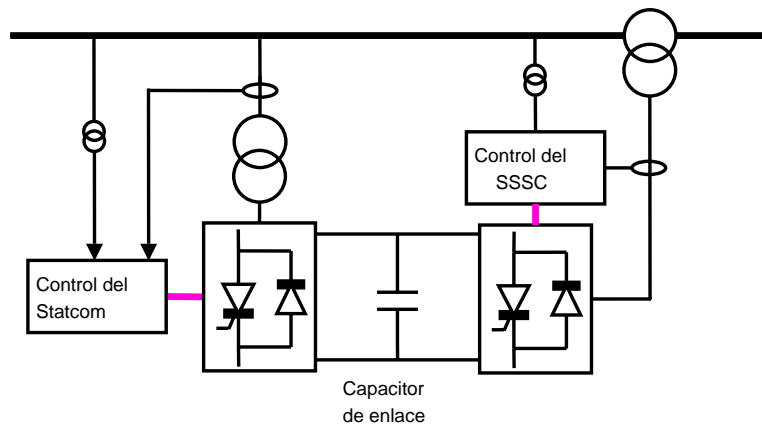


Figura 1.6: FACTS-Tercera generación-UPFC

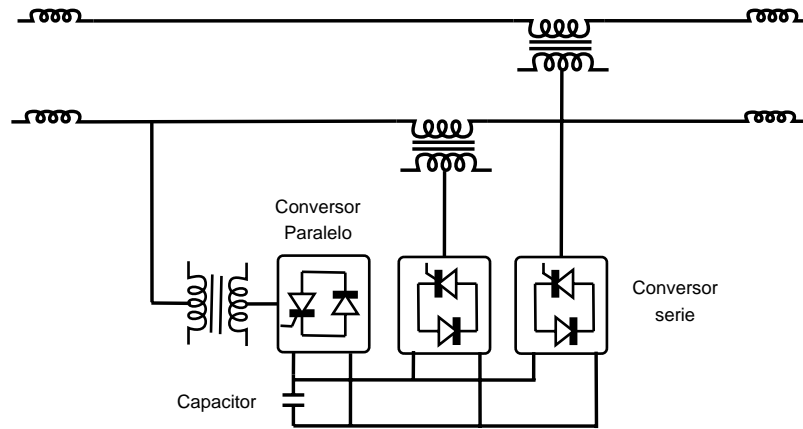


Figura 1.7: FACTS- Cuarta generación-IPFC

1.4. Historia del STATCOM

El desarrollo del STATCOM comenzó en 1976, resultado de un trabajo de investigación japonés ligado a las compañías Kansay Electric Co. Ltda y Mitsubishi Electric Corporation [Y. Sumi, 1981]. Este equipamiento utilizaba bloques de inversores compuestos por tiristores y circuitos auxiliares complejos para la conmutación forzada. Tenía como objetivo aumentar la capacidad de corriente de compensación, en contraste con las limitantes del SVC como muestra la figura 1.8 y explicada en las referencias [Narain G. Hingorani, 2000].

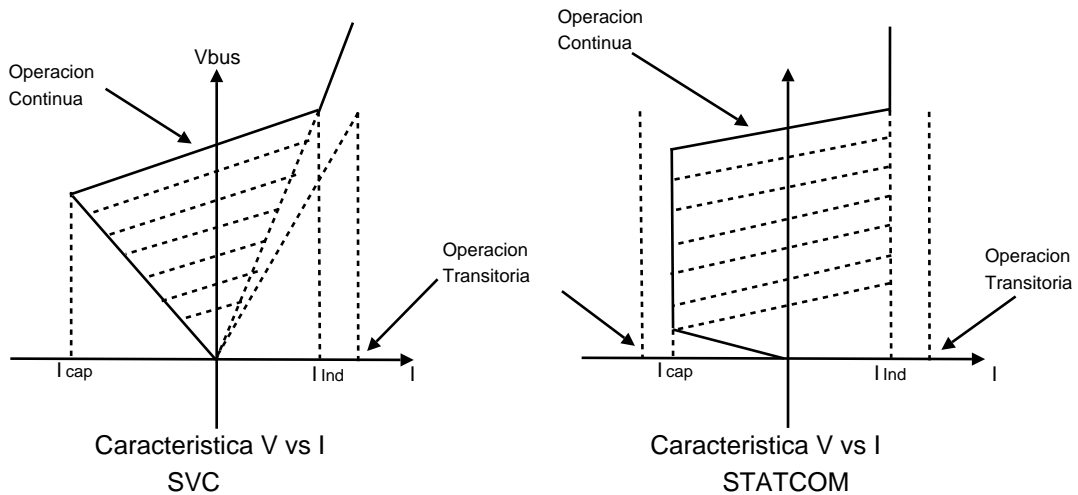


Figura 1.8: Características V vs I del SVC y el STATCOM

También el surgimiento del STATCOM prometía para el futuro grandes reducciones en cuanto al tamaño del equipamiento total del dispositivo, eliminando los grandes reactores y capacitores que poseen los SVC's.

En 1980 el primer prototipo del STATCOM (en esta época este nombre no era utilizado) fue contruido y probado [Y. Sumi, 1981]. Este fué dimensionado para una potencia de 20MVA a una tensión de 77kV y utilizaba tiristores con circuitos auxiliares de conmutación forzada. El objetivo de éste dispositivo era mejorar la dinámica del sistema eléctrico mejorando su estabilidad, a través de la compensación de reactivos. Para esta época todavía las potencias que se manejaban eran relativamente bajas, incluyendo los problemas de complejidad y de confiabilidad de los circuitos auxiliares de conmutación forzada y de los bajos límites de corrientes y tensión de los dispositivos auto-conmutados tipo GTO.

Los límites existentes de dispositivos de conmutacion en los años 70's atrasaron en una década el desarrollo de todos los compensadores (SVC, STATCOM, etc.) de estado sólido.

Solamente el rápido avance de los dispositivos auto-conmutados, con mayores capacidades de tensión y corrientes, ocurrido en la década de los 80's, fué posible el resurgimiento del interés por la construcción del STATCOM. En 1990 había dispositivos GTO's de 4,5kV para la tensión de bloqueo y 2,5kA para la corriente de interrupción, en el 2000 eran citados nuevos límites de tensión de bloqueo de 6,5kV y corrientes de interrupción de 6,6kA.

Ejemplos de estos nuevos dispositivos de conmutación son los IEGT's (*Injection Enhancement IGBT*, (2,5-6,5kV/2kA), HiGT (*High-Conductivity IGBT*, (3,3kV/5kA)), y paquetes compactos de IGBT's (4,5kV/2kA), y los GCT's (*Gate Commutated Thyristor*) o los IGCT's (*Integrated Gate Commutated Thyristor*).

Las pruebas del STATCOM de 20 MVA [Y. Sumi, 1981], fueron buenas y el paso a seguir era la construcción de un dispositivo de mayor potencia.

En 1990, un grupo de investigadores japoneses anunciaba estar bastante avanzado en el desarrollo de un STATCOM de 80MVA a una tensión de 154kV [Edwards, 1988a]. A través de pruebas con un modelo reducido de 2 kVA, 200V, 48 pulsos, fueron verificados los sistemas de control y su principio de funcionamiento. Con un modelo parcial de 12 pulsos fueron verificados y probados los circuitos *snubber*, como también los dispositivos de conmutación que fueron empleados.

Al mismo tiempo en Estados Unidos un grupo de investigadores de EPRI y ESERCO (*Empire State Energy Research Corporation*), presentaba sus resultados obtenidos de un modelo de 1 MVA probado en campo [Edwards, 1988b].

En 1992 el primer STATCOM entró en operación en la subestación de Inuyama, perteneciente a Kansay Electric Corporation Co., Ltd. [S.Mori, 1993]. Éste STATCOM de 48 pulsos poseía una potencia de 80 MVA a una tensión de 154 kV y utilizaba transformadores especiales con configuraciones en *zig-zag*. Fueron utilizados GTO's de 4,5kV/3kA en los inversores.

En 1995, un STATCOM americano de ± 100 MVA relatado por [Narain G. Hingorani, 2000], fué construido en la subestación de Sullivan, perteneciente a TVA, *Tennessee Valley Authority*. Éste STATCOM fué implementado con una estructura de 48 pulsos para neutralizar armónicos. Esta estructura utilizaba GTO's de 4,4kV/4kA, cinco unidades de GTO's fueron conectados en serie asociados con diodos antiparalelos. En el lado de corriente continua se colocó un capacitor de 65 kJ y 2948 μF , con una tensión nominal de 6,6 kV, este STATCOM estaba conectado a una línea de 161 kV.

Otro proyecto de construcción fué un UPFC de ± 320 MVA por AEP *American Electric Power*, instalado en la subestación de Inez, Kentucky, relatado en 1998 por [C.Schauder, 1998]. Este proyecto en la fase inicial era un STATCOM de ± 160 MVA conectado a una línea de 138 kV. En la segunda etapa otro STATCOM fue insertado de la misma capacidad que el anterior, permitiendo tener un control de ± 320 MVA. Pero después, éste último STATCOM fué modificado por un SSSC, y así obtener la composición de un UPFC.

En las referencias de IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineer*), el nombre STATCOM (*Static Synchronous Compensator*) ya está establecido, pero los nombres como SVG (*Static Var Generator*), ASVC (*Advanced Static Var Compensator*) y ASVG (*Advanced Static Var Generator*), todavía permanecen en Japón y Europa.

Algunos de estos nombres existen como variaciones del nombre STATCOM: el STATCON, derivado de *static condenser*, D-STATCOM, *Distribution-STATCOM* fabricado para sistemas de distribución y un PWM STATCOM *Pulse Width Modulation STATCOM*, con inversores accionados a altas frecuencias de conmutación y comportamiento similar al de un filtro activo.

1.5. Motivación del trabajo

En la actualidad como un número de investigaciones del dispositivo STATCOM está aumentando, es muy importante saber que tanta información es valde para nuestros futuros estudios en cuanto a la apropiación de esta tecnología (FACTS).

El requerimiento de este trabajo por intermedio de la Universidad Industrial de Santander de encontrarse a la vanguardia de la investigación, ha dado origen al presente proyecto, el cual busca modelar y simular el STATCOM. La investigación del STATCOM permitirá la formación de profesionales con conocimientos en los dispositivos FACTS y además de sus mejoras en la inserción en sistemas de energía eléctrica.

En el pasado en cuanto al diseño de redes, éstas se diseñaban de una manera sobredimensionada, para satisfacer las demandas locales. Ahora, con al aumento de la demanda de energía y de las interconexiones nacionales e internacionales, las redes de transmisión se han quedado rezagadas en su capacidad de transporte. La construcción de nuevos es cada vez mas difícil, debido a sus costos, problemas medioambientales y de servidumbres. Por tanto, se hace necesario tener unos criterios de eficiencia para un mejor aprovechamiento de las redes, y que mejor tener dentro de esos criterios de eficiencia el uso de tecnologías avanzadas como lo son los dispositivos FACTS.

Con la realización de este proyecto por medio de la herramienta de simulación ATP y su interfaz gráfica ATPDraw, se pretende tener un buen recurso informático que permita tener una respuesta aceptable de un sistema de potencia junto con el STATCOM.

Finalmente, y no menos importante es el deseo del investigador y del director, profundizar sus conocimientos en ésta área de investigación, lo cual, permitirá realizar posteriores investigaciones en éste campo.

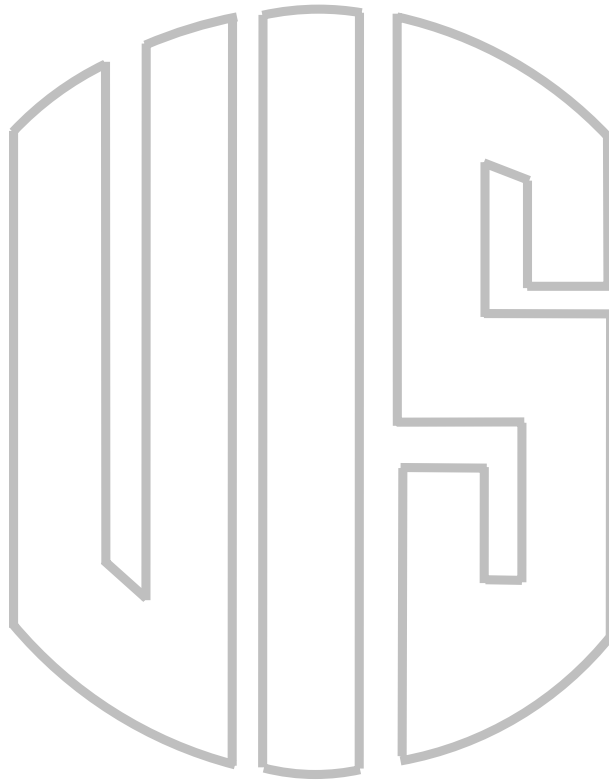
1.6. Objetivos

- El objetivo fundamental de éste trabajo es la apropiación de la tecnología sobre los sistemas de transmisión flexible en corriente alterna FACTS, por intermedio del modelado y simulación de uno de sus más representativos dispositivos como lo es el STATCOM.

- Realizar un modelo detallado del STATCOM para su posterior inclusión en sistemas de potencia balanceados, a través de la implementación con modelos digitales creados con la herramienta de simulación ATP-ATPDraw .
- Aplicar el modelo digital implementado en ATP, a sistemas electricos de diverso tamaño, para verificar mejoras en la respuesta dinámica con la inclusión del STATCOM.
- Realizar un modelo reducido del STATCOM para su posterior inclusión en la herramienta de simulación de sistemas de potencia ante grandes perturbaciones: HAGP.

Capítulo 2

EL STATCOM



En este capítulo se describirá el principio de funcionamiento del STATCOM como compensador de potencia reactiva inductiva y capacitiva. También se describen sus componentes mas importantes y sus topologías más comunes para su implementación. Al final se hace una breve comparación entre algunas de dichas topologías.

2.1. Funcionamiento del STATCOM

El principio de funcionamiento del STATCOM puede ser descrito a través del diagrama mostrado en la figura 2.1, que es igual a una representación del STATCOM en conjunto con un sistema eléctrico de potencia. Dicho sistema, se considera por su equivalente Thevenin, al igual que el STATCOM, sin la representación de los armónicos.

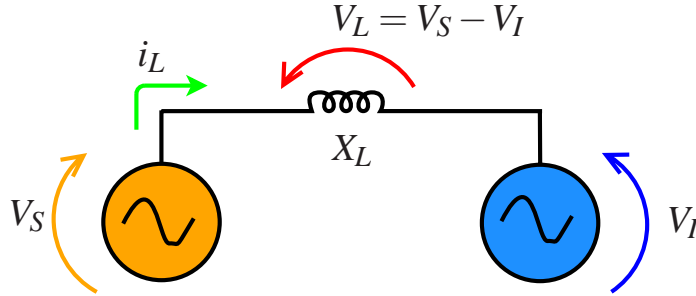


Figura 2.1: Diagrama simplificado de dos fuentes de tensión conectados por una impedancia X_L

En este esquema (fig 2.1), el sistema eléctrico y el STATCOM, se representan respectivamente por las tensiones V_s y V_i , además de una reactancia equivalente representando el transformador de acople.

Las potencia activas y reactivas entre las dos fuentes de tensión en régimen permanente, se describen a través de:

$$P = \frac{V_s V_i}{X_L} \sin \delta \quad (2.1)$$

$$Q = \frac{V_s^2}{X_L} - \frac{V_s V_i}{X_L} \cos \delta \quad (2.2)$$

Considerando las ecuaciones (2.1) y (2.2) y los diagramas fasoriales de la figura 2.2, se destacan las siguientes situaciones:

- Cuando la tensión V_i está adelantada de la tensión V_s , existe una potencia activa saliendo del STATCOM hacia la red. $P < 0$, figura 2.2 a).

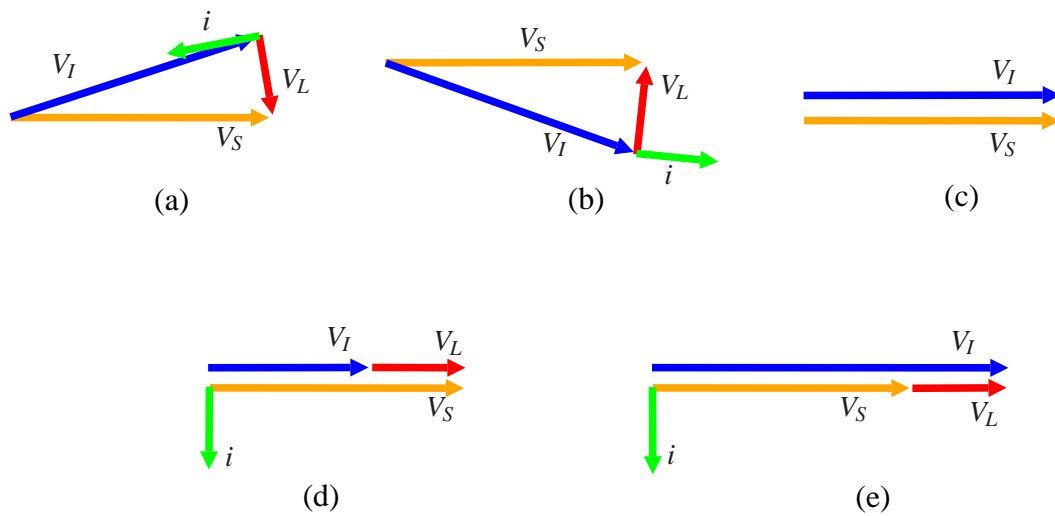


Figura 2.2: Diagramas fasoriales del sistema eléctrico y el STATCOM

- Cuando la tensión V_i está atrasada de la tensión V_s , existe una potencia activa saliendo de la red hacia el STATCOM. $P > 0$, figura 2.2 b).
- Cuando la tensión V_i está en fase con la tensión V_s , y además $\|V_i\| = \|V_s\|$, no existe flujo de potencia activa ni reactiva, figura 2.2 c).
- Cuando la tensión V_i está en fase con la tensión V_s , y además $\|V_i\| < \|V_s\|$, no existe flujo de potencia activa, pero existe potencia reactiva inductiva, $Q > 0$, el sistema vé al STATCOM como si fuera un inductor, ver figura 2.2 d).
- Cuando la tensión V_i está en fase con la tensión V_s , y además $\|V_i\| > \|V_s\|$, no existe flujo de potencia activa, pero existe potencia reactiva capacitiva, $Q < 0$, el sistema vé al STATCOM como si fuera un capacitor, ver figura 2.2 e).

Verificándose así que una fuente de tensión con capacidad de control de fase puede direccionar el flujo de potencia activa, y con control de amplitud, puede controlar la potencia reactiva en aquel punto de conexión.

2.2. Componentes del STATCOM

Un STATCOM tiene su funcionamiento basado en las situaciones expuestas anteriormente.

En este caso el STATCOM es una fuente de tensión controlada en amplitud y fase, e implementada a través de inversores. Estos inversores poseen en su lado de corriente continua capacitores para simular una fuente de tensión DC. El capacitor en el lado de corriente continua también sirve como sistema almacenador de energía. Los transformadores son utilizados para compatibilizar los niveles de impedancia del compensador y del sistema de potencia AC. En la mayoría de los casos los transformadores son utilizados para minimizar el contenido de armónicos de tensión del inversor.

Así mismo, el STATCOM está compuesto por cuatro partes básicas: inversores, transformadores, capacitores en el lado de corriente continua y un sistema de control como se muestra en la figura 1.1.

Aunque existen variaciones de las topologías utilizadas, para el esquema discutido anteriormente, el STATCOM continúa con el mismo funcionamiento, sin alteraciones.

Las partes integrantes del STATCOM se discuten a continuación, identificando sus funciones y variaciones dentro de las topologías investigadas.

2.2.1. Inversores

2.2.1.1. Función

Los inversores son un conjunto de válvulas con capacidad de corte y conducción controladas, y su función en el STATCOM es la generación de la tensión alterna a partir de la tensión de corriente continua en el lado de corriente continua del capacitor.

2.2.1.2. Válvulas utilizadas

Las válvulas que componen actualmente a los inversores son GTO's (*Gate Turn Off Thyristor*), IGBT's (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) e IGCT's (*Integrated Gate Commutated Thyristor*). En la actualidad, con mayores capacidades de tensión de bloqueo (6,5kV) y corriente de corte (6kA), están siendo fabricados los HiGT (*High-Conductivity IGBT*) e IEGT's (*Injection Enhancement IGBT*).

A pesar de que la capacidad de bloqueo y corte de los IGBT's son un poco menores que los IGCT's, IEGT's y HiGT pueden soportar frecuencias de conmutación más altas. Es por esta razón que aún son más utilizados.

2.2.1.3. Topologías

Las disposiciones más comunes de los inversores del STATCOM están compuestas por inversores trifásicos de seis pulsos, como en la figura 2.3, inversores monofásicos agrupados en una estructura trifásica, figura 2.4, y por los inversores de tres niveles tipo “neutral point clamped”, o NPC, figura 2.5.

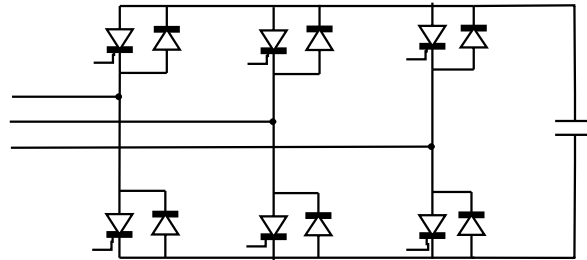


Figura 2.3: Inversor de seis pulsos

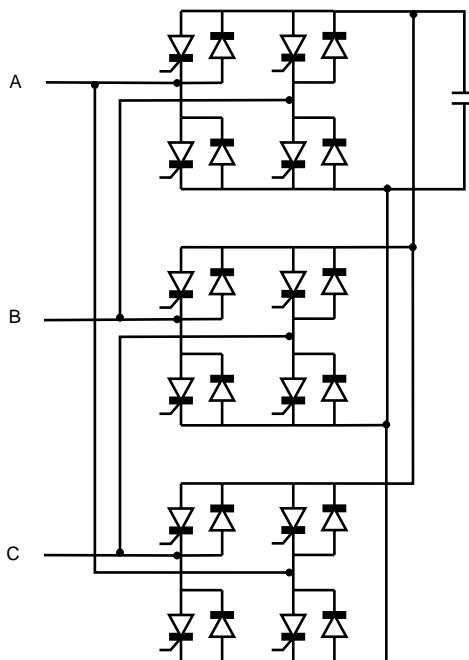


Figura 2.4: Inversor trifásico compuesto por 3 inversores puente H monofásicos

El inversor trifásico de seis pulsos, mostrado en la figura 2.3, tiene la ventaja de utilizar menos válvulas que los otros ejemplos mostrados. Idealmente se utilizan dos válvulas por cada fase, totalizando seis válvulas.

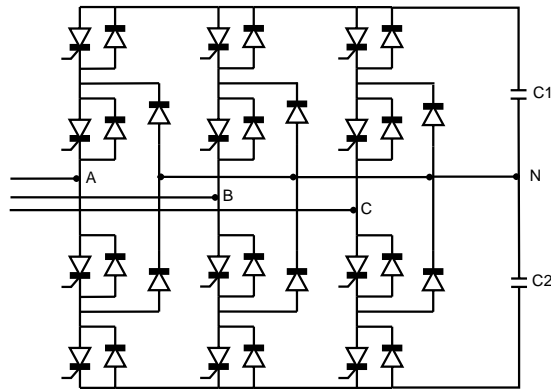


Figura 2.5: Inversor de tres niveles NPC

Los armónicos presentes en la tensión fase-fase del inversor de seis pulsos están en el orden de $6n \pm 1$, donde $n=0,1,2,\dots$, eliminando los armónicos¹ multiplos de 3 existentes en la tensión fase neutro [Narain G. Hingorani, 2000].

Los inversores monofásicos se pueden conectar formando una estructura trifásica como el mostrado en la figura 2.4.

Comparándolo con el inversor de seis pulsos, la estructura compuesta por inversores monofásicos utiliza mucho más válvulas(12 válvulas), es decir, el doble de lo que necesita el inversor de 6 pulsos, el cual, es una limitante importante cuando se desean implementar inversores de más pulsos como ocurre con la implementación del STATCOM.

Los inversores trifásicos de tres niveles, como el mostrado en la figura 2.5, han sido estudiados y recomendados, como lo más reciente en el desarrollo del STATCOM [Narain G. Hingorani, 2000].

La topología del *neutral point clamped*, solo utiliza 12 válvulas, siendo 4 por cada fase, además de 6 diodos. El resultado obtenido de la tensión fase fase es parecido al obtenido por la topología trifásica compuesta por inversores monofásicos.

Las desventajas de estas topologías, está en la gran cantidad de válvulas y diodos a utilizar, requiriendo una lógica de accionamiento más compleja. También se ha verificado que existen problemas con la equalización de las tensiones de los capacitores en el lado de corriente continua [S. Kincic,].

¹El análisis armónico será presentado en más detalle en el siguiente capítulo, para topologías del inversor del STATCOM de seis y doce pulsos

2.2.1.4. Frecuencia de conmutación

Las técnicas de accionamiento utilizadas para los inversores se pueden dividir en dos categorías cuando se aborda la frecuencia de conmutación: técnicas de accionamiento en bajas y altas frecuencias.

Los accionamientos dados en bajas frecuencias son aquellos que utilizan frecuencias próximas a la frecuencia de la red y se caracterizan por las formas de onda cuadradas, por las técnicas PAM, *pulse amplitud modulation* [Rashid, 2004]. Cuando se utiliza bajo número de pulsos, el contenido armónico en ordenes bajos puede ser alto. Una ventaja de esta técnica está ligada a menores pérdidas de energía en los elementos de conmutación.

Los accionamientos a altas frecuencias, caracterizadas por las técnicas PWM, utilizando frecuencias de conmutación mucho mayores que la de la red del orden de algunos kHz. Los armónicos producidos por estas técnicas tienen ordenes más altos que pueden ser filtrados más fácilmente. También se ha verificado que estas técnicas permiten respuestas dinámicas más rápidas. No obstante con el aumento de los equipamientos, las pérdidas de los dispositivos de conmutación aumentan, inviabilizando en muchos casos este tipo de modulación.

La técnica de modulación empleada en este trabajo para la lógica de disparo de los dispositivos de conmutación es la llamada SVPWM *modulación por ancho de pulso del vector espacial*, de la cual se hablará en detalle más adelante.

2.2.2. Capacitor del lado de corriente continua

2.2.2.1. Función

La principal función del lado de corriente continua del STATCOM, es servir de fuente de tensión DC, posibilitando la actuación del inversor. También un condensador del lado de corriente continua sirve como acumulador temporal de energía, permitiendo su intercambio entre el sistema eléctrico y el STATCOM.

2.2.2.2. Topologías

El arreglo de capacitores más empleado en el STATCOM, se muestra en la figura 2.6, donde solo un capacitor se conecta al lado de corriente continua de los inversores.

También, este tipo de topologías se puede extender en configuraciones de hasta 48 pulsos. Existen otros ejemplos, como el mostrado en la figura 2.7, donde para cada convertidor hay un capacitor independiente. En dicha figura se aprecia una sola fase, la cual, pertenece a una configuración trifásica .

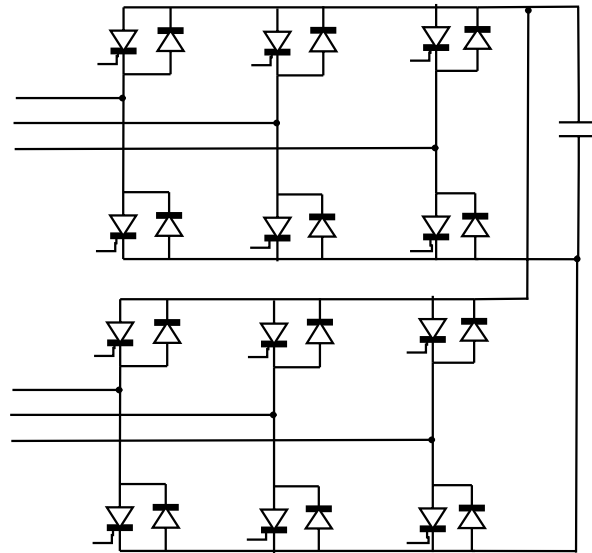


Figura 2.6: Topologías de capacitores del lado de corriente continua

2.2.3. Transformadores

En el STATCOM son utilizados dos grupos de transformadores para sus dos funciones principales. El *transformador de acoplamiento*, cuya función es la conexión del STATCOM con el sistema eléctrico de potencia, a fin de atender las limitaciones de tensión de los dispositivos de conmutación de los inversores. Y los *transformadores de estructura magnética de reducción de armónicos*, los cuales a través de formas especiales de conexión, eliminan algunos de los armónicos generados por los inversores reduciendo su contenido de inyección a la red. Existe la posibilidad de hacer transformadores que posean ambas funciones, pero éste tipo de arreglo no es común.

En cuanto al transformador de acoplamiento, posee relaciones simples de conexión entre primario y secundario, con conexiones de tipo estrella-estrella ó estrella-delta.

Cuando los transformadores se utilizan para reducir el contenido de armónicos, existen dos tipos de arreglos básicos: las topologías zig-zag y estrella-delta.

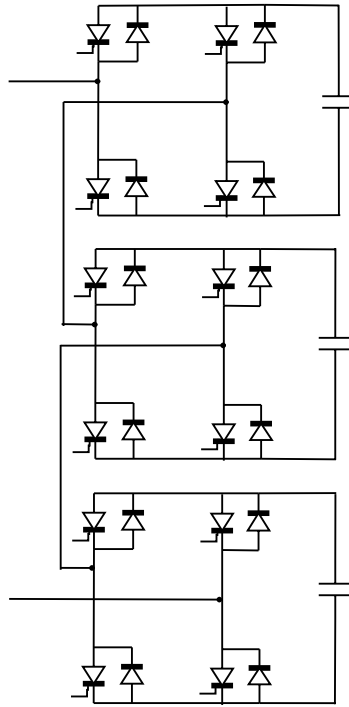


Figura 2.7: Topologías con capacitores individuales por cada inversor

2.2.3.1. Transformadores en zig-zag

El arreglo de transformadores llamados zig-zag está compuesto por transformadores especiales montados en forma tal de poder generar desfases en las tensiones. En la figura 2.8 se muestra un ejemplo de utilización de estos transformadores en un STATCOM de 12 pulsos.

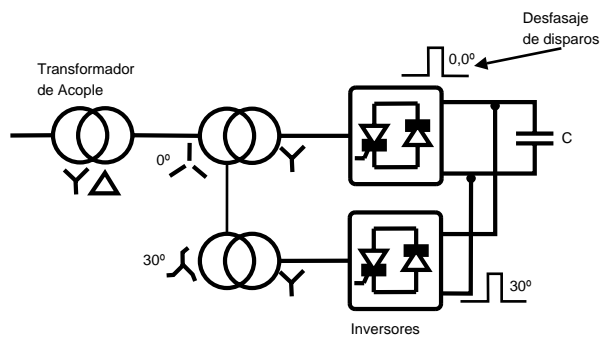


Figura 2.8: STATCOM de 12 pulsos utilizando transformadores zig-zag

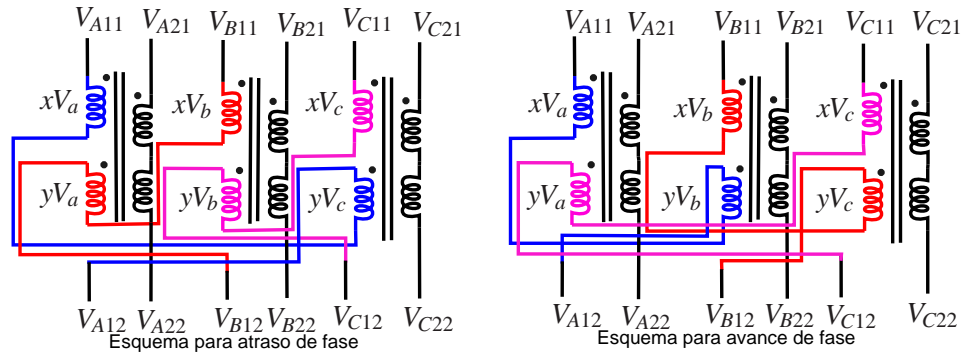


Figura 2.9: Esquemas de conexión de los transformadores zig-zag

En este trabajo se define el primario como el lado de alta, conectado al sistema de potencia definido por los índices V_{A11}, V_{A12} , y el secundario se refiere al lado de baja, el cual, está conectado hacia el lado de los inversores indicados por los índices V_{A21}, V_{A22} , como se muestra en la figura 2.9.

Las conexiones se pueden describir según las relaciones matemáticas :

$$V_{A(adelanto)} = x.V_A - y.V_B \quad (2.3)$$

$$V_{B(adelanto)} = x.V_B - y.V_C \quad (2.4)$$

$$V_{C(adelanto)} = x.V_C - y.V_A \quad (2.5)$$

$$V_{A(atraso)} = x.V_A - y.V_C \quad (2.6)$$

$$V_{B(atraso)} = x.V_B - y.V_A \quad (2.7)$$

$$V_{C(atraso)} = x.V_C - y.V_B \quad (2.8)$$

En estas ecuaciones los valores de x e y son coeficientes de proporción para lograr un valor de desfase α , con amplitud de un valor unitario, relacionados de la siguiente manera:

$$x = \cos \alpha - \frac{\sqrt{3}}{3} \sin \alpha \quad (2.9)$$

$$y = 2 \frac{\sqrt{3}}{3} \sin \alpha \quad (2.10)$$

Valores de α normalmente utilizados en la composición multipulsos del STATCOM, se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Valores de x y de y en función de α

α	x	y
0°	1	0
$7,5^\circ$	0,916	0,151
15°	0,816	0,229
$22,5^\circ$	0,703	0,442
30°	0,577	0,577
$37,5^\circ$	0,442	0,703
45°	0,229	0,816
$52,5^\circ$	0,151	0,916

El lado de los transformadores que corresponde al sistema AC, los devanados de los transformadores se conectan en serie, y el lado que corresponde al inverter se conectan en zig-zag, un ejemplo de éstas configuraciones se pueden encontrar en [S.Mori, 1993].

Éste arreglo de los transformadores, idealmente tiene la capacidad de hacer que se cancelen armónicos, permitiendo apenas armónicos del orden de $m6n \pm 1$, donde $n=1,2,3,\dots$ y $m=1,2,4,8,\dots$ es el número de inversores de seis pulsos utilizados.

Por todo lo dicho anteriormente, existe gran desventaja en la utilización de este tipo de transformadores zig-zag.

Debido a la complejidad de este transformador, su costo es mas elevado que el de otros transformadores más comunes. El montaje de las relaciones de fases son complejas y la relación de espiras necesita de alguna precisión, para obtener los desfasajes deseados y por consecuencia los armónicos que se desean cancelar. También es una desventaja de este arreglo la relación fija que deben tener cada uno de los tranformadores, a menos que sean disponibles varios taps para lograr la relación deseada.

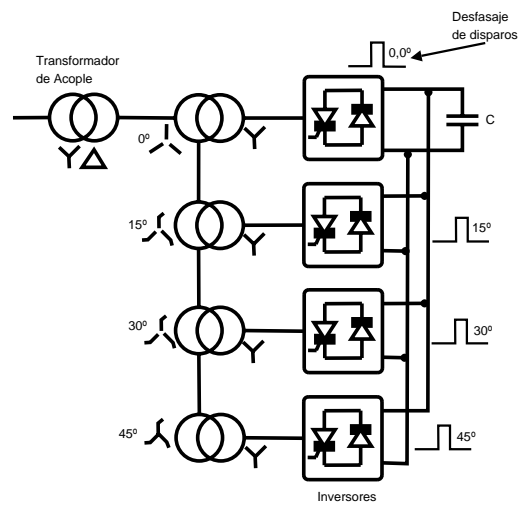


Figura 2.10: STATCOM de 24 pulsos utilizando transformadores zig-zag

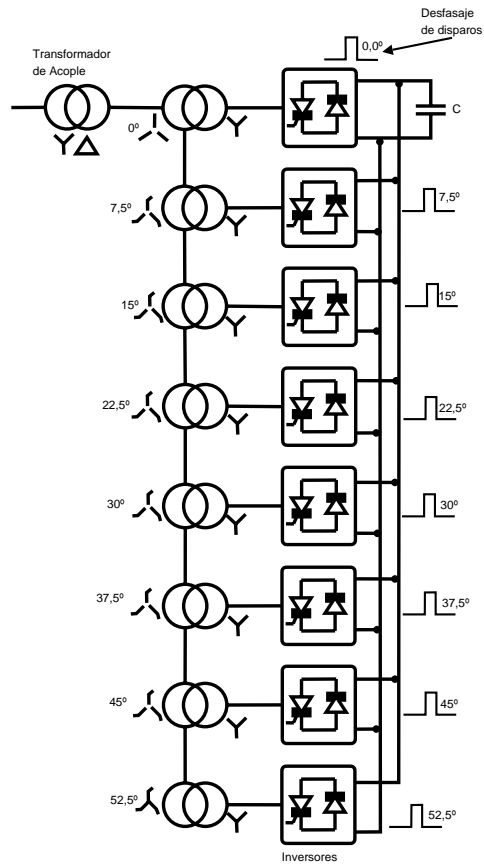


Figura 2.11: STATCOM de 48 pulsos utilizando transformadores zig-zag

Para cada uno de los arreglos multipulsos, mostrados en las figuras 2.8, 2.10 y 2.11, existe un valor de desfase específico entre los grupos de transformadores e inversores. El desfaseamiento se realiza a través del control de disparos de los inversores y por las relaciones de los transformadores zig-zag. Para obtener una forma de onda de 12 pulsos, es necesario obtener un desfase de 30° entre cada grupo de transformadores y un desfase de 30° entre los pulsos de disparo de los dos inversores. De esta misma forma se realizan los esquemas del STATCOM de 24 pulsos con desfases de 15° entre transformadores e inversores y el STATCOM 48 pulsos con desfases de $7,5^\circ$ entre transformadores e inversores.

Con el aumento del número de pulsos las tensiones generadas por el STATCOM, han de tener una mayor aproximación a la forma de onda de la tensión senoidal.

2.2.3.2. Transformadores en estrella - delta

Otra forma de arreglo de los transformadores, es la llamada composición *estrella - delta*. Es una forma aproximada pero su implementación es más simple. Como lo dice su nombre, este arreglo utiliza transformadores estrella-delta y estrella-estrella.

Unas de las ventajas existentes de la utilización de este tipo de transformadores es que serán iguales de 2 en 2 para el STATCOM de 24 pulsos, y de 4 en 4 para el STATCOM de 48 pulsos (mientras que para el esquema zig-zag se necesitan respectivamente 4 y 8 transformadores diferentes), y no existen complejas relaciones de los arrollamientos de sus devanados.

Al igual que en la composición zig-zag las señales de disparo tendrán los mismos desfases, los devanados del lado del sistema AC estarán en serie y los devanados del lado del inversor estarán en estrella o en delta, mientras que los desfases entre los transformadores serán de $\pm 30^\circ$ (dependiendo de la secuencia de fases). Por estas consideraciones se dice de que no existe un cancelamiento total de las componentes armónicas $6n \pm 1$, al contrario como ocurre con los esquemas zig-zag. Por eso muchos autores hablan para referirse al STATCOM, que utilizan estos esquemas de *quasi-24* y *quasi-48* pulsos [H. Fujita, 1996] [C.A.C. Cavaliere, 2000].

A manera de ejemplo se presenta un esquema de un STATCOM de *quasi-24* pulsos en la figura 2.12.

En los esquemas estrella-delta, también es necesario observar que los transformadores

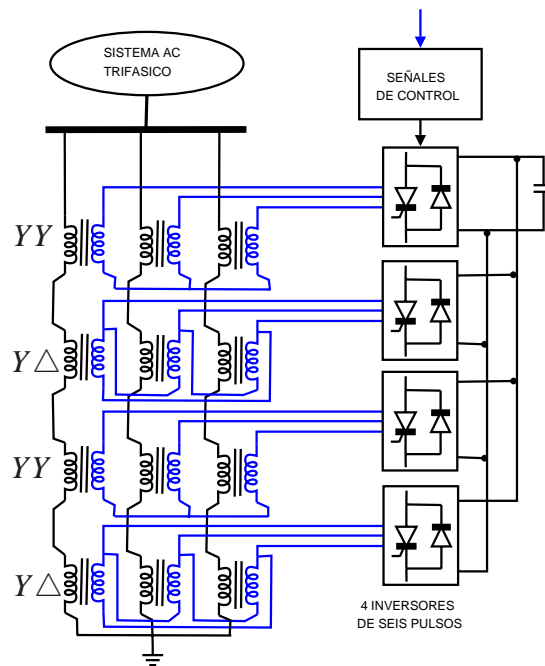
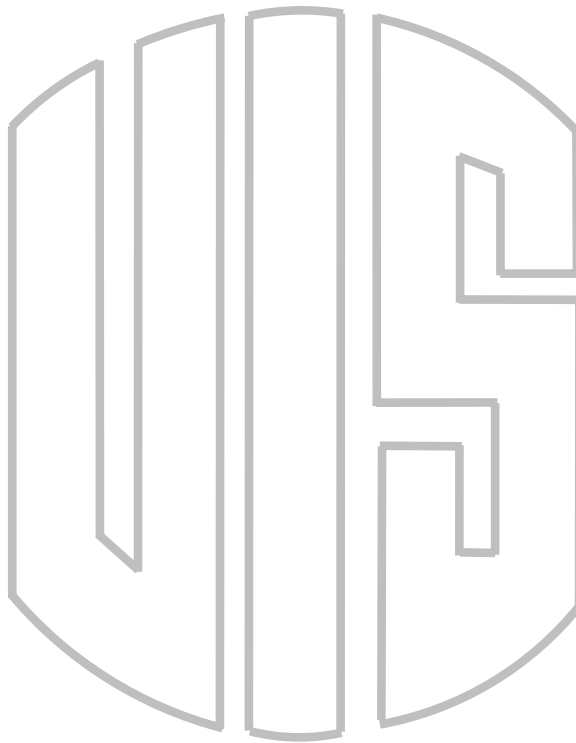


Figura 2.12: Diagrama de un STATCOM quasi-24 pulsos (esquema de conexiones estrella - delta)

estrella-delta tienen una relación de transformación de $\sqrt{3}$ entre primario y secundario y esto debe ser tenido en cuenta en las relaciones de tensión.

Capítulo 3

Análisis detallado del STATCOM de 6 y 12 pulsos



En este capítulo se hace un análisis del STATCOM de seis y doce pulsos, se hallan las expresiones matemáticas de las tensiones y corrientes del STATCOM, para tener una mejor comprensión acerca del intercambio de potencia reactiva entre el sistema AC y el compensador. Además se hace un análisis de Fourier, para saber que tipo de armónicos aparecen en corriente y en tensión en la red de potencia.

3.1. Introducción

En este capítulo se presenta un análisis detallado de un STATCOM de 6 y 12 pulsos. El análisis conlleva a tener una idea más clara de como ocurre el intercambio de potencia con el inversor, utilizando el capacitor como una fuente DC y de los modos de operación del STATCOM. Además se ofrece una importante explicación acerca de la disposición de un STATCOM multipulso.

3.2. Fuente inversora de Tensión (FIT)

La fuente inversora de tensión tal como se muestra en la figura 3.1, consta de una configuración trifásica, comunmente llamada inversor de seis pulsos, colocados paralelamente en tres ramas de a dos dispositivos de conmutación (GTO's, IGBT's), por cada rama, acompañados de sus respectivos diodos antiparalelos.

Las señales de control de disparos g_i , aplicadas a los transistores se controlan tal que cada una conduce sobre 180° , cuando el inversor se conecta a una carga resistiva. La figura 3.2 muestra las señales de disparo de los transistores. El inversor se puede ver como la combinación de tres inversores monofásicos donde cada brazo produce una señal desfasada $\pm 120^\circ$ con respecto a las otras. Las señales de disparo están desfasadas 60° entre sí.

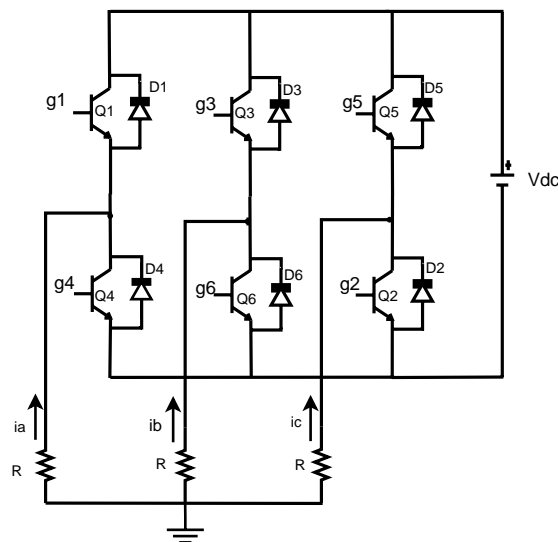


Figura 3.1: Fuente inversora de tensión

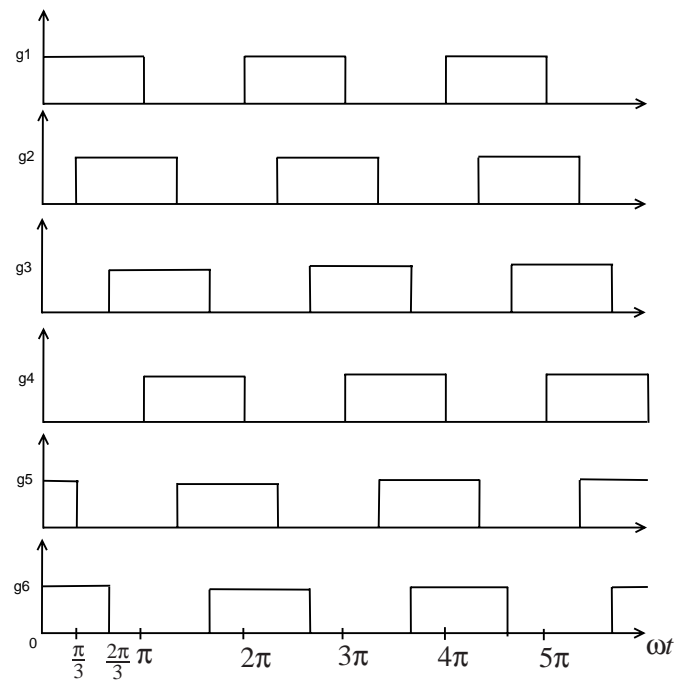


Figura 3.2: Señales de disparo

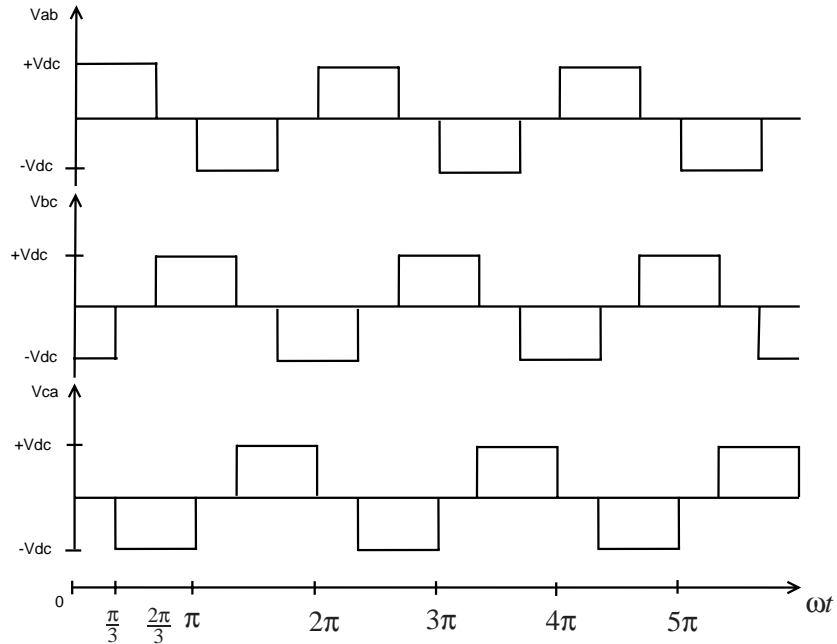


Figura 3.3: Formas de onda de las tensiones línea a línea

La secuencia de conmutación mostrada en la figura 3.2 genera las tensiones de línea

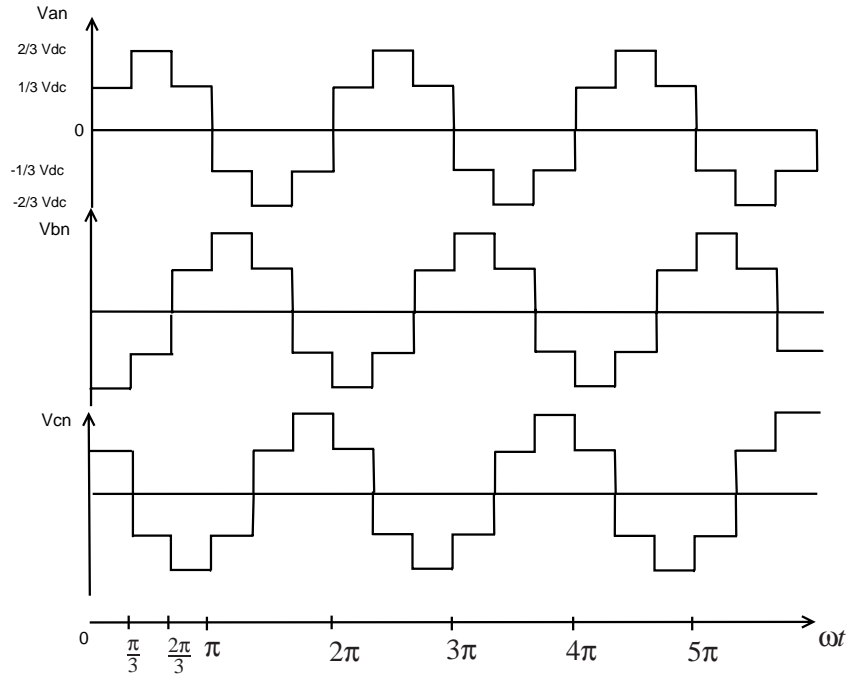


Figura 3.4: Formas de onda de las tensiones línea a neutro

$v_{ab}(t)$, $v_{bc}(t)$ y $v_{ca}(t)$ ilustradas en la figura 3.3. En esta figura se nota que las tensiones de línea tienen un ancho de pulso de 120° con una magnitud pico de tensión, V_{DC} . Por cada intervalo de 60° existen tres diferentes modos de operación [N. Mohan, 1995]; en el primer medio ciclo la secuencia de operación 1-5-6 (fig 3.5), 1-2-6 (fig 3.6) y 1-2-3 (fig 3.7). En orden para obtener las tensiones línea a neutro, serán analizados los diferentes modos de operación correspondientes.

Secuencia 1-5-6; $0 \leq \omega t \leq \pi/3$

$$v_{an} = v_{cn} = \frac{1}{3}V_{DC}$$

$$v_{bn} = -\frac{2}{3}V_{DC}$$

Secuencia 1-2-6; $\pi/3 \leq \omega t \leq 2\pi/3$

$$v_{an} = \frac{2}{3}V_{DC}$$

$$v_{bn} = v_{cn} = -\frac{1}{3}V_{DC}$$

Secuencia 1-2-3; $2\pi/3 \leq \omega t \leq \pi$

$$v_{an} = v_{bn} = \frac{1}{3}V_{DC}$$

$$v_{cn} = -\frac{2}{3}V_{DC}$$

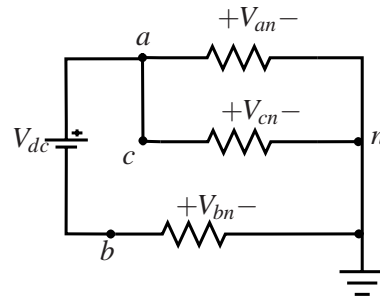


Figura 3.5: Circuito equivalente para la secuencia 1-5-6

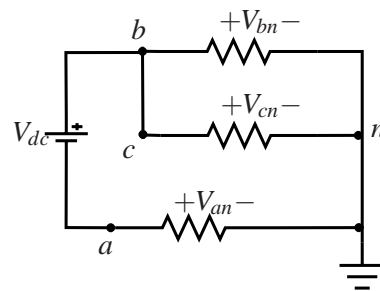


Figura 3.6: Circuito equivalente para la secuencia 1-2-6

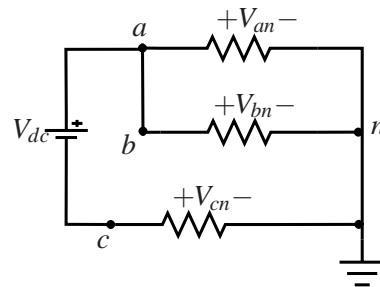


Figura 3.7: Circuito equivalente para la secuencia 1-2-3

Los siguientes tres modos de operación se obtienen en forma similar, donde ellos son los negativos de los tres modos anteriores. La figura 3.4 muestra las tensiones línea a neutro $v_{an}(t)$, $v_{bn}(t)$ y $v_{cn}(t)$. La sincronización y la frecuencia de las tensiones generadas dependen directamente de la sincronización y frecuencia de las señales de disparo y no del tipo de carga. La magnitud pico de tensión depende de la tensión DC.

3.3. Análisis armónico

El contenido armónico de las tensiones línea a línea y línea a neutro, se pueden obtener aplicando un análisis de Fourier para las formas de onda mostradas en las figuras 3.3 y 3.4. La simetría impar de la tensión $v_{ab}(t)$ se obtiene atrasandola 30° , además los valores instantáneos de $v_{ab}(t)$ basados en el análisis de Fourier es dado por:

$$v_{ab}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_{ab_n} \sin(n\omega t + \frac{\pi}{6}n) \quad (3.1)$$

Tomando las indicaciones de [William H. Hayt Jr., 1998] acerca de la simetría impar de la señal se puede hallar:

$$V_{ab_n}(t) = \frac{4}{T} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} V_{DC} \sin(n\omega t) d\omega t \quad (3.2)$$

con $T=2\pi$

así que:

$$V_{ab_n} = \frac{2}{n\pi} V_{DC} (\cos(\frac{\pi}{6}n) - \cos(\frac{5\pi}{6}n)) \quad (3.3)$$

De la ecuación (3.3) se nota que sólo los terminos $6r \pm 1$ ($n=6r \pm 1$), donde r , son todos los enteros positivos, tal que $n= 1,5,7,11,13\dots$, además la ecuación (3.3) se puede reducir a:

$$V_{ab_n} = \frac{4}{n\pi} V_{DC} \cos(\frac{\pi}{6}n) \quad \forall n = 6r \pm 1, r = 0, 1, 2, \dots \quad (3.4)$$

Finalmente la tensión $v_{ab}(t)$, se expresa por la ecuación (3.5). Similarmente las tensiones $v_{bc}(t)$ y $v_{ca}(t)$ se obtienen de la misma manera:

$$v_{ab}(t) = \frac{4}{\pi} V_{DC} \sum_n \frac{1}{n} \cos\left(\frac{\pi}{6}n\right) \sin\left(n\omega t + \frac{\pi}{6}n\right) \quad (3.5)$$

$$v_{bc}(t) = \frac{4}{\pi} V_{DC} \sum_n \frac{1}{n} \cos\left(\frac{\pi}{6}n\right) \sin\left(n\omega t - \frac{\pi}{2}n\right) \quad (3.6)$$

$$v_{ca}(t) = \frac{4}{\pi} V_{DC} \sum_n \frac{1}{n} \cos\left(\frac{\pi}{6}n\right) \sin\left(n\omega t - \frac{7\pi}{6}n\right) \quad (3.7)$$

$$\forall n = 6r \pm 1 \quad r = 0, 1, 2, 3, \dots$$

De una manera similar se obtiene el contenido armónico de las tensiones línea a neutro $v_{an}(t)$, $v_{bn}(t)$ y $v_{cn}(t)$. Analizando $v_{an}(t)$ se nota que tiene simetría impar, así que

$$v_{an}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_{an_n} \sin(n\omega t)$$

donde:

$$V_{an_n} = \frac{4}{3T} V_{DC} \left(\int_0^{\pi/3} \sin(n\omega t) d\omega t + 2 \int_{\pi/3}^{2\pi/3} \sin(n\omega t) d\omega t + \int_{2\pi/3}^{\pi} \sin(n\omega t) d\omega t \right) \quad (3.8)$$

y $T=2\pi$.

Por consiguiente:

$$V_{an_n} = \frac{2}{3n\pi} V_{DC} \left(\cos\left(\frac{\pi}{3}n\right) - \cos\left(\frac{2\pi}{3}n\right) + 1 - (-1)^n \right) \quad (3.9)$$

Aunque las formas de onda de las tensiones línea a línea y línea a neutro, son diferentes, ellas presentan un contenido armónico similar. Las tensiones línea a neutro también poseen armónicos del orden $n=6r \pm 1$, donde r son los enteros positivos tal que $n=1,5,7,11,13,\dots$, con relación a esto, la ecuación (3.9) se puede expresar por:

$$V_{an_n} = \frac{4}{3n\pi} V_{DC} \left(\cos\left(\frac{\pi}{3}n\right) + 1 \right) \quad \forall n = 6r \pm 1, \quad r = 0, 1, 2, \dots \quad (3.10)$$

Las siguientes ecuaciones describen las tensiones línea a neutro basado en el análisis

de Fourier

$$v_{an}(t) = \frac{4}{3\pi} V_{DC} \sum_n^{\infty} \frac{1}{n} \left(\cos\left(\frac{\pi}{3}n\right) + 1 \right) \sin(n\omega t) \quad (3.11)$$

$$v_{bn}(t) = \frac{4}{3\pi} V_{DC} \sum_n^{\infty} \frac{1}{n} \left(\cos\left(\frac{\pi}{3}n\right) + 1 \right) \sin\left(n\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.12)$$

$$v_{cn}(t) = \frac{4}{3\pi} V_{DC} \sum_n^{\infty} \frac{1}{n} \left(\cos\left(\frac{\pi}{3}n\right) + 1 \right) \sin\left(n\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.13)$$

$$\forall n = 6r \pm 1 \quad r = 0, 1, 2, 3, \dots$$

De estas ecuaciones se puede notar que las tensiones de fase y de línea están desfasadas por 30° , y que las tensiones de línea son $\sqrt{3}$ veces las tensiones de fase.

3.4. Compensador estático síncrono (STATCOM) basado en un inversor de seis pulsos

Los compensadores estáticos son dispositivos con la habilidad de generar y absorber potencia reactiva y activa, pero la aplicación más común es el intercambio de potencia reactiva entre el sistema AC y el compensador.

El compensador estático síncrono (STATCOM) basado en un inversor de seis pulsos como el que se muestra en la figura 3.8, es un bloque de construcción básica para los compensadores de gran potencia. Aunque en aplicaciones de gran potencia esta configuración no es muy utilizada debido al gran número de armónicos que genera. Consecuentemente se le hace un análisis en corriente, para tener una base y comprender mejor las configuraciones de inversores de más pulsos.

3.4.1. Intercambio de potencia reactiva

Como se explicó anteriormente el intercambio de potencia reactiva entre el sistema AC y el compensador se controla por la variación de la magnitud de la componente fundamental de la tensión del inversor, por encima o por debajo de la tensión del sistema AC.

El control del compensador se lleva a cabo por pequeñas variaciones del ángulo de disparo de los dispositivos semiconductores, a fin de que la componente fundamental de la

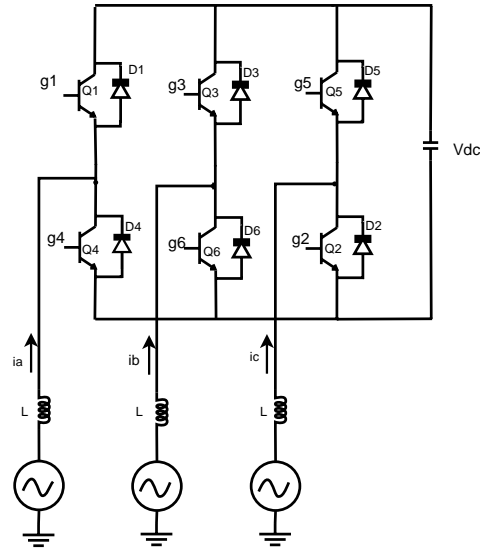


Figura 3.8: STATCOM con inversor de seis pulsos

tensión producida por el inversor se obligue a adelantar o atrasar la tensión del sistema AC por unos pocos grados. Esto causa un flujo de potencia activa entrando o saliendo del inversor modificando el valor de tensión DC del capacitor, y consecuentemente la magnitud de la tensión en terminales del inversor, resultando un flujo de potencia reactiva. Si el compensador solo suministra potencia reactiva, la potencia reactiva suministrada por el capacitor será cero y además su tensión no cambiará.

3.4.1.1. Análisis de las señales de corrientes AC

El flujo de corriente entre el compensador y el sistema AC se determina por la tensión que aparece a través del inductor. Tomando la tensión del sistema AC puramente senoidal $e_{an}(t) = V_m \text{sen}(\omega t)$, entonces la magnitud de la componente fundamental de la tensión del inversor dada por la ecuación (3.13) $v_{an}(t) = 0,6366 V_{DC} \text{sen}(\omega t)$, entonces,

$$i_a(t)_1 = -\frac{V_m - 0,6366 V_{DC}}{\omega L} \text{cos}(\omega t); \text{ (componente fundamental)}$$

$$i_a(t)_n = \frac{0,6366 V_{DC}}{n^2 \omega L} \text{cos}(n\omega t); \text{ (componente del armónico n)}$$

la componente fundamental de la corriente también se llama componente fundamental I_q .

$$I_{a1} = I_q = \frac{V_m - 0,6366 V_{DC}}{\omega L} \tag{3.14}$$

$$I_{an} = I_{qn} = \frac{0,6366 V_{DC}}{n^2 \omega L} \quad n > 1 \quad (3.15)$$

Respecto a lo anterior la componente fundamental de la corriente estará en adelanto cuando $V_m < 0,6366 V_{DC}$. Esto es, si la amplitud de la tensión del inversor se incrementa por encima de la tensión del sistema AC (la corriente fluye del convertidor al sistema AC); en este caso el compensador se ve como un capacitor desde el sistema AC. La componente fundamental de la corriente estará atrasada cuando $V_m > 0,6366 V_{DC}$, esto es, si la amplitud de la tensión del inversor está por debajo de la del sistema AC (la corriente fluye del sistema AC al convertidor). En este caso el compensador se ve como un inductor desde el sistema AC.

De la ecuación (3.15) se puede deducir que los armónicos solo fluyen del compensador al sistema AC.

Las ecuaciones de $i_a(t)$, se derivan teniendo en cuenta la tensión a través de los terminales del inductor sobre cada intervalo de conducción de 60° (fig 3.9). Las otras dos corrientes de fase $i_b(t)$ e $i_c(t)$ serán idénticas, excepto desfasadas por 120° y 240° respectivamente.

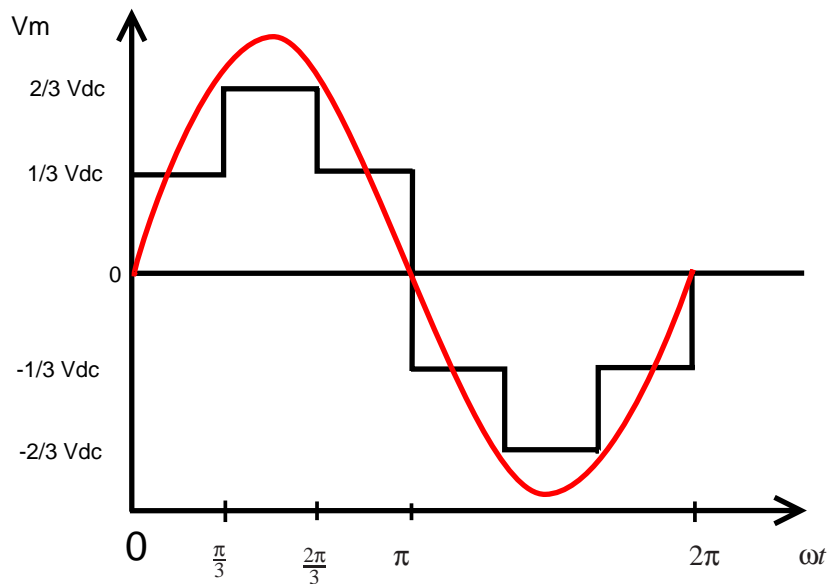


Figura 3.9: Tensiones de fase del compensador y del sistema AC

En todo tiempo la tensión $v_L(t) = L \frac{d}{dt} i_a(t)$, donde $v_L(t)$ es la tensión instantánea del inductor, la cual, es la diferencia de las tensiones instantáneas del sistema AC, $e_{an}(t)$, y

el STATCOM, $v_{an}(t)$. Las siguientes ecuaciones pueden ser escritas para cada intervalo de conducción de 60° .

- Intervalo: $0 \leq \omega t \leq \pi/3$

$$v_L(t) = V_m \text{sen}(\omega t) - \frac{1}{3}V_{DC} = L \frac{d}{dt} i_a(t)$$

integrando a ambos lados se tiene:

$$i_a(t) = -\frac{V_m}{\omega L} (\cos(\omega t) - 1) - \frac{1}{3L}V_{DC}t + I_0 \quad (3.16)$$

donde, I_0 es la condición inicial en $t = 0$; $i_a(0) = I_0$.

- Intervalo: $\pi/3 \leq \omega t \leq 2\pi/3$

$$v_L(t) = V_m \text{sen}(\omega t) - \frac{2}{3}V_{DC} = L \frac{d}{dt} i_a(t)$$

integrando a ambos lados se tiene:

$$i_a(t) = -\frac{V_m}{\omega L} \left(\cos(\omega t) - \frac{1}{2} \right) - \left(\frac{2}{3L}t - \frac{2\pi}{9\omega L} \right) V_{DC} + I_1 \quad (3.17)$$

donde, $I_1 = i_a(\frac{\pi}{3\omega})$

- intervalo $2\pi/3 \leq \omega t \leq \pi$

$$v_L(t) = V_m \text{sen}(\omega t) - \frac{1}{3}V_{DC} = L \frac{d}{dt} i_a(t)$$

integrando a ambos lados en ese intervalo:

$$i_a(t) = -\frac{V_m}{\omega L} \left(\cos(\omega t) - \frac{1}{2} \right) - \left(\frac{1}{3L}t - \frac{2\pi}{9\omega L} \right) V_{DC} + I_2 \quad (3.18)$$

donde, $I_2 = i_a(\frac{2\pi}{3\omega})$

y es conocido que en estado estable la forma de onda de la corriente es simétrica, además:

$$i_a\left(\frac{\pi}{2\omega}\right) = 0$$

Teniendo en cuenta la propiedad mostrada arriba, la condición en estado estable I_0 , se puede calcular como sigue, reemplazando en la ecuación (3.17):

$$i_a\left(\frac{\pi}{2\omega}\right) = -\frac{V_m}{\omega L} \left(\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) - \frac{1}{2}\right) - \left(\frac{2}{3L} \cdot \frac{\pi}{2\omega} - \frac{2\pi}{9\omega L}\right) V_{DC} + I_1 = 0$$

$$I_1 = -\frac{V_m}{2\omega L} + \frac{\pi}{9\omega L} V_{DC} \quad (3.19)$$

Ahora se reemplaza en la ecuación (3.16),

$$i_a\left(\frac{\pi}{3\omega}\right) = -\frac{V_m}{\omega L} \left(\cos\left(\frac{\pi}{3}\right) - 1\right) - \frac{1}{3L} V_{DC} \frac{\pi}{3\omega} + I_0 = 0$$

$$I_1 = \frac{V_m}{2\omega L} - \frac{\pi}{9\omega L} V_{DC} + I_0 \quad (3.20)$$

de las ecuaciones (3.19) y (3.20), se puede estimar

$$I_0 = -\frac{V_m}{\omega L} + \frac{2\pi}{9\omega L} V_{DC} \quad (3.21)$$

substituyendo la ecuación (3.21) en (3.16), se derivan las ecuaciones en estado estable,

$$i_a(t) = -\frac{V_m}{\omega L} \cos(\omega t) - \left(\frac{1}{3L}t - \frac{2\pi}{9\omega L}\right) V_{DC} \quad (3.22)$$

$$0 \leq \omega t \leq \pi/3$$

$$i_a(t) = -\frac{V_m}{\omega L} \cos(\omega t) - \left(\frac{2}{3L}t - \frac{\pi}{3\omega L}\right) V_{DC} \quad (3.23)$$

$$\pi/3 \leq \omega t \leq 2\pi/3$$

$$i_a(t) = -\frac{V_m}{\omega L} \cos(\omega t) - \left(\frac{1}{3L}t - \frac{\pi}{9\omega L}\right) V_{DC} \quad (3.24)$$

$$2\pi/3 \leq \omega t \leq \pi$$

En el intervalo $\pi \leq \omega t \leq 2\pi$, las formas de la corriente son negativas respecto a las corrientes definidas anteriormente en cada intervalo. La figura 3.10 describe las forma de onda de las corrientes para la fase “a”. Para el caso de adelanto $V_{DC} = 6V$, $V_m = 2,5V$ y $L = 3mH$, para el caso de atraso en corriente $V_{DC} = 6V$, $V_m = 4,5V$ y $L = 3mH$.

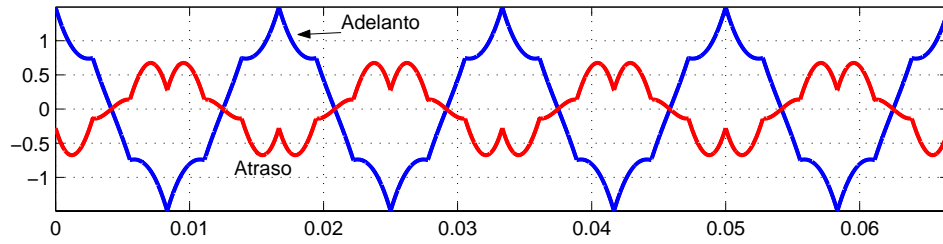


Figura 3.10: Corrientes entre el sistema AC y el compensador

3.4.1.2. Corriente en el capacitor

La corriente en el capacitor se construye a segmentos de las corrientes del sistema AC y depende de los dispositivos semiconductores que estén conduciendo en los intervalos de 60° . La corriente en el capacitor se puede deducir de la siguiente forma:

$$i_{D1}(t) + i_{D3}(t) + i_{D5}(t) + i_{DC}(t) = i_{Q1}(t) + i_{Q3}(t) + i_{Q5}(t)$$

así que:

$$i_{DC}(t) = i_{Q1}(t) + i_{Q3}(t) + i_{Q5}(t) - (i_{D1}(t) + i_{D3}(t) + i_{D5}(t)) \quad (3.25)$$

- Intervalo; $0 \leq \omega t \leq \pi/3$

$$i_{DC}(t) = i_a(t) + i_c(t)$$

donde:

$$i_c(t) = -\frac{V_m}{\omega L} \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) - \left(\frac{1}{3L}t + \frac{\pi}{9\omega L}\right) V_{DC}$$

así que:

$$i_{DC}(t) = \frac{V_m}{\omega L} \text{sen}\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) - \left(\frac{2}{3L}t - \frac{\pi}{9\omega L}\right) V_{DC} \quad (3.26)$$

- Intervalo; $\pi/3 \leq \omega t \leq 2\pi/3$

$$i_{DC}(t) = i_a(t)$$

$$i_a(t) = -\frac{V_m}{\omega L} \cos(\omega t) - \left(\frac{2}{3L}t - \frac{\pi}{3\omega L}\right) V_{DC} \quad (3.27)$$

- Intervalo; $2\pi/3 \leq \omega t \leq \pi$

$$i_{DC}(t) = i_a(t) + i_b(t)$$

donde:

$$i_b(t) = -\frac{V_m}{\omega L} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) - \left(\frac{1}{3L}t - \frac{4\pi}{9\omega L}\right) V_{DC}$$

asi que:

$$i_{DC}(t) = \frac{V_m}{\omega L} \operatorname{sen}\left(\omega t - \frac{5\pi}{6}\right) - \left(\frac{2}{3L}t - \frac{5\pi}{9\omega L}\right) V_{DC} \quad (3.28)$$

Estas expresiones son equivalentes excepto cambiadas de fase por 60° entre sí. Además, la forma de onda de la corriente en el capacitor en los tres periodos de conducción es idéntica a la descrita por la ecuación (3.26).

3.4.1.3. Tensión DC en el capacitor

El análisis previo asume una tensión DC constante. Esto es equivalente a considerar una capacitancia infinita y consecuentemente un ripple de tensión igual a cero. Si se tiene una capacitancia finita, entonces se considera que existe un ripple de tensión DC, que depende del valor del capacitor y de la corriente que circule por dicho capacitor.

Asumiendo la corriente dada por la ecuación (3.26), la tensión en el capacitor sobre los primeros 60° de conducción está dado por:

$$v_{cap}(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_{DC}(t) dt + V_0 \quad (3.29)$$

donde V_0 es la condición inicial en $t = 0$, $V_0 = v_{cap}(0)$. Sustituyendo la ecuación (3.26) en la ecuación (3.29) se tiene que:

$$v_{cap}(t) = -\frac{V_m}{\omega^2 LC} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) - \frac{1}{3LC} V_{DC} t^2 + \frac{\pi}{9\omega LC} V_{DC} t + \frac{\sqrt{3}V_m}{2\omega^2 LC} + V_0 \quad (3.30)$$

El valor de V_0 se calcula de la componente promedio de la ecuación (3.30) con periodo $T = \pi/3\omega$. Con el mismo periodo de tiempo se determina el nivel de tensión V_{DC} .

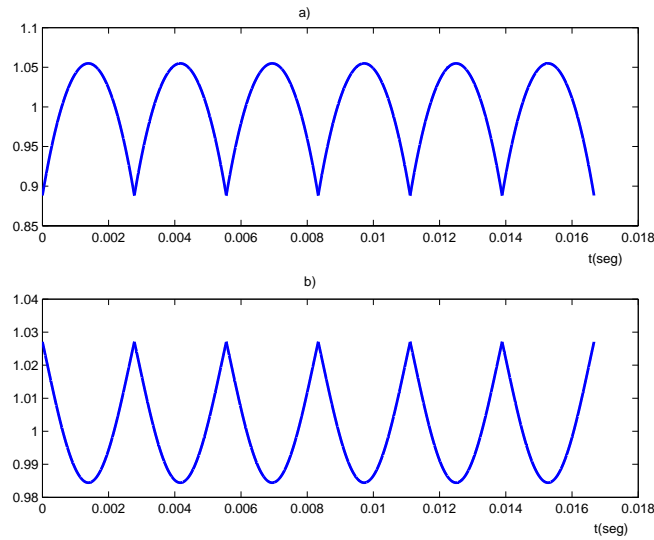


Figura 3.11: Tensión del capacitor a) generando potencia reactiva; b) absorbiendo potencia reactiva

$$V_{DC} = \frac{1}{C} \int_0^{\frac{\pi}{3\omega}} v_{cap}(t) dt \quad (3.31)$$

$$V_{DC} = \frac{3\omega}{\pi} \left(-\frac{V_m}{\omega^3 LC} - \frac{\pi^3}{243\omega^3 LC} V_{DC} + \frac{\pi^3}{162\omega^3 LC} + \frac{\sqrt{3}\pi}{6\omega^3 LC} V_m + \frac{\pi}{3\omega} V_0 \right) \quad (3.32)$$

Simplificando estas expresiones resulta que :

$$V_0 = 0,0889 \left(\frac{V_m}{\omega^2 LC} \right) - 0,0609 \left(\frac{1}{\omega^2 LC} V_{DC} \right) + V_{DC} \quad (3.33)$$

Las formas de onda de corriente y tensión del capacitor obtenidas mediante las ecuaciones (3.26) y (3.30) se muestran en las figuras 3.11 y 3.12. La figura 3.11 ilustra que la tensión pico máximo V_{pmax} ocurre cuando el compensador está generando potencia reactiva (corriente en adelanto), $\omega t = \pi/3$.

$$V_{pmax} = v_{cap} \left(\frac{\pi}{6\omega} \right) = - \left(\frac{V_m}{\omega^2 LC} \right) - \left(\frac{\pi}{6\omega} \right)^2 \left(\frac{1}{3LC} V_{DC} \right) + \left(\frac{\pi}{9\omega LC} V_{DC} \right) \left(\frac{\pi}{6\omega} \right)$$

$$+\frac{\sqrt{3}V_m}{2\omega^2LC} + V_0$$

Simplificando se obtiene:

$$V_{pmax} = -0,0451 \frac{V_m}{\omega^2LC} + 0,0305 \left(\frac{V_{DC}}{\omega^2LC} \right) + V_{DC} \quad (3.34)$$

El valor pico de tensión obtenido arriba es importante porque esta tensión pico es aplicada directamente sobre los dispositivos semiconductores, los cuales se deben especificar para soportar como mínimo este valor de tensión en estado estable.

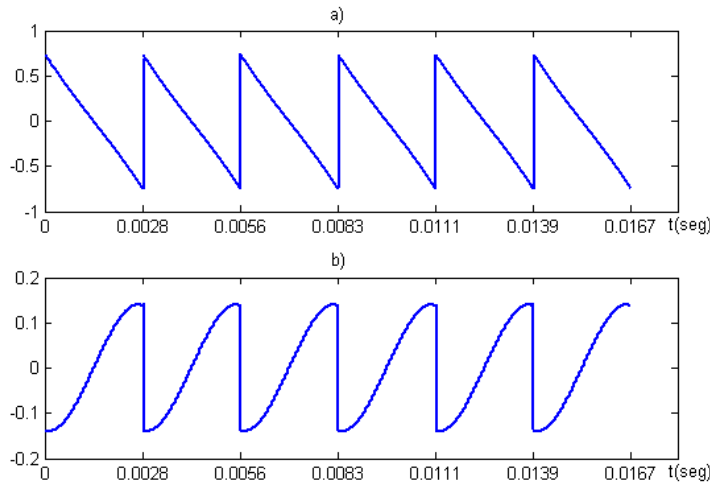


Figura 3.12: Corrientes del capacitor a) generando potencia reactiva; b) absorbiendo potencia reactiva

3.4.2. Intercambio de potencia activa y reactiva

Considerando una diferencia de fase ϕ entre el sistema AC y la componente fundamental de la tensión del compensador, como se muestra en la figura 3.13, permite el intercambio de potencia activa y reactiva.

De manera similar para obtener las ecuaciones de corriente como en la sección 3.4.1.1, se procede de la misma forma:

- Intervalo: $0 \leq \omega t \leq \pi/3$

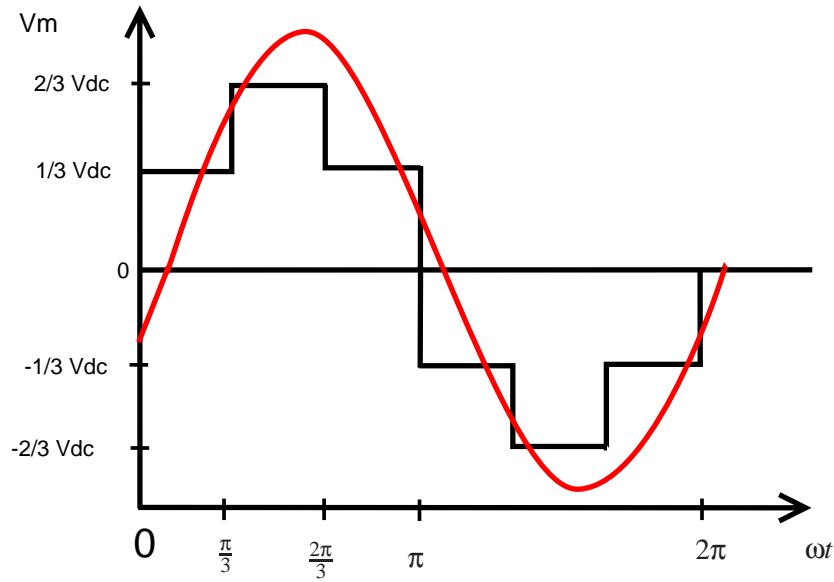


Figura 3.13: Tensiones de fase del compensador y del sistema AC

$$v_L(t) = V_m \text{sen}(\omega t - \phi) - \frac{1}{3}V_{DC} = L \frac{d}{dt} i_a(t)$$

integrando a ambos lados se tiene:

$$i_a(t) = -\frac{V_m}{\omega L} (\cos(\omega t - \phi) - \cos(\phi)) - \frac{1}{3L}V_{DC}t + I_0 \quad (3.35)$$

donde: I_0 es la condición inicial en $t = 0$; $i_a(0) = I_0$.

- Intervalo: $\pi/3 \leq \omega t \leq 2\pi/3$

$$v_L(t) = V_m \text{sen}(\omega t) - \frac{2}{3}V_{DC} = L \frac{d}{dt} i_a(t)$$

integrando a ambos lados se tiene:

$$i_a(t) = -\frac{V_m}{\omega L} \left(\cos(\omega t - \phi) - \cos\left(\frac{\pi}{3} - \phi\right) \right) - \left(\frac{2}{3L}t - \frac{2\pi}{9\omega L} \right) V_{DC} + I_1 \quad (3.36)$$

donde: $I_1 = i_a\left(\frac{\pi}{3\omega}\right)$

- intervalo $2\pi/3 \leq \omega t \leq \pi$

$$v_L(t) = V_m \text{sen}(\omega t - \phi) - \frac{1}{3}V_{DC} = L \frac{d}{dt} i_a(t)$$

integrando a ambos lados en ese intervalo:

$$i_a(t) = -\frac{V_m}{\omega L} \left(\cos(\omega t - \phi) - \cos\left(\frac{2\pi}{3} - \phi\right) \right) - \left(\frac{1}{3L}t - \frac{2\pi}{9\omega L} \right) V_{DC} + I_2 \quad (3.37)$$

donde: $I_2 = i_a\left(\frac{2\pi}{3\omega}\right)$

y además teniendo en cuenta que $i_a(0) = -i_a\left(\frac{\pi}{\omega}\right)$, en estado estable la condición inicial se puede calcular como sigue:

De la ecuación (3.37) se obtiene

$$I_0 = -i_a\left(\frac{\pi}{\omega}\right) = \frac{V_m}{\omega L} \left(\cos(\pi - \phi) - \cos\left(\frac{2\pi}{3} - \phi\right) \right) + \left(\frac{1}{3L} \cdot \frac{\pi}{\omega} - \frac{2\pi}{9\omega L} \right) V_{DC} - I_2$$

así que:

$$I_0 = \frac{V_m}{\omega L} \left(\cos(\pi - \phi) - \cos\left(\frac{2\pi}{3} - \phi\right) \right) + \frac{\pi}{9\omega L} V_{DC} - I_2 \quad (3.38)$$

Ahora aplicando las condiciones iniciales para sus respectivas ecuaciones:

$$I_2 = i_a\left(\frac{2\pi}{3\omega}\right) = -\frac{V_m}{\omega L} \left(\cos\left(\frac{2\pi}{3} - \phi\right) - \cos\left(\frac{2\pi}{3} - \phi\right) \right) - \frac{2\pi}{9\omega L} V_{DC} + I_1 \quad (3.39)$$

$$I_1 = i_a\left(\frac{\pi}{3\omega}\right) = -\frac{V_m}{\omega L} \left(\cos\left(\frac{\pi}{3} - \phi\right) - \cos(\phi) \right) - \frac{\pi}{9\omega L} V_{DC} + I_0 \quad (3.40)$$

Sustituyendo las ecuaciones (3.39) y (3.40) en la ecuación (3.38) se puede estimar que:

$$I_0 = -\frac{V_m}{\omega L} \cos(\phi) + \frac{2\pi}{9\omega L} V_{DC} \quad (3.41)$$

Por consiguiente de la ecuación (3.41) se derivan las ecuaciones en estado estable,

$$i_a(t) = -\frac{V_m}{\omega L} \cos(\omega t - \phi) - \left(\frac{1}{3L}t - \frac{2\pi}{9\omega L} \right) V_{DC} \quad (3.42)$$

$$0 \leq \omega t \leq \pi/3$$

$$i_a(t) = -\frac{V_m}{\omega L} \cos(\omega t - \phi) - \left(\frac{2}{3L}t - \frac{\pi}{\omega L} \right) V_{DC} \quad (3.43)$$

$$\pi/3 \leq \omega t \leq 2\pi/3$$

$$i_a(t) = -\frac{V_m}{\omega L} \cos(\omega t - \phi) - \left(\frac{1}{3L}t - \frac{\pi}{9\omega L} \right) V_{DC} \quad (3.44)$$

$$2\pi/3 \leq \omega t \leq \pi$$

3.5. Conversor de 12 pulsos

El conversor de seis pulsos en muchas aplicaciones de gran potencia no es muy empleado debido al gran contenido de armónicos que se generan. La combinación de dos convertidores de seis pulsos ofrece mejor desempeño. Esta nueva configuración se llama STATCOM de doce pulsos.

Las tensión línea a línea, $v_{ab}(t)$, del conversor de seis pulsos, dada por la ecuación (3.1), se expresa a continuación:

$$\begin{aligned} v_{ab}(t) = & V_{ab_1} \text{sen}(\omega t + 30^\circ) + V_{ab_5} \text{sen}(5\omega t + 150^\circ) + V_{ab_7} \text{sen}(7\omega t + 210^\circ) \\ & + V_{ab_{11}} \text{sen}(11\omega t + 330^\circ) + V_{ab_{13}} \text{sen}(13\omega t + 30^\circ) + V_{ab_{17}} \text{sen}(17\omega t + 150^\circ) \\ & + V_{ab_{19}} \text{sen}(19\omega t + 210^\circ) + V_{ab_{23}} \text{sen}(23\omega t + 330^\circ) + \dots \end{aligned} \quad (3.45)$$

Si el compensador se conecta a un transformador $Y - Y$, con relación de transformación 1 : 1, la tensión línea a neutro estará dada por:

$$\begin{aligned} v_{an}(t) = & \frac{1}{\sqrt{3}} (V_{ab_1} \text{sen}(\omega t) - V_{ab_5} \text{sen}(5\omega t) - V_{ab_7} \text{sen}(7\omega t) + V_{ab_{11}} \text{sen}(11\omega t) \\ & + V_{ab_{13}} \text{sen}(13\omega t) - V_{ab_{17}} \text{sen}(17\omega t) - V_{ab_{19}} \text{sen}(19\omega t) + V_{ab_{23}} \text{sen}(23\omega t) + \dots) \end{aligned} \quad (3.46)$$

$$v_{an}(t) = \frac{1}{3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_{ab_n}}{(-1)^r} \text{sen}(n\omega t) \quad (3.47)$$

$$\forall n = 6r \pm 1, r = 0, 1, 2, \dots$$

Ahora supóngase que la tensión línea a línea producida por el segundo conversor está atrasada 30° con respecto al otro conversor y con la misma magnitud. Así que:

$$v_{ab}(t)_2 = V_{ab_1} \text{sen}(\omega t) + V_{ab_5} \text{sen}(5\omega t) + V_{ab_7} \text{sen}(7\omega t) + V_{ab_{11}} \text{sen}(11\omega t) \\ + V_{ab_{13}} \text{sen}(13\omega t) + V_{ab_{17}} \text{sen}(17\omega t) + V_{ab_{19}} \text{sen}(19\omega t) + V_{ab_{23}} \text{sen}(23\omega t) + \dots \quad (3.48)$$

$$v_{ab}(t)_2 = \sum_{n=1}^{\infty} V_{ab_n} \text{sen}(n\omega t) \quad (3.49)$$

Si el segundo conversor se conecta a un transformador $\Delta - Y$, con relación de transformación $1 : \frac{1}{\sqrt{3}}$, la tensión línea a neutro en el devanado secundario en Y debe ser:

$$v_{anY}(t)_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} (V_{ab_1} \text{sen}(\omega t) + V_{ab_5} \text{sen}(5\omega t) + V_{ab_7} \text{sen}(7\omega t) + V_{ab_{11}} \text{sen}(11\omega t) \\ + V_{ab_{13}} \text{sen}(13\omega t) + V_{ab_{17}} \text{sen}(17\omega t) + V_{ab_{19}} \text{sen}(19\omega t) + V_{ab_{23}} \text{sen}(23\omega t) + \dots) \quad (3.50)$$

$$v_{anY}(t)_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{n=1}^{\infty} V_{ab_n} \text{sen}(n\omega t) \quad (3.51)$$

$$\forall n = 6r \pm 1, r = 0, 1, 2, \dots$$

Entonces, la tensión línea a línea en el devanado conectado en estrella es:

$$v_{abY}(t)_2 = V_{ab_1} \text{sen}(\omega t + 30^\circ) - V_{ab_5} \text{sen}(5\omega t + 150^\circ) - V_{ab_7} \text{sen}(7\omega t + 210^\circ) \\ + V_{ab_{11}} \text{sen}(11\omega t + 330^\circ) + V_{ab_{13}} \text{sen}(13\omega t + 30^\circ) - V_{ab_{17}} \text{sen}(17\omega t + 150^\circ) \\ - V_{ab_{19}} \text{sen}(19\omega t + 210^\circ) + V_{ab_{23}} \text{sen}(23\omega t + 330^\circ) + \dots \quad (3.52)$$

$$v_{abY}(t)_2 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_{ab_n}}{(-1)^r} \text{sen}(n\omega t + \frac{\pi}{6}n) \quad (3.53)$$

$$\forall n = 6r \pm 1, r = 0, 1, 2, \dots$$

Las dos formas de onda dadas por las ecuaciones (3.1) y (3.53), se suman para dar origen a la tensión de 12 pulsos,

$$v_{ab}(t)_{12} = v_{ab}(t) + v_{abY}(t)_2$$

$$v_{ab}(t)_{12} = 2(V_{ab_1} \text{sen}(\omega t + 30^\circ) + V_{ab_{11}} \text{sen}(11\omega t + 330^\circ) + V_{ab_{13}} \text{sen}(13\omega t + 30^\circ))$$

$$+V_{ab23} \text{sen}(23\omega t + 330^\circ) + \dots) \quad (3.54)$$

Estas formas de onda se muestran en las figura 3.14 y el arreglo de dos convertidores de seis pulsos conectados en paralelo a un mismo condensador se muestra en la figura 3.15.

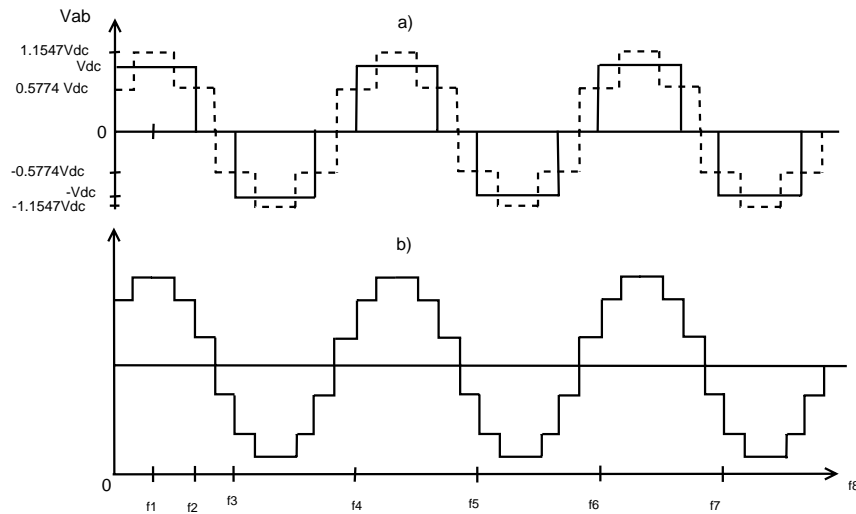


Figura 3.14: a) $v_{ab}(t)$ y $v_{abY}(t)$; b) Tensión del conversor de 12 pulsos

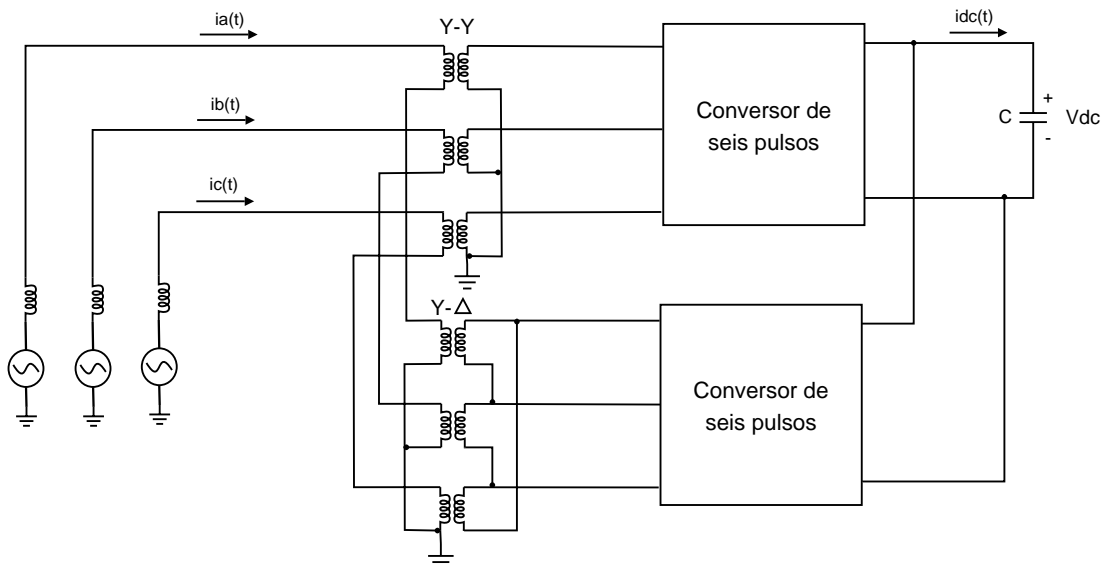


Figura 3.15: STATCOM de 12 pulsos

La tensión de línea dada por la ecuación (3.54) se expresa en series de Fourier como:

$$v_{ab}(t)_{12} = \sum_{n=1}^{\infty} V_{ab12_n} \text{sen}(n\omega t + \frac{\pi}{6}n)$$

$$\forall n = 12r \pm 1, r = 0, 1, 2, \dots$$

3.5.1. Señales de corriente AC

Aplicando un procedimiento similar al presentado en secciones anteriores, se llega al análisis de corrientes AC. De antemano se puede ver de la ecuación (3.54) que solo aparecen las componentes armónicas $n = 12r \pm 1$, ($r=0,1,2,\dots$) de tensiones de línea multiplicadas por dos. Entonces se puede decir que la magnitud de la componente fundamental para las tensiones de línea del STATCOM de 12 pulsos es el doble de la magnitud de la tensión de línea del STATCOM de 6 pulsos (lo mismo ocurre para las tensiones de fase).

Suponiendo una tensión para el sistema AC puramente senoidal $e_{an}(t) = V_m \text{sen}(\omega t)$, y de lo dicho anteriormente, la magnitud de la componente fundamental de la tensión línea-neutro del inversor viene dada por la ecuación $v_{an}(t) = 1,2732 V_{DC} \text{sen}(\omega t)$, entonces:

$$i_a(t)_1 = -\frac{V_m - 1,2732 V_{DC}}{\omega L} \cos(\omega t); \text{ (componente fundamental)}$$

$$i_a(t)_n = \frac{1,2732 V_{DC}}{n^2 \omega L} \cos(n\omega t); \text{ (componente del armónico } n)$$

la componente fundamental de la corriente también se llama componente fundamental I_q .

$$I_{a1} = I_q = \frac{V_m - 1,2732 V_{DC}}{\omega L} \quad (3.55)$$

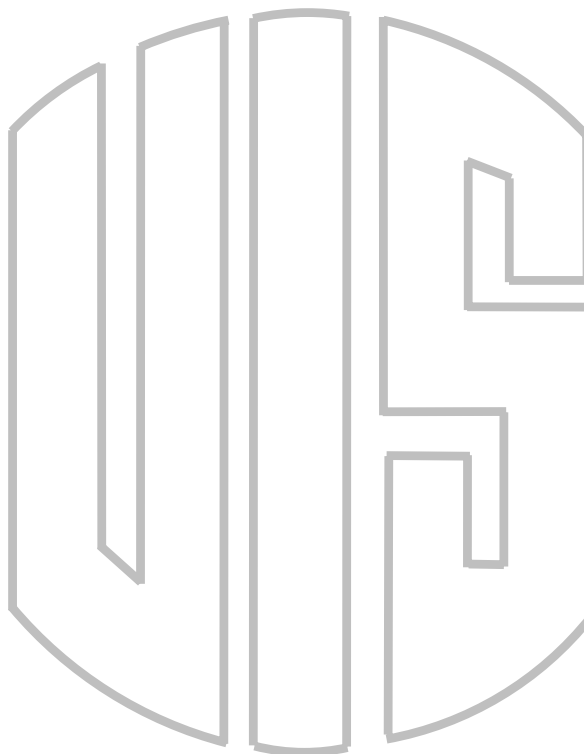
$$I_{an} = I_{qn} = \frac{1,2732 V_{DC}}{n^2 \omega L} \quad n > 1 \quad (3.56)$$

Respecto a lo anterior la componente fundamental de la corriente estará en adelanto cuando $V_m < 1,2732 V_{DC}$. Esto es, si la amplitud de la tensión del inversor se incrementa por encima de la tensión del sistema AC (la corriente fluye del conversor al sistema AC). En este caso el compensador se como un capacitor desde el sistema AC.

La componente fundamental de la corriente estará atrasada cuando $V_m > 1,2732V_{DC}$. Esto es, si la amplitud de la tensión del inversor está por debajo de la del sistema AC (la corriente fluye del sistema AC al conversor). En este caso, el compensador se ve como un inductor desde el sistema AC.

Capítulo 4

Control vectorial de inversores trifásicos



En éste capítulo se estudia la técnica de modulación por ancho de pulso del vector espacial (SVPWM), generalmente llamada control vectorial. El control vectorial ó SVPWM de inversores trifásicos alimentados por fuente de tensión (VSI o voltage source inverter) constituye una poderosa herramienta para el desarrollo y control de los convertidores de continua-alterna.

4.1. Introducción

Existe una gran variedad de técnicas de modulación para convertidores de tensión continua a alterna (DC/AC), comunmente denominados inversores. La modulación de 120° , la modulación de 180° , la modulación por desplazamiento de fase y las modulaciones de la anchura del pulso, son algunas de las técnicas de modulación más conocidas. Cada una de ellas con un concepto y funcionamiento específico y determinado [Rashid, 2004]. La elección de una técnica de modulación u otra depende de los factores que caracterizan la aplicación, como son entre otros:

- Nivel de potencia a controlar.
- Dispositivos semiconductores empleados.
- Requisitos de la carga.
- Características de la forma de onda de salida (Distorsión, amplitud, frecuencia,...).

Una de las técnicas más utilizadas es la modulación por ancho de pulso (PWM) con sus múltiples variantes: un único pulso por semiperiodo, varios pulsos por semiperiodo, varios pulsos con referencia senoidal, etc [Rashid, 2004]. Tiene como principal ventaja la sencillez en su implementación, pero como contrapartida, no se adaptan bien a la respuesta dinámica en cargas no lineales y poseen elevadas pérdidas por conmutación que se producen cuando se requiere una distorsión armónica total (THD) de bajo valor, debido a que el número de conmutaciones debe ser elevado.

En este capítulo se estudia la técnica de modulación por ancho de pulso del vector espacial (SVPWM), generalmente llamada control vectorial. Su principal característica es que se sustituye todo el sistema trifásico por un sólo vector en el que la frecuencia queda reflejada en su velocidad de giro con el paso del tiempo. Esto permite emplear dicho vector para estudiar tanto los regímenes estacionarios como dinámicos en dichos sistemas.

Son varias e importantes las ventajas que presenta el control vectorial aunque depende de la aplicación. Por ejemplo, cuando se trata de controlar un motor trifásico de inducción, el control vectorial sobre el inversor trifásico permite desacoplar las variables del

motor de inducción de forma que se logra un control independiente de la velocidad y del par, equiparable al motor de continua [Vas, 1994]. O bien cuando lo que se pretende es generar un sistema trifásico de tensiones senoidales (por ejemplo en sistemas de generación de energía eléctrica a partir de paneles solares y baterías), la implementación digital del control vectorial resulta mucho más sencilla que la de un PWM senoidal trifásico.

El Control Vectorial ó SVPWM de inversores trifásicos alimentados por fuente de tensión (*VSI ó voltage source inverter*) constituye una poderosa herramienta para el desarrollo y control de los convertidores de continua-alterna.

4.2. Representación de señales eléctricas en el espacio vectorial

La representación vectorial con vectores espaciales se basa en la forma en que se puede representar todo sistema compuesto por tres magnitudes x_1 , x_2 y x_3 , dependientes del tiempo, y que en un marco de referencia bidimensional verifican la relación de la ecuación (4.1).

$$x_1(t) + x_2(t) + x_3(t) = 0 \quad (4.1)$$

En nuestro caso, en los sistemas eléctricos trifásicos equilibrados, estas tres magnitudes representan corrientes, tensiones, etc.

4.2.1. Sistemas trifásicos a cuatro hilos

En un sistema trifásico a cuatro hilos, las tensiones de las tres fases respecto al neutro verifican la relación de la ecuación (4.1), pudiéndose expresar de la forma siguiente:

$$v_R(t) + v_S(t) + v_T(t) = 0 \quad (4.2)$$

Las tres tensiones de un sistema trifásico equilibrado de cuatro hilos (tres fases simples) se puede representar en un marco de referencia bidimensional $\alpha - \beta$ mediante tres vectores espaciales desfasados entre si 120° tal y como se muestra en la figura 4.1.

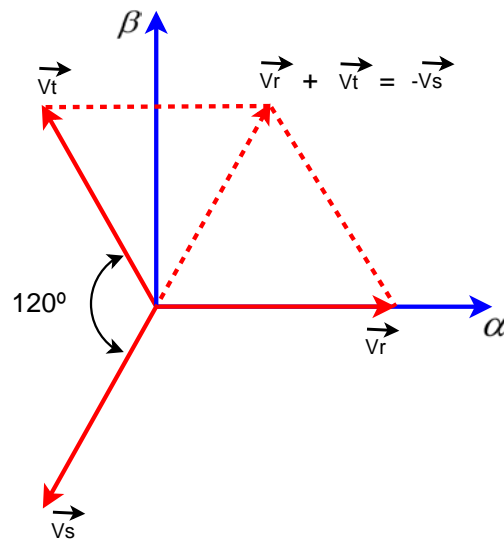


Figura 4.1: Tensiones de fase de un sistema trifásico

En la figura 4.1 se observa que sobre el plano bidimensional $\alpha - \beta$ se han distribuido las tres componentes de un sistema trifásico

$$\vec{V}_R, \vec{V}_S, \vec{V}_T,$$

desfasadas entre si $2\pi/3$ (120°), haciendo coincidir la primera de las componentes,

$$\vec{V}_R$$

con el eje de las abscisas para tener un desfase de 0° con el eje de referencia y, de esta manera, simplificar las ecuaciones que describen a cada una de las tensiones simples:

$$v_R(t) = V_m \text{sen}(\omega t)$$

$$v_S(t) = V_m \text{sen}\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$v_T(t) = V_m \text{sen}\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

donde V_m representa el valor máximo de la señal de tensión en este caso, verificando

que:

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

La evolución temporal de las tres tensiones de un sistema trifásico se detallan en la figura 4.2 .

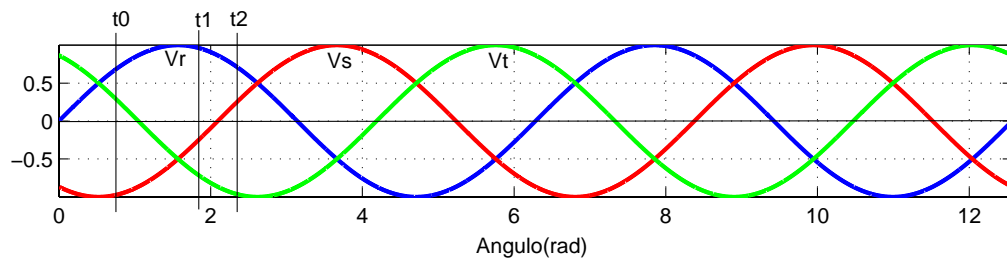


Figura 4.2: Evolución temporal de las tensiones de un sistema trifásico

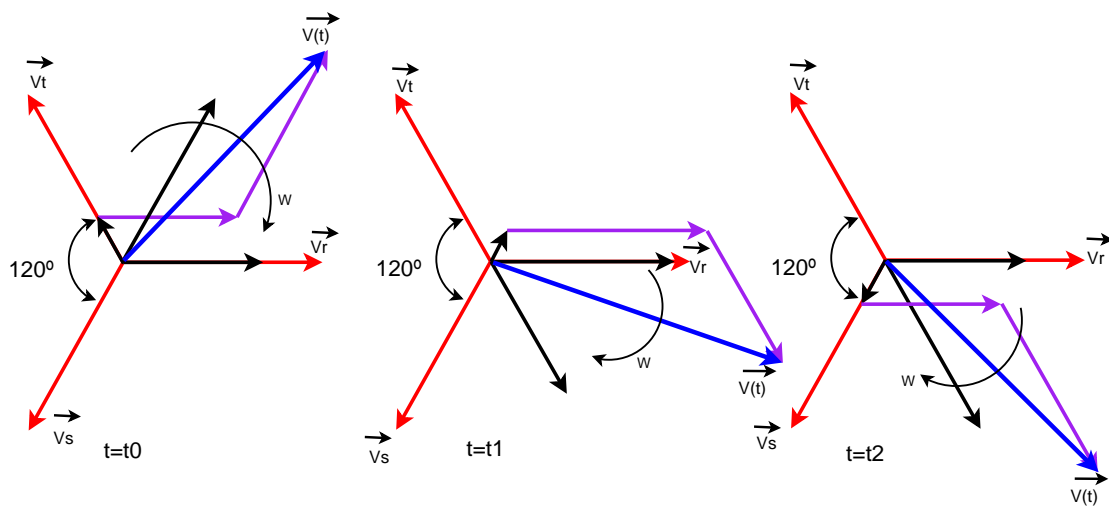


Figura 4.3: Evolución temporal del vector suma

Sobre la grafica de la figura 4.2 se han marcado tres instantes determinados (t_0 , t_1 y t_2) en los que se tiene en cada uno de ellos, una terna de valores diferentes de las tensiones instantáneas. La figura 4.3 muestra en estos tres instantes las tres tensiones simples en el sistema de referencia $\alpha - \beta$ y la evolución temporal del vector suma.

La composición vectorial muestra como un sistema trifásico de tensiones $v_R(t)$, $v_S(t)$ y $v_T(t)$, que son los valores instantáneos de las tensiones equilibradas por fase, se reduce

a un único vector $\overrightarrow{V}(t)$, mediante una suma vectorial en cada instante de tiempo, consistente en la suma del valor en ese instante de $v_R(t)$, del valor de $v_S(t)$ girado 120° y del valor de $v_T(t)$ girado 240° . Este vector espacial complejo resultante, gira con una frecuencia ω al rededor del origen en el sentido de las agujas del reloj.

La expresión matemática de este vector resultante es la siguiente:

$$\overrightarrow{V}(t) = \frac{2}{3} \left(\overrightarrow{V}_R(t) + \overrightarrow{V}_S(t) e^{j120^\circ} + \overrightarrow{V}_T(t) e^{j240^\circ} \right) \quad (4.3)$$

Donde $\frac{2}{3}$ representa el factor de escala aplicado al vector resultante para que su módulo coincida con el módulo de los vectores de cada fase.

4.2.2. Sistema trifásico de tres hilos

De forma equivalente el desarrollo anterior puede hacerse igualmente para sistemas trifásicos equilibrados de tres hilos de tensiones compuestas, donde cada tensión es la diferencia entre dos tensiones simples, y que verifican la ecuación (4.1)

$$\overrightarrow{V}_{RS}(t) + \overrightarrow{V}_{ST}(t) + \overrightarrow{V}_{TR}(t) = 0$$

$$\overrightarrow{V}_{RS}(t) = \overrightarrow{V}_R(t) - \overrightarrow{V}_S(t) \Rightarrow v_{RS}(t) = V_{LL} \text{sen}(\omega t + \frac{\pi}{6})$$

$$\overrightarrow{V}_{ST}(t) = \overrightarrow{V}_S(t) - \overrightarrow{V}_T(t) \Rightarrow v_{ST}(t) = V_{LL} \text{sen}(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

$$\overrightarrow{V}_{TR}(t) = \overrightarrow{V}_T(t) - \overrightarrow{V}_R(t) \Rightarrow v_{TR}(t) = V_{LL} \text{sen}(\omega t + \frac{5\pi}{6})$$

donde se verifica la siguiente relación:

$$V_{LL} = \sqrt{3}V_m$$

En la figura 4.4 se muestra una representación espacial de los vectores correspondientes a las tensiones compuestas y a las tensiones simples de un sistema trifásico de tensiones

equilibradas. Se puede apreciar como todo el sistema de tensiones compuestas es el mismo que el de tensiones simples pero desfasado 30° y con distinto módulo.

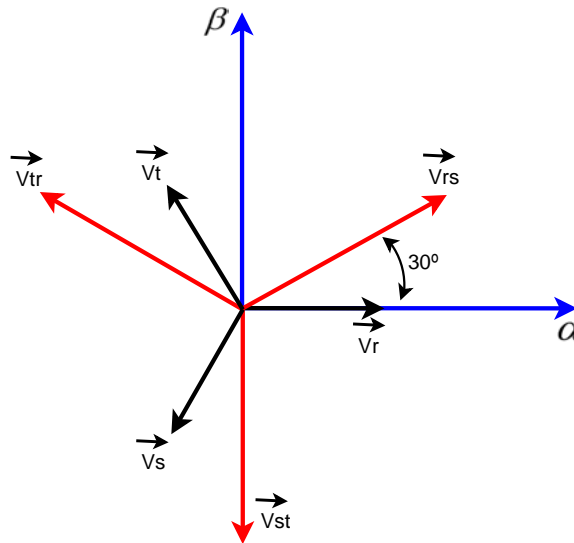


Figura 4.4: Relación entre las tensiones de fase y tensiones de línea

El vector espacial resultante que representa al sistema trifásico de tensiones compuestas para cualquier instante de tiempo se expresa en la ecuación (4.4).

$$\vec{V}(t) = \frac{2}{3} \left(\vec{v}_{RS}(t) + \vec{v}_{ST}(t) e^{j120^\circ} + \vec{v}_{TR}(t) e^{j240^\circ} \right) \quad (4.4)$$

Este vector puede descomponerse en dos componentes correspondientes a las partes real e imaginaria:

$$\vec{V}(t) = \vec{V}_\alpha(t) + j\vec{V}_\beta(t)$$

Recordando la formula de Euler:

$$e^{j\sigma} = \cos \sigma + j \operatorname{sen} \sigma$$

y desarrollando la ecuación (4.4), se obtiene que las componentes real e imaginaria del vector resultante del sistema trifásico son:

$$\vec{V}_\alpha(t) = \frac{2}{3} \left(v_{RS}(t) - \frac{1}{2} v_{ST}(t) - \frac{1}{2} v_{TR}(t) \right) \quad (4.5)$$

Como es sabido que:

$$v_{RS}(t) = -v_{ST}(t) - v_{TR}(t)$$

se obtiene que:

$$\vec{V}_\alpha(t) = v_{RS}(t) = V_{LL} \text{sen} \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) \quad (4.6)$$

para la parte imaginaria se tiene que:

$$\vec{V}_\beta(t) = \frac{2}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} v_{ST}(t) - \frac{\sqrt{3}}{2} v_{TR}(t) \right) = \frac{\sqrt{3}}{3} V_{LL} \left(\text{sen} \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) - \text{sen} \left(\omega t + \frac{5\pi}{6} \right) \right) \quad (4.7)$$

$$\vec{V}_\beta(t) = -V_{LL} \text{cos} \left(\omega t + \frac{5\pi}{6} \right) \quad (4.8)$$

De donde se deduce que el vector espacial resultante viene expresado por la ecuación (4.9).

$$\vec{V}(t) = \vec{V}_\alpha(t) + j\vec{V}_\beta(t) = V_{LL} e^{j(\omega t - \frac{\pi}{3})} \quad (4.9)$$

Con esta expresión, se consigue una composición vectorial en el plano complejo de un sistema trifásico, obteniendo un único vector giratorio representativo de dicho sistema.

4.3. Estados de conmutación en inversores VSI

Un inversor está formado por tres semipuentes y cada uno de ellos dispone de dos interruptores, unidireccionales en tensión y bidireccionales en corrientes; uno en la parte superior y otro en la parte inferior. Las tres semiramas se conectan por los extremos a la barra de continua (DC) y desde los puntos medios de los ramas, mediante inductores

en serie se conecta a un sistema trifásico de tensiones, tal y como se aprecia en la figura 4.5.

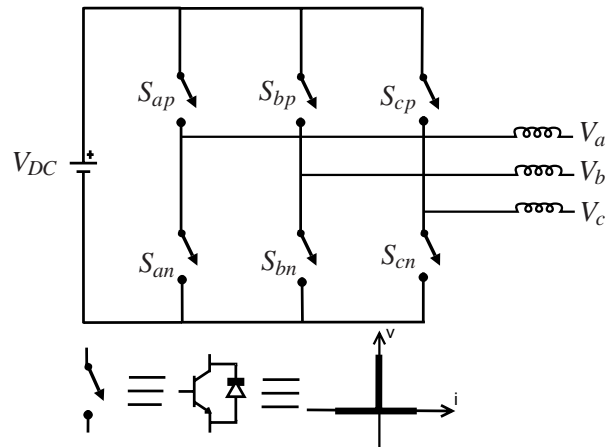


Figura 4.5: Inversor trifásico formado por tres semipuentes

Hay que tener en cuentas dos reglas:

1. Nunca se puede cortocircuitar la fuente de continua (condensador en el lado DC), lo que se traduce en que en una misma no pueden dispararse los dos semiconductores a la vez. Así por ejemplo, para la fase “a”, si $S_{ap} = \ll 1 \gg$, entonces $S_{an} = \ll 0 \gg$, que representan respectivamente las funciones de conmutación en una sola rama para los terminales positivo y negativo.
2. Nunca se deben dejar en circuito abierto las inductancias dispuestas en el lado de alterna, lo que se traduce que siempre debe haber algún semiconductor conduciendo en cada rama.

Atendiendo a las dos reglas anteriores, se tienen ocho combinaciones posibles del inversor trifásico. En la figura 4.6 se muestran los ocho estados de conmutación, donde los tres estados de los interruptores conectados al positivo del barraje de DC sirven para identificar el estado de conmutación y se representan con vectores. De esta manera cuando un interruptor está cerrado se representa con un $\ll 1 \gg$ y cuando está abierto con un $\ll 0 \gg$.

Estas ocho combinaciones son denominadas vectores de tensión de conmutación (SVV o *Switching Voltage Vectors*) o estados de conmutación.

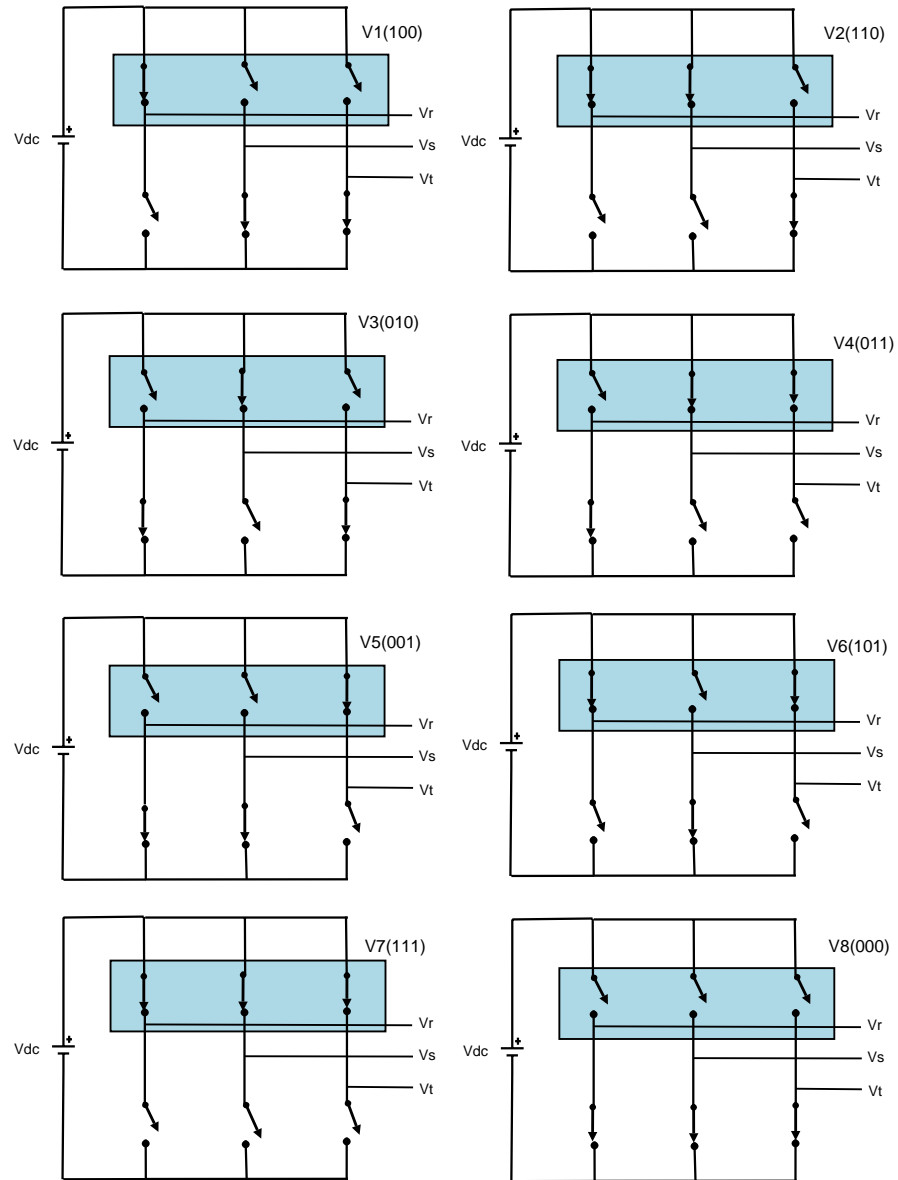


Figura 4.6: Estados de los interruptores

Los vectores V_0 y V_7 son los llamados vectores nulos. Son vectores excepcionales porque tienen una tensión nula pero que sin embargo cumplen con las dos reglas mencionadas anteriormente [Vargas, 1990].

Si consideramos el vector de tensión de conmutación V_1 que corresponde a la combinación (100), se deduce de la figura 4.6 que la tensiones entre los terminales a-b-c en la salida del inversor VSI son:

- $V_{ab} = +V_{DC}$
- $V_{bc} = 0$
- $V_{ca} = -V_{DC}$

Sustituyendo dichos valores en la ecuación (4.4) se obtiene el valor del estado de conmutación:

$$\vec{V}_1 = \frac{2}{\sqrt{3}}V_{dc} \angle 30^\circ \quad (4.10)$$

Este ángulo está medido desde la referencia V_{ab} por lo que queda en fase con el eje α .

Vector	Estados	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}	Expresión SVV
V0	(000)	0	0	0	$\vec{V}_0 = 0 V$
V1	(100)	+Vdc	0	-Vdc	$\vec{V}_1 = \frac{2}{\sqrt{3}}V_{dc} \angle 0^\circ V$
V2	(110)	0	+Vdc	-Vdc	$\vec{V}_2 = \frac{2}{\sqrt{3}}V_{dc} \angle -60^\circ V$
V3	(010)	-Vdc	+Vdc	0	$\vec{V}_3 = \frac{2}{\sqrt{3}}V_{dc} \angle -120^\circ V$
V4	(011)	-Vdc	0	+Vdc	$\vec{V}_4 = \frac{2}{\sqrt{3}}V_{dc} \angle -180^\circ V$
V5	(001)	0	-Vdc	+Vdc	$\vec{V}_5 = \frac{2}{\sqrt{3}}V_{dc} \angle -240^\circ V$
V6	(101)	+Vdc	-Vdc	0	$\vec{V}_6 = \frac{2}{\sqrt{3}}V_{dc} \angle -300^\circ V$
V7	(111)	0	0	0	$\vec{V}_7 = 0 V$

Tabla 4.1: Estados de conmutación

Procediendo de la misma forma para los demás vectores, se obtienen las expresiones de los vectores de tensión de conmutación o SVV, donde la expresión de los ocho vectores se da referida sobre el eje α (ver tabla 4.1).

La ecuación general que representa a los vectores de tensión de conmutación es:

$$\vec{V}_r = \begin{cases} \frac{2}{\sqrt{3}}V_{dc}e^{-j\frac{(r-1)\pi}{3}} & r = 1 \dots 6 \\ 0 & r = 0, 7 \end{cases} \quad (4.11)$$

A partir de la tabla 4.1 se pueden representar los distintos vectores SVV sobre los ejes α y β , tal como se muestra en la figura 4.7.

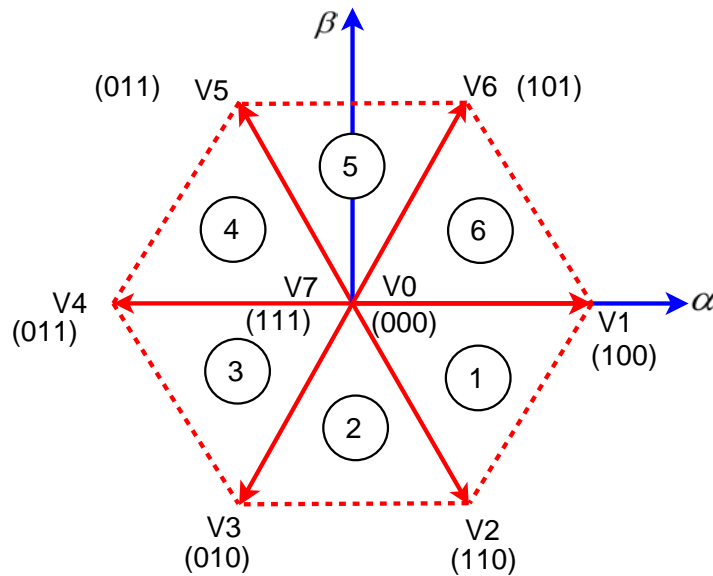


Figure 4.7: Posición de los diferentes vectores

Como se puede apreciar, los extremos de los vectores forman un hexágono regular. El área encerrada entre dos vectores adyacentes define un sector y en total se dispone de seis sectores. Los vectores V_0 y V_7 corresponden con el valor cero y se han representado en el centro del plano.

Mediante la técnica de modulación por ancho de pulso del vector espacial SVPWM, se aplican diferentes vectores directores durante unos tiempos determinados, que dependen del vector de referencia que representa al sistema trifásico que desea obtener en la salida, consiguiendo de esa forma una señal de salida con una menor distorsión armónica. Este vector de referencia actúa como consigna y gira dentro del plano $\alpha - \beta$, pasando por todos los sectores: cuantos más vectores de conmutación intermedios se generen entre los vectores directores, la onda de salida se aproximará más a una senoide y por tanto será menor la distorsión armónica total (THD)

4.4. Modulación de vectores espaciales

La modulación de los vectores espaciales consiste en construir el vector espacial \vec{V}_{ref} aplicando alternativamente los dos vectores espaciales adyacentes que definen el sector en el que se sitúa el vector \vec{V}_{ref} .

Para obtener las ecuaciones generales se detallan como se obtienen los tiempos de aplicación de los vectores adyacentes cuando el vector \vec{V}_{ref} que se encuentra en el sector 1 (uno), situado entre los vectores directores adyacentes \vec{V}_1 y \vec{V}_2 , se descompone como una suma del vector \vec{d}_1 mas \vec{d}_2 tal y como se observa en la figura 4.8.

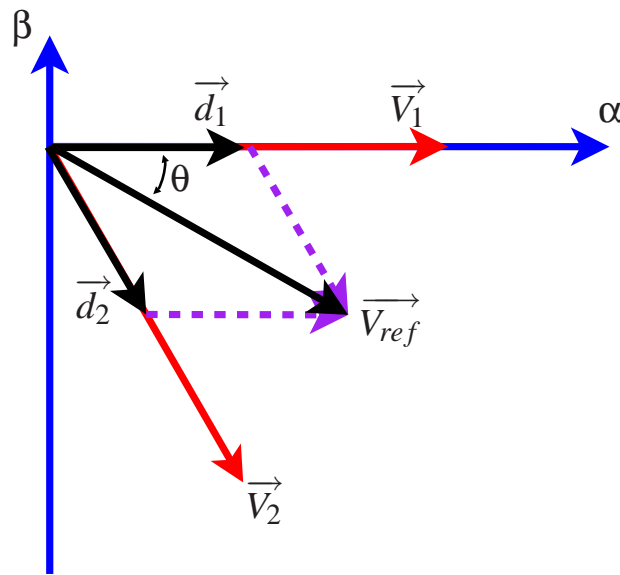


Figure 4.8: Descomposición del vector intermedio \vec{V}_{ref} situado en el sector 1

En el transcurso de un periodo de conmutación denominado T_s , se activarán los interruptores correspondientes al vector \vec{V}_1 durante un tiempo T_1 que corresponde al *ciclo de trabajo 1* o d_1 , y también se activarán los interruptores correspondientes al vector \vec{V}_2 durante un tiempo T_2 que corresponde al *ciclo de trabajo 2* o d_2 . Para obtener estos tiempos se dice que:

$$\int_0^{T_s} \vec{V}_{ref} dt = \int_0^{T_1} \vec{V}_1 dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} \vec{V}_2 dt + \int_{T_1+T_2}^{T_s} \vec{V}_0 dt \quad (4.12)$$

donde:

$$T_s \overrightarrow{V_{ref}} = T_1 \overrightarrow{V_1} + T_2 \overrightarrow{V_2} \quad (4.13)$$

Ahora bien, aplicando la ecuación general (4.11) para los vectores $\overrightarrow{V_1}$ y $\overrightarrow{V_2}$ en la ecuación (4.13) se tiene que:

$$T_s \left| \overrightarrow{V_{ref}} \right| \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ -\sin \alpha \end{bmatrix} = T_1 \frac{2}{\sqrt{3}} V_{DC} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + T_2 \frac{2}{\sqrt{3}} V_{DC} \begin{bmatrix} \cos(\pi/3) \\ -\sin(\pi/3) \end{bmatrix}$$

por tanto:

$$T_1 = T_s \frac{\left| \overrightarrow{V_{ref}} \right|}{V_{dc}} \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right)$$

$$T_2 = T_s \frac{\left| \overrightarrow{V_{ref}} \right|}{V_{dc}} \sin(\alpha)$$

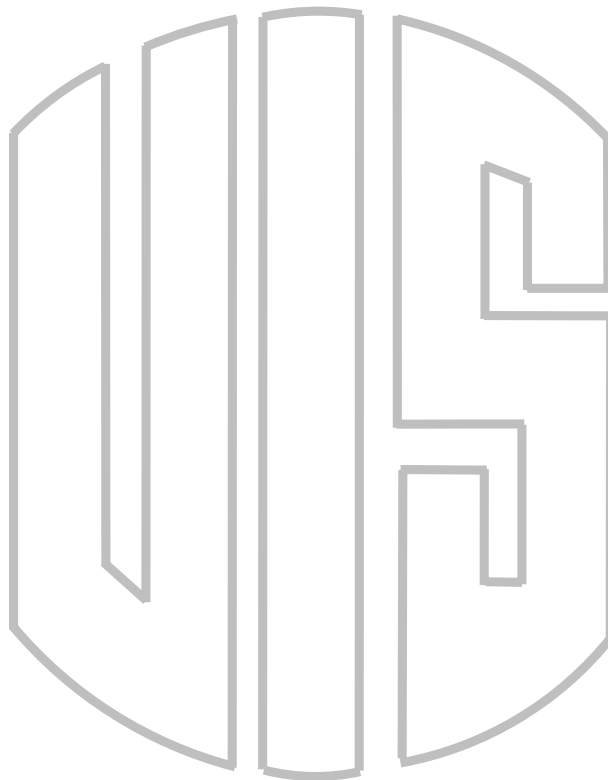
El resto del tiempo del periodo de conmutación estará ocupado por los vectores nulos, este tiempo será igual a:

$$T_0 = T_s - T_1 - T_2$$

Una vez se conoce como calcular los ciclos de trabajo de los vectores directores que representan los diferentes estados de conmutación, es necesario analizar las opciones de distribución de los ciclos de trabajo a lo largo del periodo de conmutación. Como se ha visto, se tienen los dos ciclos de trabajo correspondientes a los dos vectores directores que determinan el sector en el que se sitúa el vector espacial $\overrightarrow{V_{ref}}$ y el tiempo muerto que puede ser asignado a los vectores nulos, por lo que las posibles combinaciones para repartir estos ciclos de trabajo a lo largo del periodo de conmutación son muy numerosas [Rashid, 2004].

Capítulo 5

Modelado del STATCOM



En este capítulo se expone un modelo matemático del STATCOM y el sistema AC. Se describen las técnicas de control del STATCOM, pasando primero por la técnica SVPWM (técnica de modulación por ancho de pulso del vector espacial), y después la técnica de control de fase. Ésta última muy utilizada para el control de inversores multipulso.

5.1. Introducción

A continuación se presentará el modelo matemático del STATCOM, del cual, se derivará el sistema de control, para su posterior implementación de modelos más detallados en la herramienta de simulación ATP (*Alternating Transients Program*). Se presentarán dos técnicas de control: la técnica de control con SVPWM y la técnica de control de fase del STATCOM.

El STATCOM se emplea principalmente en sistemas de potencia para mantener las tensiones en las barras mediante la compensación dinámica de reactivos capacitivos o inductivos. También, se puede centrar su control en la regulación del factor de potencia, en amortiguar oscilaciones del sistema o una combinación de estos, dependiendo de la aplicación y del nivel de tensión en el cual se desea implementar.

5.2. Representación vectorial de cantidades trifásicas instantáneas

Tal y como se hizo la transformación del vector espacial en el capítulo 4, se toman estos resultados como base para representar las tensiones de un sistema trifásico mediante un único vector en el marco de referencia $\alpha - \beta$. Esta representación es comparable con las muy estudiadas teorías generalizadas de potencia instantáneas analizadas por [E.H. Watanabe, 1993]. De la representación del vector espacial, puede extenderse hasta la introducción en un sistema de coordenadas ortogonal en el cual cada vector se describe por medio de sus componentes $\alpha - \beta$. La transformación de variables de fase (sean corrientes o tensiones) a coordenadas $\alpha - \beta$ está dado por la siguiente matriz de transformación:

$$[C] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} ; [C]^{-1} = \frac{3}{2} [C]^t$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ 0 \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} ; \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ 0 \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Ahora volviendo a referenciar las definiciones de potencia dadas por [E.H. Watanabe, 1993], en el cual define una potencia activa instantánea p igual a :

$$p(t) = v_a(t)i_a(t) + v_b(t)i_b(t) + v_c(t)i_c(t) \quad (5.2)$$

El diagrama de la figura 5.1 muestra dos vectores, uno es la representación de la tensión de la línea de transmisión en el punto de conexión del STATCOM y el otro vector representa la corriente existente entre el sistema AC y el STATCOM. Utilizando la ecuación (5.1) y remplazandola en (5.2) se lleva a la siguiente expresión de la potencia instantánea

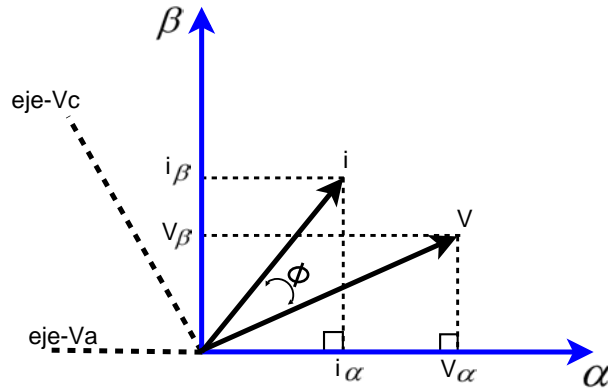


Figura 5.1: Marco de referencia $\alpha - \beta$

$$p = \frac{3}{2}(v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) \quad (5.3)$$

$$p = \frac{3}{2}|v||i|\cos\phi$$

Donde ϕ es el ángulo existente entre los vectores de tensión y corriente . Con esto se muestra claramente que las componentes de corrientes que están en fase con la tensión son las que contribuyen a la potencia activa. De la misma forma se muestra la definición de potencia reactiva (demostración mostrada en [E.H. Watanabe, 1993]) como:

$$q = \frac{3}{2}(v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha) \quad (5.4)$$

$$q = \frac{3}{2} |v| |i| \text{sen}\phi$$

Donde la constante de $3/2$ es puesta para que coincida con la clásica definición de fasores bajo condiciones de sistemas de potencia en estado estable y balanceado .

La figura 5.2 muestra una manipulación del sistema de coordenadas, utilizado más adelante para la separación de variables en el sistema de control. Se define un nuevo sistema de coordenadas por un eje d , que está siempre coincidiendo con el vector de tensión instantánea, y un eje q en cuadratura con el eje d . Los ejes $d - q$ no son estacionarios en el plano, ellos siguen la trayectoria del vector de tensión y las coordenadas $d - q$ son dadas por la siguiente transformación variante en el tiempo definida en muchos libros como la transformación de Park, utilizada primeramente para el análisis de maquinas AC [Grainger y Stevenson, 1996] :

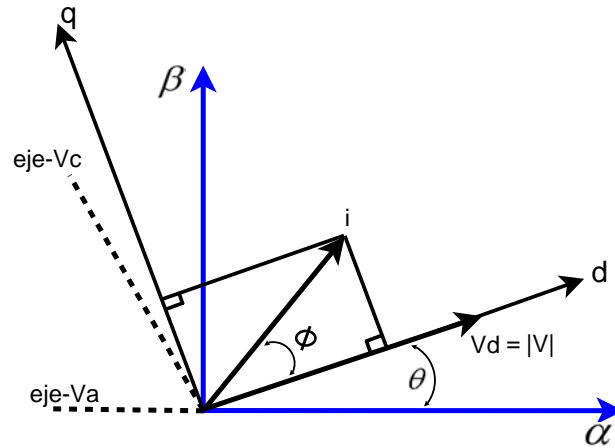


Figura 5.2: Marco de referencia $d - q$

$$[T] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\text{sen}(\theta) & -\text{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} ; [T]^{-1} = \frac{3}{2} [T]^t ; \theta = \tan^{-1}\left(\frac{v_\beta}{v_\alpha}\right)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ 0 \end{bmatrix} ; \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} |v| \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

y sustituyendo en la ecuación (5.2) se puede obtener que:

$$p = \frac{3}{2} |v| i_d \quad ; \quad q = \frac{3}{2} |v| i_q \quad (5.6)$$

Bajo condiciones balanceadas y en estado estable, las coordenadas de los vectores de tensión y corriente en el marco de referencia síncrono, son cantidades constantes. Esta característica será muy utilizada para el posterior análisis y el control desacoplado de las componentes de tensión y corriente.

5.3. Ecuaciones del circuito equivalente

La figura 5.3, muestra una representación simplificada de un STATCOM, incluyendo un capacitor en el lado DC, un inversor y unas inductancias en serie en las tres fases conectadas al sistema AC. Estas inductancias contabilizan la reactancia de dispersión de los transformadores. El circuito también incluye una resistencia shunt con el capacitor para representar las pérdidas por conmutación del inversor y la resistencia serie con la línea para representar las pérdidas del transformador.

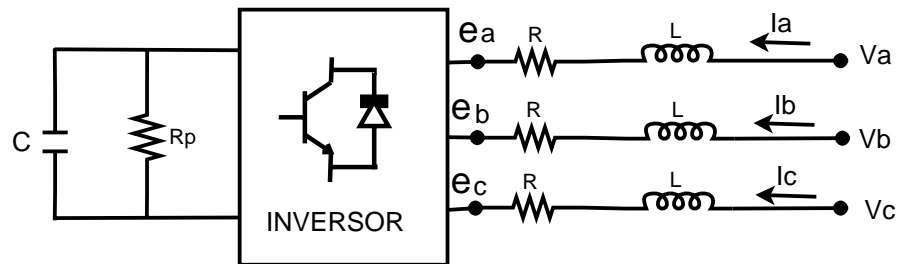


Figura 5.3: Esquema general del STATCOM

De acuerdo con la figura 5.3, en términos instantáneos, las ecuaciones del circuito en el lado AC se pueden explicar de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \\ \frac{di_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_a - e_a \\ v_b - e_b \\ v_c - e_c \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Aplicándole la ecuación (5.5) a la parte izquierda de la ecuación (5.7) se tiene:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{d(T^{-1})}{dt} = \frac{d(T^{-1})}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ 0 \end{bmatrix} + T^{-1} \begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Ahora reemplazando la ecuación (5.5) en la ecuación (5.7) y premultiplicando por $[T]$ se tiene que:

$$T \frac{d(T^{-1})}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ 0 \end{bmatrix} + T T^{-1} \begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \\ 0 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} T^{-1} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{L} T T^{-1} \begin{bmatrix} |v| - e_d \\ -e_q \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Sabiendo que:

$$T \frac{d(T^{-1})}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 \\ \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} ; \quad \omega = \frac{d\theta}{dt}$$

se puede reducir la ecuación (5.8) como sigue:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega \\ -\omega & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} e_d - |v| \\ e_q \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

5.4. Sistemas de control del STATCOM

Hasta hace relativamente poco, los esfuerzos de investigaciones de los esquemas de control del STATCOM se enfocaban principalmente en inversores o fuentes de tensión reguladas tipo multi-pulso (control de fase) [C. Shauer y A. Edris, 1995]. Sin embargo los recientes avances tecnológicos, han permitido el aumento de la eficiencia de los semiconductores de potencia ante frecuencias de conmutación más elevadas, permitiendo a su vez el empleo de técnicas SPWM [P. Garcia Gonzalez, 2000] y SVPWM como la que se estudió en el capítulo 4.

5.4.1. Técnica de control por intermedio de la modulación SVPWM

Para establecer este tipo de control se escogió el esquema desarrollado por [SCHAUDER y MEHTA, 1993], el cual está basado en la transformación de Park. La ventaja principal de esta teoría tiene que ver con la posibilidad de desacoplar el control de P y Q del STATCOM, además de transformar ambas señales inherentemente sinusoidales en variables “DC” que pueden ser manejadas por un sistema de control lineal.

Para explicar este sistema de control se empleará como referencia el sistema mostrado en la figura 5.3. En este sistema R y L representan la resistencia y reactancia del transformador respectivamente; e_a , e_b y e_c las tensiones alternas a la salida del STATCOM. Por último las tensiones y corrientes del sistema AC corresponden a V_a , V_b , V_c , i_a , i_b e i_c . La inspección de la ecuación (5.9) conlleva a decir que se tendrá un control desacoplado de i_d e i_q . De acuerdo con esto, la ecuación de estado del sistema se puede definir por la ecuación (5.10):

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

Siendo x_1 y x_2 unas variables auxiliares de control utilizadas para eliminar la dependencia entre e_d e i_q y entre e_q e i_d respectivamente. Se definen entonces los siguientes controladores :

$$x_1 = k_{r1} \left(1 + \frac{1}{\tau_{r1}}\right) (i_{dref} - i_d) \quad (5.11)$$

$$x_2 = k_{r2} \left(1 + \frac{1}{\tau_{r2}}\right) (i_{qref} - i_q) \quad (5.12)$$

Finalmente las siguientes expresiones muestran la relacion entre la tensión en el capacitor y la tensión de salida del inversor

$$e_d = k v_{dc} \cos\alpha \quad (5.13)$$

$$e_q = k v_{dc} \sin\alpha \quad (5.14)$$

donde α es el ángulo de desfase entre la componente fundamental de tensión de salida del inversor y la tensión del sistema AC. Este control pretende mantener el ángulo α

lo más pequeño posible, manteniendo unos valores de magnitud aceptables para que ocurra el intercambio de reactivos entre el sistema AC y el STATCOM.

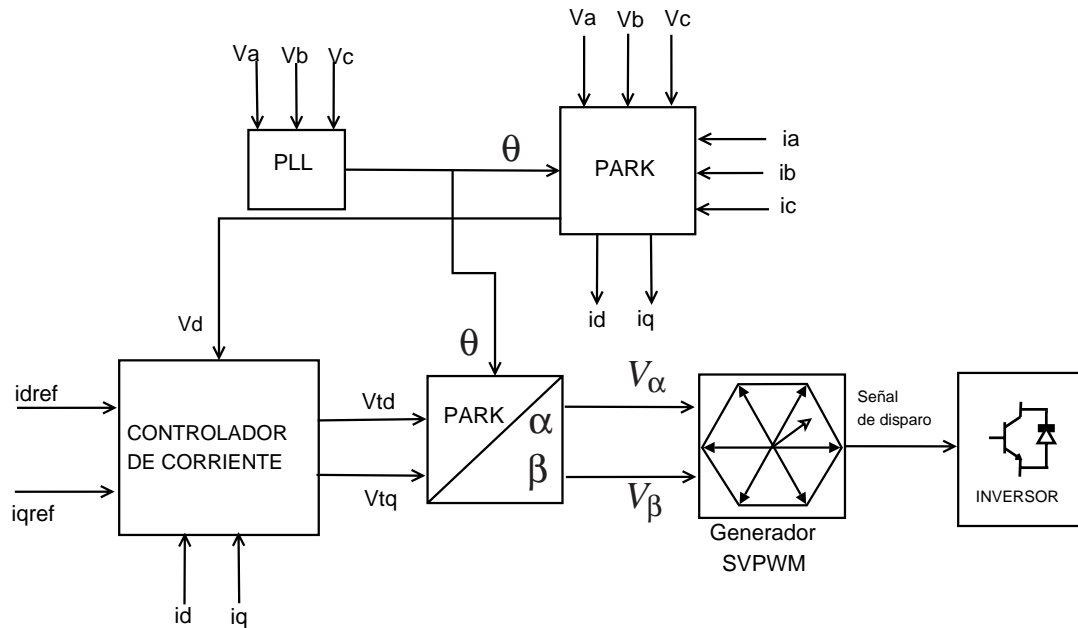


Figura 5.4: Esquema general del sistema de control del STATCOM

5.4.1.1. Implementación digital del modelo del STATCOM

La implementación digital del modelo del STATCOM se hizo a través de la herramienta de simulación ATP/EMTP y su interfaz gráfica ATPDRAW. La implementación del sistema de control se dividió en tres bloques: el de transformación/medición, el de control y el de generación de señales de disparo, tal y como se muestra en la figura 5.4

En primer lugar se sensan las tensiones del sistema V_a , V_b , V_c , es decir, del punto de conexión; y las corrientes i_a , i_b e i_c , que fluyen entre el sistema AC y el STATCOM, para luego aplicarle la transformación de Park y así obtener sus correspondientes componentes en el sistema de referencia síncrono $d - q$.

En el esquema de control de la figura 5.4 hay dos controladores separados que son independientemente capaces de controlar las componentes de eje directo y en cuadratura de la corriente de salida del inversor, con un mínimo acople entre ellos. Estos controladores generan los valores deseados de v_{td} y v_{tq} , que son las componentes de eje directo

y en cuadratura de la tensión de salida del convertor. A dichos valores se le hace una transformación de coordenadas $d - q$ a las coordenadas $\alpha - \beta$, la cual, ingresa como vector de referencia en el bloque generador SVPWM, para que a su vez genere las señales de disparo de los dispositivos de conmutación del inversor.

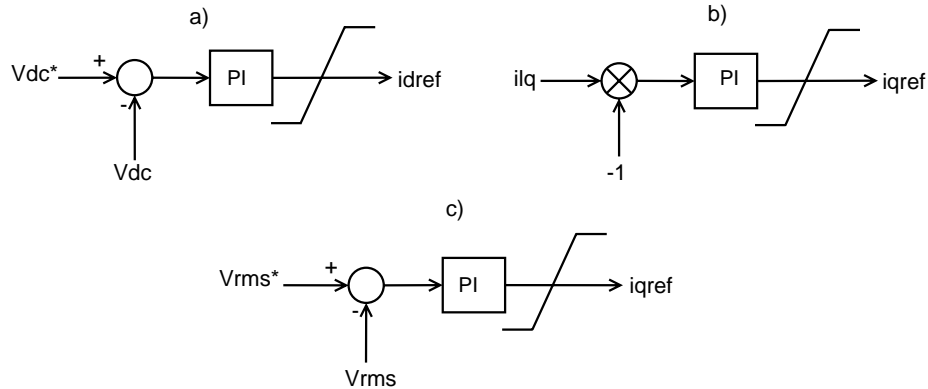


Figura 5.5: Controladores adicionales para las señales de referencia del sistema de control

Para generar las señales de referencia del controlador de corriente como i_{dref} e i_{qref} , bien pueden ser valores de referencia introducidos por el operador ó en otra forma estas señales de referencia son generadas por unos controladores adicionales dependiendo del tipo de control que se tenga en el momento, tal y como lo muestran la figura 5.5.

- El esquema de control mostrado por la figura 5.5a) compara los valores de tensiones del lado DC del compensador para luego introducir la señal de error en un controlador proporcional-integral (PI) que dará origen a la señal de referencia i_{dref}
- Si lo que se quiere, es corregir el factor de potencia en una carga conectada en la barra de conexión del STATCOM, entonces se utiliza como señal de referencia el valor negativo de la componente en cuadratura de la corriente consumida por la carga i_{lq} , tal y como se muestra en la figura 5.5b).
- Además se presenta un controlador adicional mostrado en la figura 5.5c), si lo que se quiere es regular el valor de tensión en el punto de conexión del STATCOM, y así, generar la señal de referencia i_{qref} .

El bloque mostrado en la figura 5.4 llamado *controlador de corriente*, se relata a continuación:

Como se dijo anteriormente el controlador desarrollado se basa en el sistema de control analizado por [SCHAUDER y MEHTA, 1993]. Las ecuaciones de estado que representan la dinámica de las corrientes del inversor están dadas por la ecuación (5.9). Las dos componentes son desacopladas para obtener dos modelos independientes de planta de primer orden con entradas de control x_1 y x_2 , como se muestra en la figura 5.6, donde:

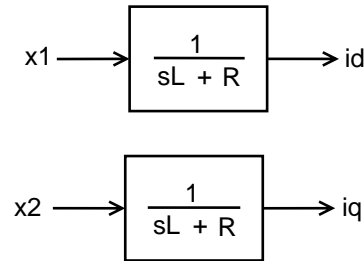


Figura 5.6: Modelos del controlador desacoplados

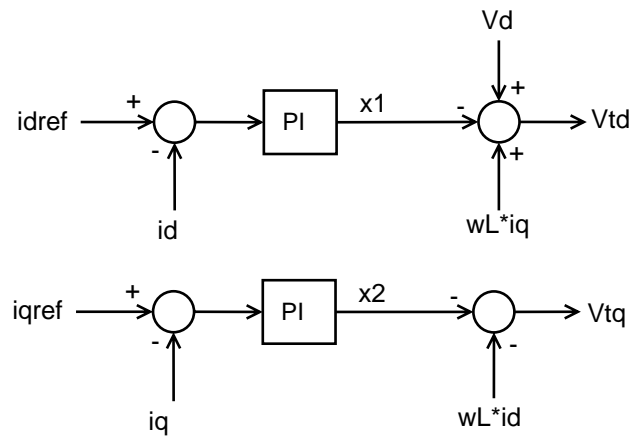


Figura 5.7: Controlador de corrientes

$$x_1 = |v| - v_{td} + \omega L i_q$$

$$x_2 = -v_{tq} - \omega L i_d$$

Basado en los modelos desacoplados mostrados en la figura 5.6, un par de controladores idénticos PI se pueden diseñar fácilmente. El esquema de control completo de corriente

es el que se muestra en la figura 5.7. Este tiene dos lazos de control separados que son capaces de controlar las corrientes i_d e i_q independientemente. En cada lazo de control la correspondiente señal de retroalimentación se resta a la señal de corriente de referencia, resultando una señal de error que alimenta a un controlador PI. Estos controladores no tienen salidas limitadas, tienen ganancias idénticas y generan las señales de control x_1 y x_2 . En últimas, tal como se muestra en la figura 5.4, se trata de una fuente inversora de tensión controlada por corriente.

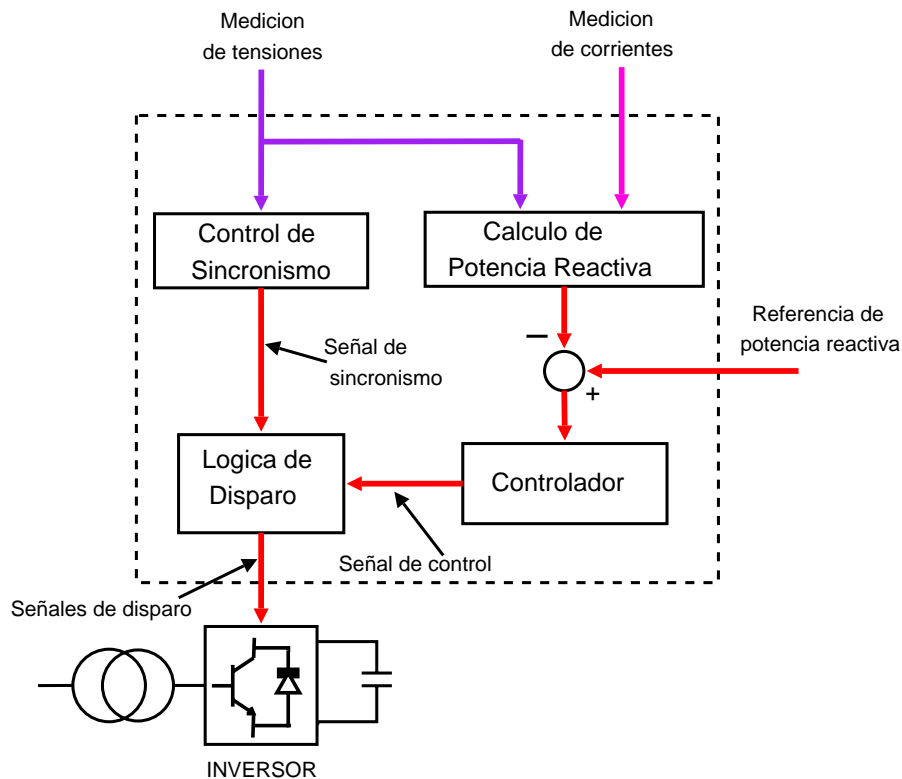


Figura 5.8: Esquema de control del STATCOM para el control de fase

5.4.2. Técnica de control de fase

En muchos casos, el control STATCOM es función de la necesidades del sistema: control de potencia reactiva, estabilidad transitoria, regulación de tensión, etc. También las técnicas para estos fines son diversas, con sus ventajas y desventajas.

En esta sección se presentarán algunos componentes del STATCOM de forma que funcione como un controlador de potencia reactiva.

5.4.2.1. Componentes básicos del sistema de control

Los componentes básicos del control del STATCOM, mostrados en la figura 5.8, son un controlador de sincronismo y un controlador de reactivos.

El sincronismo, entre la tensiones del sistema y las tensiones generadas por el conjunto de inversores y transformadores se lleva a cabo por un *oscilador de bloqueo de fase*, ó PLL, *Phase Locked Loop*.

Conforme se muestra, la potencia reactiva está relacionada con la amplitud de las tensiones generadas por el STATCOM y estas tensiones están relacionadas con la tensión DC del capacitor. Así mismo un control que actúe sobre la tensión del capacitor es capaz de controlar la potencia reactiva generada por el STATCOM.

Para completar, un bloque es necesario para la lógica de disparo de los dispositivos de conmutación. Este bloque recibe una señal de sincronismo y una señal de control de reactivos y a partir de estas dos señales se construye la lógica de disparo de los dispositivos de conmutación de los inversores del STATCOM.

5.4.2.2. PLL, *phase locked loop*

Los osciladores con bloqueo de fase, ó PLL, son circuitos utilizados para sincronizar señales.

Existen varios tipos de PLLs y la figura 5.9 muestra un ejemplo que fué utilizado por [C.A.C. Cavaliere, 2000]. El PLL de la figura es un circuito que realiza la detección de frecuencia y fase de las señales de secuencia positiva de las tensiones del sistema eléctrico.

En el esquema de la figura 5.9 las tensiones medidas se colocan en función de dos valores fase-fase v_{ab} y v_{bc} . Los valores de tensión: v_a , v_b , v_c , se normalizan.

Las tensiones fase-fase normalizadas se multiplican por corrientes ficticias creadas a través de la realimentación de la señal frecuencia ω . El resultado de esta operación son las potencias P1 y P2, las cuales son sumadas resultando una única potencia P.

En régimen permanente las corrientes ficticias tienen un ángulo de 90° adelantado con respecto a las tensiones. Cuando esto ocurre, la potencia P es cero, el circuito se estabiliza, y las frecuencias y fases de las tensiones quedan detectadas.

Para una implementación real, un PLL necesita de una señal de reinicialización de su integrador. Esto ocurre porque un integrador no puede seguir integrando indefinidamente sin que haya saturación. En el esquema mostrado en la figura 5.9, el integrador es “inicializado” cuando el valor de $\omega t + \theta$ alcanza los $+\pi$ radianes, en este mismo instante, este integrador recibe una condición inicial de $-\pi$ radianes.

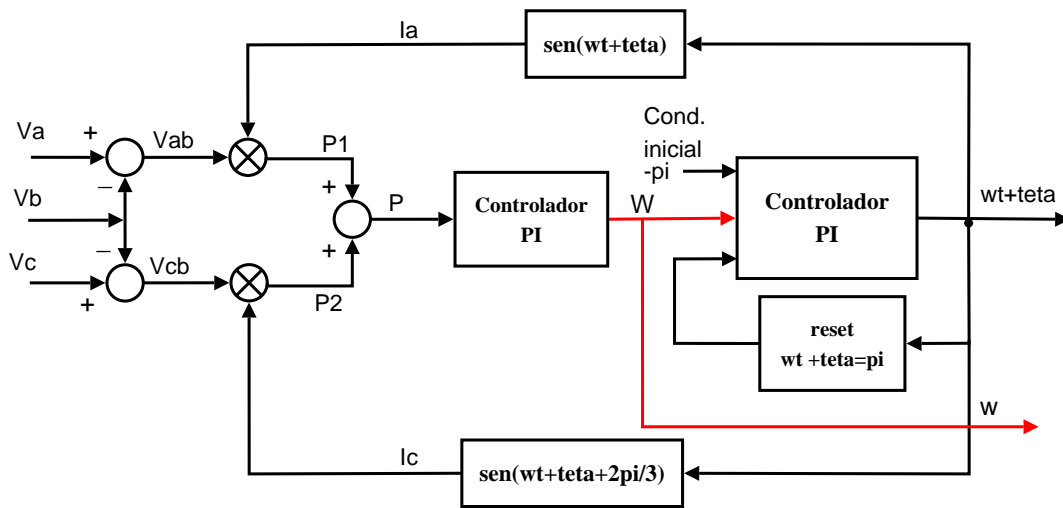


Figura 5.9: Esquema del PLL, *phase locked loop*.

5.4.2.3. Control de reactivos

En el caso de que las tensiones del sistema AC y a la salida del inversor del STATCOM, entren en fase, no existirá flujo de potencia activa entre el sistema AC y el STATCOM.

Así mismo:

1. En el caso de que la amplitud de la red sea mayor que la del STATCOM, éste funciona como un banco de inductores equivalente con potencia reactiva inductiva.
2. En el caso de que la amplitud de la red sea menor que la del STATCOM, éste funciona como un banco de capacitores equivalente con potencia reactiva capacitiva.

La amplitud de tensión del STATCOM depende de la amplitud de tensión del capacitor. Así mismo, controlando la tensión del capacitor, es posible controlar la amplitud de tensión del capacitor.

En el caso en que el desfase entre las tensiones del sistema AC y el STATCOM sea diferente de cero, habrá un flujo de potencia activa entre el sistema AC y el STATCOM. De este modo:

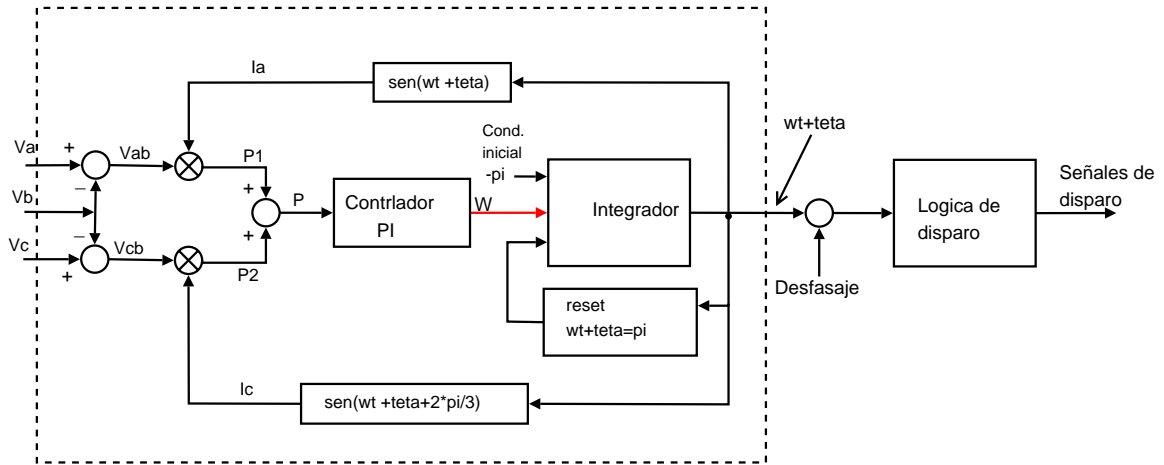


Figura 5.10: Esquema del PLL+ señal de desfase.

1. Si las tensiones del sistema AC estuvieran adelantadas, $\delta > 0$, con relación al STATCOM, habrá un flujo de potencia activa, entrando hacia el STATCOM, cargando el capacitor y consecuentemente aumentando su tensión.
2. Si las tensiones del sistema AC estuvieran atrasadas, $\delta < 0$, con relación al STATCOM, habrá un flujo de potencia activa, saliendo desde el STATCOM, descargando el capacitor y consecuentemente disminuyendo su tensión.

Como se muestra en la figura 5.10, la señal de sincronismo sumado a una señal de desfase, es la entrada de referencia para la lógica de disparo de los dispositivos de conmutación del STATCOM.

En resumen, lograr que haya un pequeño desfase, δ , entre la señal de sincronismo de las tensiones del sistema AC y la tensión del STATCOM, alterará la tensión del capacitor y, consecuentemente, se alterará la tensión AC del propio STATCOM, de este modo permitiendo el control de potencia reactiva.

5.4.2.4. Generación de la señal de desfase

La señal de desfase, δ , sumada a la señal de sincronismo es la responsable del control de potencia reactiva del STATCOM. El objetivo del control determina la forma de cálculo de esta señal.

Utilizando las ecuaciones de potencia imaginaria instantanea definidas por [SCHAUDER y MEHTA, 1993], las cuales, están detalladas por la ecuación (5.4).

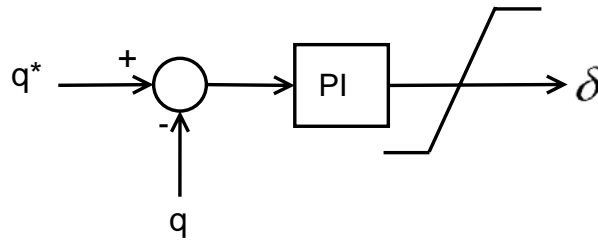
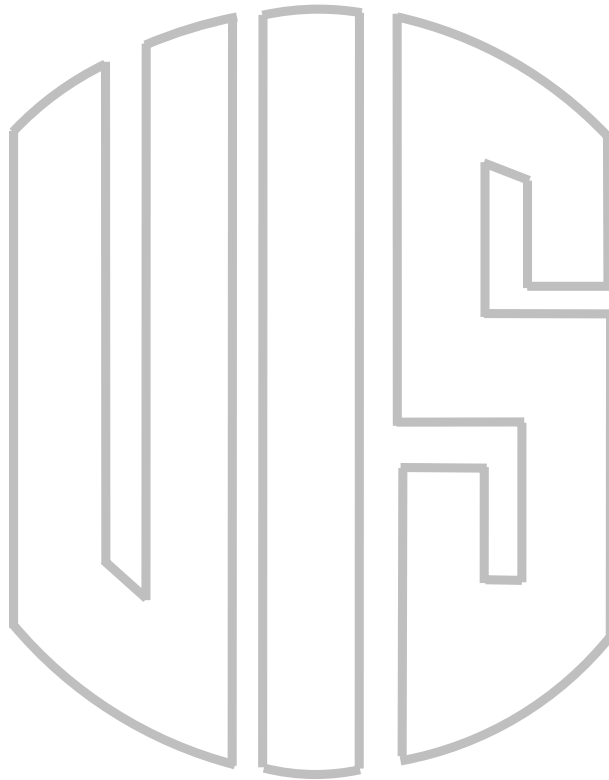


Figura 5.11: Controlador P-I de potencia reactiva

Un control proporcional-integral, como el mostrado en la figura 5.11, utilizando el cálculo de la potencia imaginaria instantánea q , ecuación (5.4), comparada con una referencia q^* . Entonces la salida del controlador proporcional-integral, es el ángulo de desfase, necesario para el control de potencia reactiva.

Capítulo 6

Modelo reducido del STATCOM



A continuación se presenta un modelo reducido del STATCOM, despreciando las funciones de los elementos de conmutación. Éste modelo dinámico se incluye en un software de simulación de sistemas de potencia ante grandes perturbaciones (HAGP), para ver las mejoras que se pueden obtener con la inclusión de un compensador de esta naturaleza en un sistema de potencia eléctrico.

6.1. Introducción

El desarrollo y uso de los controladores FACTS, se ha dirigido en muchas aplicaciones a mejorar la estabilidad de los sistemas de potencia eléctricos.

Distintos modelos han sido propuestos para representar los controladores FACTS en análisis estáticos y dinámicos. El presente capítulo describe en detalle el modelo propuesto para estos tipos de estudios, en los cuales se incluyen el *compensador estático síncrono* STATCOM.

Éstos modelos se basan en los estudios de estabilidad de tensión y de ángulo en los reportes hechos por Claudio Cañizares [Cañizares., 2000] [Cañizares., 1999].

Aunque no están dentro del alcance de éste trabajo, hacer referencia al análisis dinámico de estabilidad de un sistema eléctrico de potencia, es importante a la hora de comprender cómo el sistema se modela por un conjunto de ecuaciones algebraico-diferenciales y de sus métodos de solución.

6.2. Modelos del STATCOM

La estructura básica de un STATCOM basado en un control PWM se muestra en la figura 6.1.

El modelo del STATCOM propuesto aquí, se basa en la ecuación de balance de potencia

$$P = P_{dc} + P_{perdidas} \quad (6.1)$$

la cual, representa básicamente el balance de potencia entre la potencia AC del controlador P, y la potencia P_{dc} , bajo la operación balanceada y a frecuencia fundamental.

6.2.1. Modelo de estabilidad transitoria

Asumiendo un sistema de potencia balanceado, a frecuencia fundamental, el controlador¹ se puede representar en estudios de estabilidad transitoria empleando el modelo

¹Cuando se hable de controlador en éste capítulo también se hace referencia al STATCOM

básico mostrado en la figura 6.1. Las ecuaciones algebraico-diferenciales correspondientes a este modelo pueden ser escritas como:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{\alpha} \\ \dot{m} \end{bmatrix} = f_c(x_c, \alpha, m, V, V_{dc}, V_{ref}, V_{dcref}) \quad (6.2)$$

$$\dot{V}_{dc} = \frac{VI}{CV_{dc}} \cos(\delta - \theta) - \frac{G_c}{C} V_{dc} - \frac{R}{C} \frac{I^2}{V_{dc}}$$

$$0 = \underbrace{\begin{bmatrix} P - VI \cos(\delta - \theta) \\ Q - VI \sin(\delta - \theta) \\ P - V^2 G + kV_{dc} V G \cos(\delta - \alpha) + kV_{dc} V B \sin(\delta - \alpha) \\ Q + V^2 B + kV_{dc} V G \sin(\delta - \alpha) - kV_{dc} V B \cos(\delta - \alpha) \end{bmatrix}}_{g(\alpha, m, V, V_{dc}, V_{ref}, V_{dcref})}$$

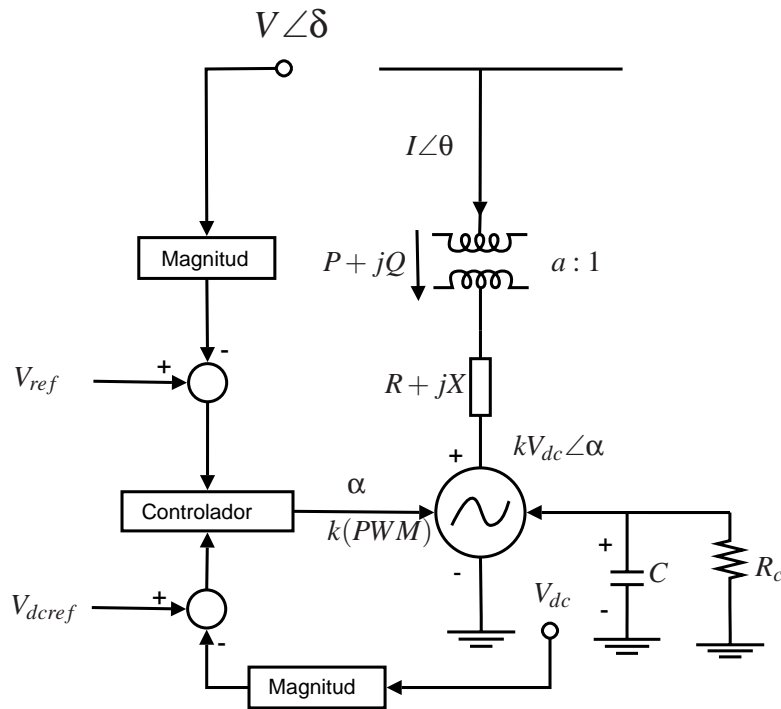


Figura 6.1: Modelo reducido del STATCOM con control de tensión PWM

Todas las variables se muestran en la figura 6.1. La admitancia $G + jB = (R + jX)^{-1}$, se emplea para representar la impedancia del transformador y filtros AC series, $G_c = \frac{1}{R_c}$ se emplea para modelar las pérdidas por conmutación de los inversores y de sus correspondientes circuitos *snubbers*, los cuales, tienen un efecto directo en la dinámica de tensión del capacitor. La constante $k = \sqrt{3/8} m$ es directamente proporcional al índice de modulación m .

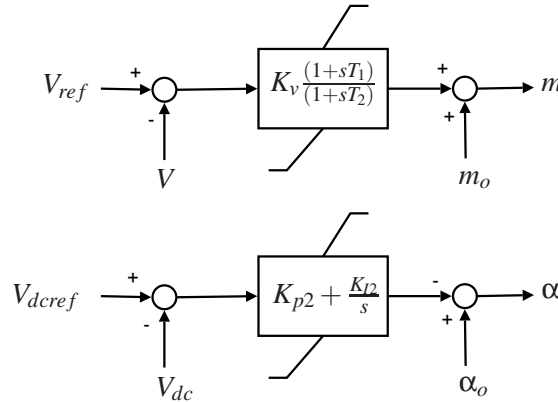


Figura 6.2: Técnica de control PWM para control de tensión

Las variables x_c y funciones $f_c(\star)$ en la ecuación (6.2) representan y relacionan las variables del sistema de control del STATCOM, donde las variables x_c , varían y dependen de la técnica PWM o de control de fase empleada para el sistema de control.

En la figura 6.2 se muestra el sistema de control PWM aplicado al STATCOM. Se observa que en el controlador PWM, la magnitud de la tensión AC se controla a través del índice de modulación m , que tiene un efecto directo en la magnitud de la tensión del convertidor. El ángulo de fase α , tiene la función de controlar el flujo de potencia activa P dentro del controlador y por consiguiente el cargue y descargue del condensador, y es empleado directamente para el control de la magnitud de tensión del condensador.

6.2.2. Modelo en estado estable

Las ecuaciones para el modelo en estado estable del STATCOM² se pueden obtener a partir del modelo de estabilidad propuesto por las ecuación 6.2, donde las ecuaciones diferenciales propias del STATCOM y de su sistema de control se igualan a cero. Éstas

²ver apéndice

ecuaciones diferenciales en últimas son las variables de estado que el modelo aporta al sistema, es decir:

$$0 = \begin{bmatrix} f_c(x_c, \alpha, m, V, V_{dc}, V_{ref}, V_{dcref}) \\ P - G_c V_{dc}^2 - RI^2 \\ g(\alpha, m, V, V_{dc}, V_{ref}, V_{dcref}) \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

Para el sistema de control PWM $m_o = \sqrt{8/3} \underbrace{\frac{V_{ref}}{V_{dcref}}}_{k_o}$.

El modelo representado aquí, conlleva a la más adecuada representación para análisis en estado estable del STATCOM, en comparación con los modelos típicos de flujo de cargas basados en una representación del STATCOM como una fuente de potencia reactiva. En estos tipos de modelos, los límites usualmente se representan como límites de potencia reactiva, es decir, el STATCOM se representa típicamente como un *condensador síncrono*, utilizando un modelo de barra estandar tipo PV.

A continuación se presenta un caso que sirve como ejemplo de las representaciones típicas del STATCOM como barra tipo PV.

6.2.2.1. Sistema de 3 máquinas y 9 nodos

Como ejemplo de aplicación se reproducen los resultados de la *Western System Coordinating Council* (WSSC) [P.M. Anderson, 1994] que consiste de tres generadores y nueve nodos. Fig 6.3. Los datos necesarios para la solución del problema de flujo de cargas para el sistema son: la tabla, 6.1, la cual, muestra las condiciones iniciales para cada uno de los nodos del sistema. El nodo 1 (uno), se toma como referencia para todos los cálculos, y la tabla 6.3 indica los parametros de las líneas de transmisión. La tensión de transmisión es 230kV y todos los datos son proporcionados en una base de 100 MVA.

Los valores finales de tensiones y ángulos en la solución del flujo de cargas³ se muestran en la tabla 6.5 y los flujos de potencia por cada una de las líneas del sistema de transmisión se encuentran en la tabla 6.7, En este estudio se obtienen pérdidas de potencia activa de 4,654 MW. Se debe considerar que éstos resultados son sin la inclusión del STATCOM.

³Flujo de cargas solucionado por la herramienta de simulación HAGP [Rodríguez, 2003].

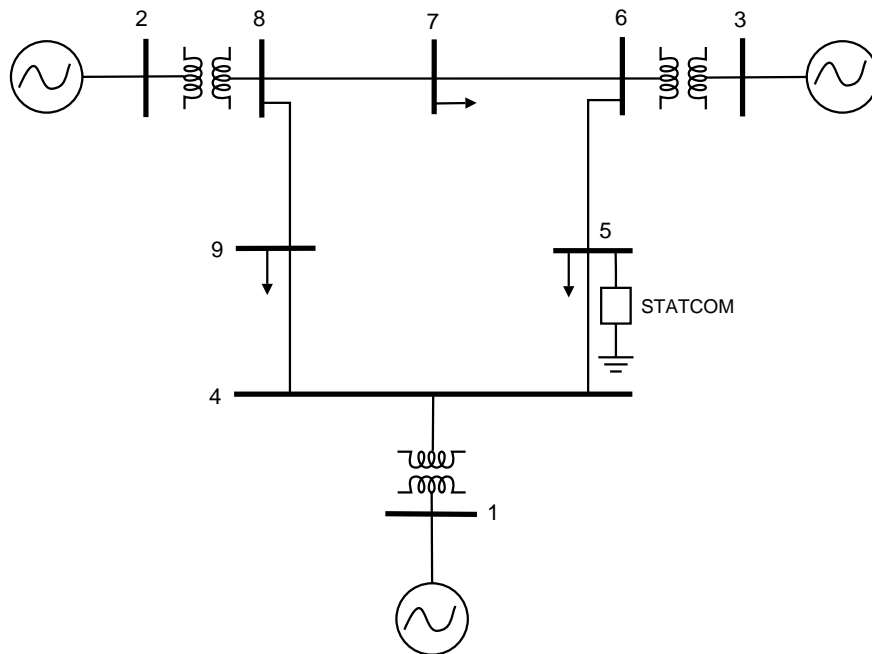


Figura 6.3: Sistema 9 barras y 3 máquinas de la WSSC

Cuadro 6.1: Datos iniciales de los nodos

Bus	Tensió p.u	Ángulo de fa- se	Pg MW	Qg MVAr	Pd MW	Qd MVAr	Tipo bus
1	1,04	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Ref
2	1,025	0,0	163	0,0	0,0	0,0	PV
3	1,025	0,0	85	0,0	0,0	0,0	PV
4	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	PQ
5	1,0	0,0	0,0	0,0	90	30	PQ
6	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	PQ
7	1,0	0,0	0,0	0,0	100	35	PQ
8	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	PQ
9	1,0	0,0	0,0	0,0	125	50	PQ

Cuadro 6.3: Datos de las líneas

Nodo envío	Nodo recep	R(p.u.)	X(p.u.)	B(p.u.)
1	4	0,0	0,0576	0,0
4	5	0,017	0,092	0,158
5	6	0,039	0,17	0,358
3	6	0,0	0,0586	0,0
6	7	0,0119	0,1008	0,209
7	8	0,0085	0,072	0,149
8	2	0,0	0,0625	0,0
8	9	0,032	0,161	0,306
9	4	0,01	0,085	0,176

Cuadro 6.5: Tensiones nodales sin la inclusión del STATCOM

Bus	Tensió p.u	Áng (Grad.)	Pg MW	Qg MVar	Pd MW	Qd MVar	Tipo bus
1	1,04	0,0	71,65	26,76	0,0	0,0	Ref
2	1,025	9,274	163	6,74	0,0	0,0	PV
3	1,025	4,661	85	-10,74	0,0	0,0	PV
4	1,026	-2,213	0,0	0,0	0,0	0,0	PQ
5	1,013	-3,685	0,0	0,0	90	30	PQ
6	1,033	1,965	0,0	0,0	0,0	0,0	PQ
7	1,016	0,727	0,0	0,0	100	35	PQ
8	1,026	3,717	0,0	0,0	0,0	0,0	PQ
9	0,996	-3,986	0,0	0,0	125	50	PQ

Cuadro 6.7: Flujos de potencia por las líneas sin la inclusión del STATCOM

Nodo envío	Nodo recep	Flujo envío	Flujo retorno
1	4	$71,65 + j26,76$	$-71,64 - j23,64$
4	5	$30,7 + j0,89$	$-30,53 - j16,41$
5	6	$-59,47 - j13,59$	$60,82 - j17,96$
3	6	$85 - j10,74$	$-85 + j14,84$
6	7	$24,18 + j3,12$	$-24,09 - j24,31$
7	8	$-75,91 - j10,69$	$76,38 - j0,82$
8	2	$-163 + j9,08$	$163 + j6,74$
8	9	$86,62 - j8,26$	$-84,32 - j11,45$
9	4	$-40,68 - j38,55$	$40,94 + j22,45$

Teniendo en consideración los resultados obtenidos se lleva a cabo ahora un estudio de flujo de cargas del mismo sistema incluyendo un STATCOM en el nodo 5. Para éste análisis el STATCOM se modela como un nodo ficticio conectado a la barra 5 como un nodo tipo PV. Para este problema se asigna a este nodo ficticio el número 10. Los valores adicionales son la reactancia del transformador de acoplamiento, $x_t = 0,01 pu$; la magnitud de la tensión deseada $V_e = 1.025 p.u.$ (V_e es la tensión a la salida del inversor, es decir, en el nodo ficticio) y la potencia activa que aporta el STATCOM al sistema es $P=0$.

Los resultados que se obtienen al resolver el problema de flujos de cargas se resume en las tablas 6.9 y 6.11. En éste caso las pérdidas de potencia activa fueron de 4,63 MW.

De los resultados mostrados por las tablas 6.9 y 6.11 se puede concluir que el perfil de tensión se ve mejorado con la inclusión del STATCOM, en otras palabras el STATCOM proporciona la potencia reactiva necesaria de forma tal que el nodo ficticio tenga una magnitud de tensión constante que hace posible los valores nodales del sistema. Es importante destacar que al utilizar el STATCOM se disminuyen las pérdidas de potencia activa en la red y además como se aprecia en las tablas 6.7 y 6.11, los flujos de potencia reactiva cercanos al nodo donde se encuentra instalado el STATCOM sufren una ligera reducción. Se observa también que el flujo de potencia reactiva de los nodos 4-5 cambia de dirección al emplear el dispositivo de compensación. De la tabla 6.9 se nota que el STATCOM se encuentra aportando 12,31 MVAR de potencia reactiva al sistema y además respetando la restricción que se le impuso de que el flujo de potencia activa entre el STATCOM y el sistema de potencia sea cero.

Se puede agregar que el modelo para flujos de cargas, colocando al compensador como una fuente de potencia reactiva, no es capaz de incluir las pérdidas atribuidas a los dispositivos de conmutación y a la resistencia de los transformadores. Además no se pueden representar bien los límites del índice de modulación o los del ángulo de fase del controlador que son de particular importancia en los estudios de estabilidad de tensión.

6.3. Análisis dinámico de estabilidad

Como se dijo anteriormente, el hablar del fenómeno de estabilidad no concierne tanto dentro de los objetivos propuestos por éste trabajo, pero sirve como base fundamental

Cuadro 6.9: Valores nodales con la inclusión del STATCOM en el nodo 5

Bus	Tensión p.u	Áng (Grad.)	Pg MW	Qg MVA _r	Pd MW	Qd MVA _r	Tipo bus
1	1,04	0,0	71,63	19,61	0,0	0,0	Ref
2	1,025	9,275	163	4,65	0,0	0,0	PV
3	1,025	4,652	85	-15.18	0,0	0,0	PV
4	1,03	-2,205	0,0	0,0	0,0	0,0	PQ
5	1,024	-3,725	0,0	0,0	90	30	PQ
6	1,035	1.963	0,0	0,0	0,0	0,0	PQ
7	1,018	0,737	0,0	0,0	100	35	PQ
8	1,027	3,725	0,0	0,0	0,0	0,0	PQ
9	0,999	-3,961	0,0	0,0	125	50	PQ
10	1,025	-3,725	0,0	12,31	0,0	0,0	PV

Cuadro 6.11: Flujos de potencia por las líneas con la inclusión del STATCOM

Nodo envío	Nodo recep	Flujo envío	Flujo retorno
1	4	$71,63 + j19,61$	$-71,62 - j16,67$
4	5	$30,64 - j7,03$	$-30,48 - j8,81$
5	6	$-59,52 - j8,89$	$60,87 - j23,15$
3	6	$85 - j15,18$	$-85 + j19,34$
6	7	$24,13 + j3,81$	$-24,04 - j25,08$
7	8	$-75,96 - j9,92$	$76,43 - j1,65$
8	2	$-163 + j11,16$	$163 + j4,65$
8	9	$86,57 - j9,51$	$-84,28 - j10,41$
9	4	$-40,72 - j39,59$	$40,98 + j23,7$
10	5	$0,0 - j12,30$	$0,0 + j12,31$

en el sentido de que al crear un modelo dinámico del STATCOM con las ecuaciones algebraico-diferenciales que lo describen, se puede hablar de las mejoras que se pueden obtener al insertar un dispositivo de compensación como el STATCOM en un sistema de potencia eléctrico. Sabiendo además que dentro de las principales estrategias del control de estabilidad de los sistemas eléctricos se encuentran los FACTS, en cuanto amortiguamiento de oscilaciones, control de tensión, etc [Narain G. Hingorani, 2000].

Dentro de los fenómenos de estabilidad se encuentra el fenómeno de estabilidad de gran perturbación, el cual, estudia la respuesta de los elementos dinámicos del sistema de potencia (generadores, cargas, elementos de compensación dinámicos, enlaces de corriente continua, etc) y la variación de las diferentes magnitudes de la red (tensiones, flujos por las líneas, frecuencia, etc) ante la ocurrencia de perturbaciones severas y repentinas tales como cortocircuitos, pérdidas de generación o pérdidas de carga.

Un sistema eléctrico de potencia, bajo condiciones normales de operación, se encuentra casi en equilibrio y sólo experimenta desviaciones menores causadas por variaciones pequeñas, casi continuas, en la demanda. Cuando una perturbación severa y repentina tiene lugar, hay cambios casi instantáneos en las condiciones iniciales. La respuesta del sistema a este tipo de eventos es altamente no lineal.

Un sistema eléctrico de potencia es un sistema dinámico cuya respuesta ante la ocurrencia de una perturbación grande se determina por modelos adecuados de los dispositivos que lo componen. El sistema se modela por un conjunto de ecuaciones algébricas y diferenciales que describen su comportamiento. Tales ecuaciones se deben resolver iterativamente a partir de condiciones iniciales, mediante métodos numéricos para poder determinar con exactitud la respuesta del sistema. Sólo mediante este procedimiento se puede hallar la evolución en el tiempo de magnitudes del sistema tales como tensiones, flujos, corrientes, etc.

El comportamiento de los elementos dinámicos se modela en el espacio de estados por medio de ecuaciones diferenciales [Kundur, 1994] :

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{v}) \quad (6.4)$$

Las ecuaciones algébricas no lineales están asociadas a la red:

$$\mathbf{i}(\mathbf{x}, \mathbf{v}) = \mathbf{Y}\mathbf{v} \quad (6.5)$$

donde

\mathbf{x} = vector de estado del sistema

\mathbf{v} = vector de componentes real e imaginaria de tensiones de barra del sistema

\mathbf{i} = vector de componentes real e imaginaria de corrientes de barra del sistema

\mathbf{Y} =matriz de la red del sistema, similar en estructura a la matriz admitancia de barras

Los dos conjuntos de ecuaciones forman un sistema algébrico-diferencial de primer orden. Este debe ser resuelto a partir de unas condiciones iniciales $(\mathbf{x}_0, \mathbf{v}_0)$ para obtener la respuesta en el tiempo del sistema.

El análisis de gran perturbación es complejo desde el punto de vista computacional debido a los grandes sistemas de ecuaciones que se deben resolver utilizando pasos de tiempo pequeños para evitar errores y problemas de estabilidad numérica.

El modelo del STATCOM se incluyó en la *Herramienta Software para el Análisis de Estabilidad de Gran Perturbación de Sistemas Eléctricos de Potencia (HAGP)*, elaborada en MATLAB y perteneciente a la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones [Rodríguez, 2003].

Un diagrama de flujo simplificado de la herramienta software HAGP se muestra en la figura 6.4, donde se muestran los pasos básicos para la solución del sistema eléctrico de potencia, incluyendo sus respectivas perturbaciones, dado el caso que sucedan.

Los detalles acerca de la forma de solución y de la descripción de los pasos para la inclusión de modelos en dicha herramienta de simulación, se describen en detalle en dos tesis de pregrado de trabajos anteriores pertenecientes a la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones [Rodríguez, 2003] [Mejía, 2005].

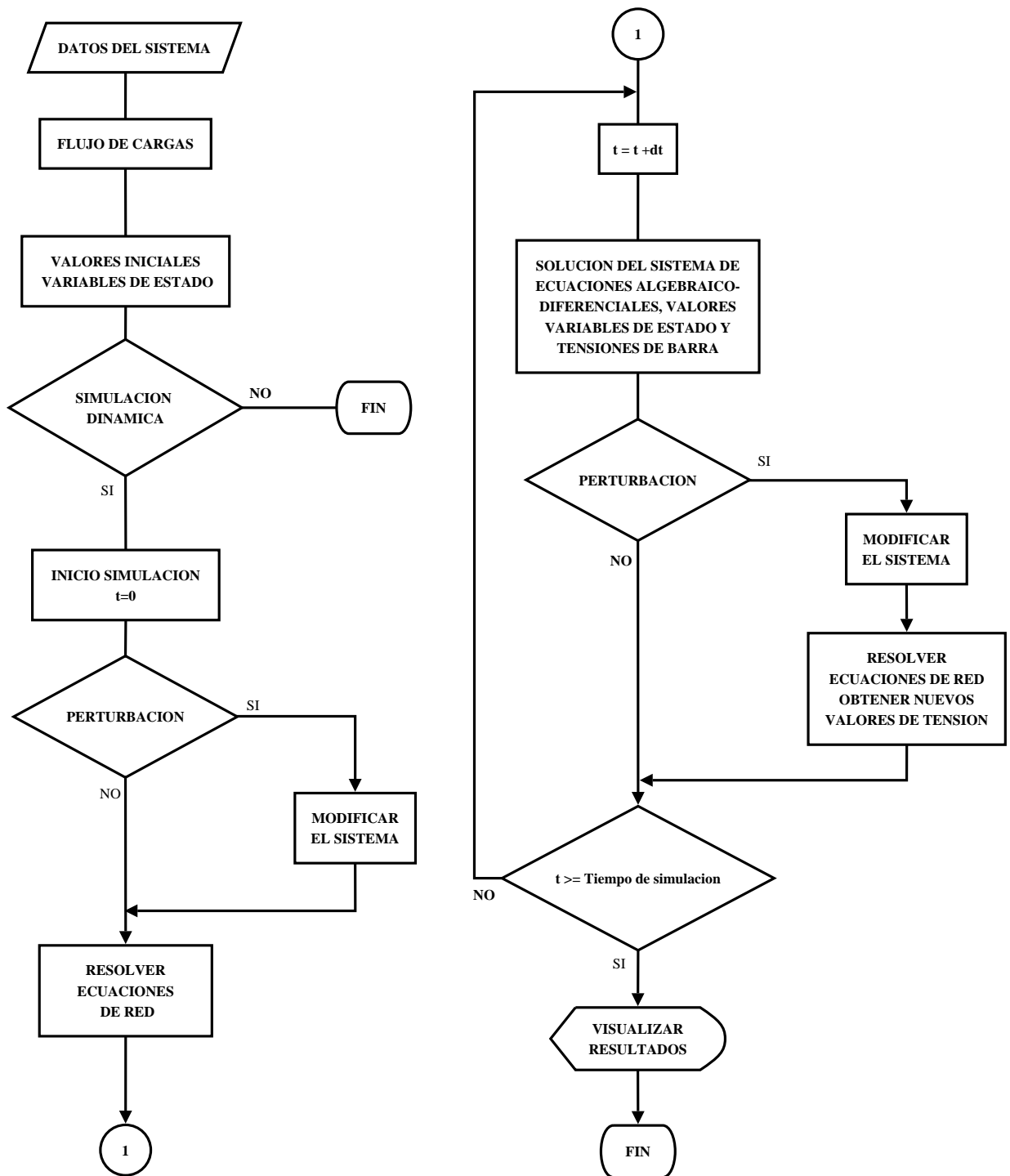
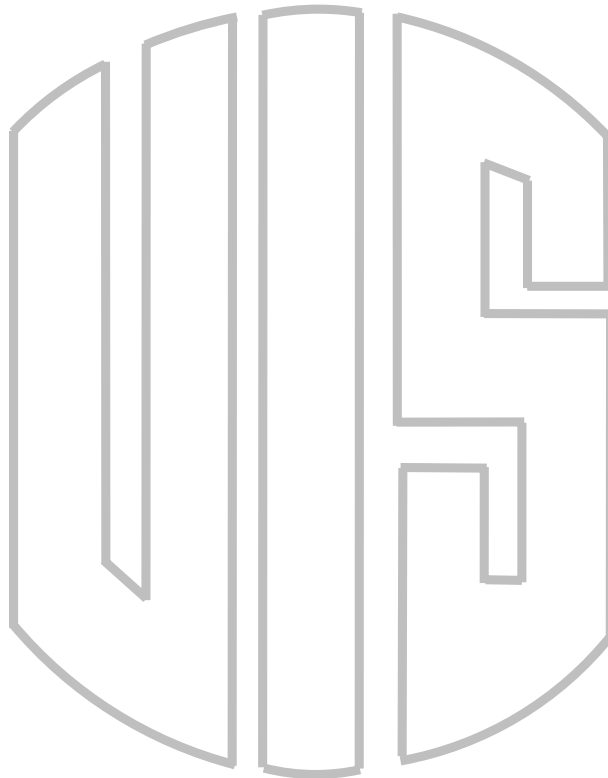


Figura 6.4: Diagrama de flujo simplificado del HAGP

Capítulo 7

Resultados de simulaciones



En este capítulo se describirán y mostrarán los resultados de los diferentes casos de simulación del dispositivo FACTS (STATCOM), con sus respectivos modelos y sistema de control. Se detallan algunos ejemplos para lograr mostrar algunas de las aplicaciones más frecuentes que tiene éste dispositivo cuando se inserta en un sistema de potencia.

7.1. Introducción

En el presente capítulo se mostrará el comportamiento de las simulaciones de un modelo digital detallado del STATCOM mediante la herramienta de simulación de transitorios electromagnéticos ATP/EMTP.

Se exponen algunos casos de simulación, implementándose su control digital, los cuales, se van a diferenciar dependiendo de el caso simulado y de las variables a controlar, como son: factor de potencia, regulación de tensión en el punto de conexión del STATCOM y control de potencia reactiva.

7.2. Ejemplos implementados en ATP/EMTP y HAGP

A continuación se presentan los datos y resultados de los ejemplos de sistemas eléctricos de potencia implementados en la herramienta de simulación ATP/EMTP y HAGP ([Rodríguez, 2003]).

7.2.1. Caso1

En este ejemplo se presenta un sistema de referencia para simulación digital en el dominio del tiempo de un D-STATCOM¹, controlado por la técnica de modulación SV-PWM, a continuación se describirá el caso:

Una configuración típica de un STATCOM se muestra en la figura 7.1. El sistema consiste de una fuente con tensión V_s con su impedancia equivalente, al cual se le conecta una carga tipo inductiva. El lado AC del STATCOM se conecta al sistema de potencia a través de filtros inductivos.

La variable a compensar para este ejemplo es el factor de potencia de la carga. Donde se le aplica la técnica de control por intermedio de la modulación SVPWM. El sistema de control se muestra en la figura 7.2.

En este caso de estudio el STATCOM se opera en un modo de operación para corrección del factor de potencia, donde lo que se busca es compensar toda la potencia reactiva consumida por la carga. A continuación se describe el sistema AC:

¹Se llama al STATCOM de esta forma porque su aplicación es sobre un sistema de potencia de distribución

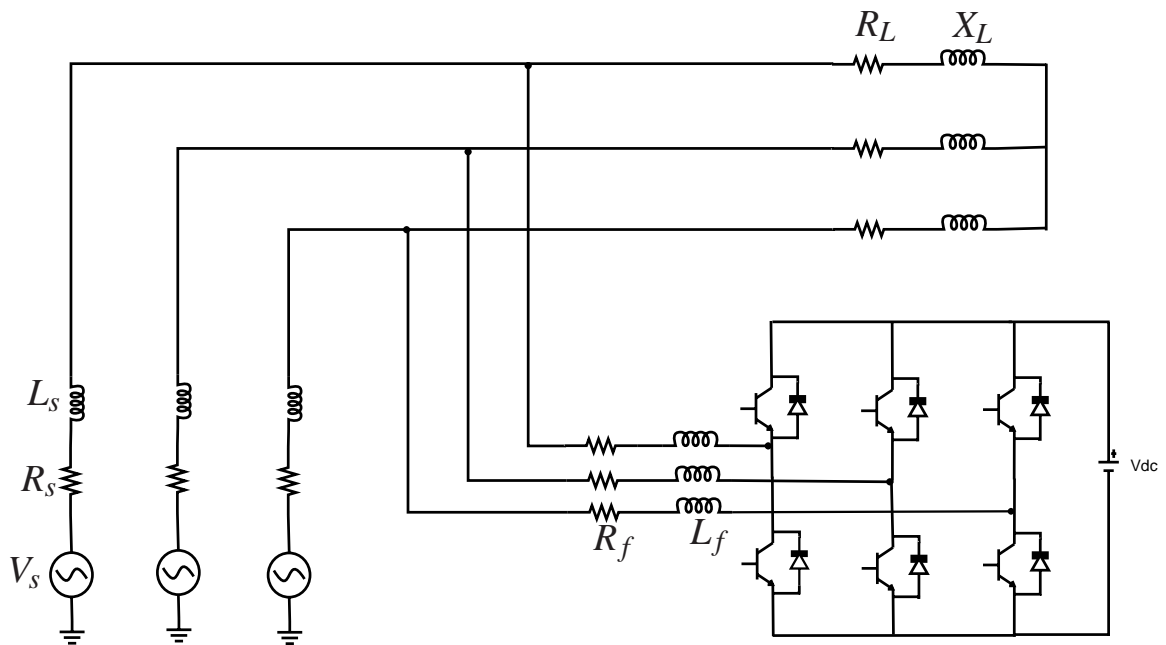


Figura 7.1: Sistema de potencia para el caso de simulación 1

Parametro	valor	unidad
Frecuencia fundamental, f	60	Hz
V_s	112	V
L_s	145	μH
R_s	25	$m\Omega$
L_f	0,637	mH
R_f	0,15	Ω
C	4820	μF
V_{DC}	230	V
X_L	1,543	Ω
R_L	4,16	Ω

Cuadro 7.1: Parámetros del sistema de referencia

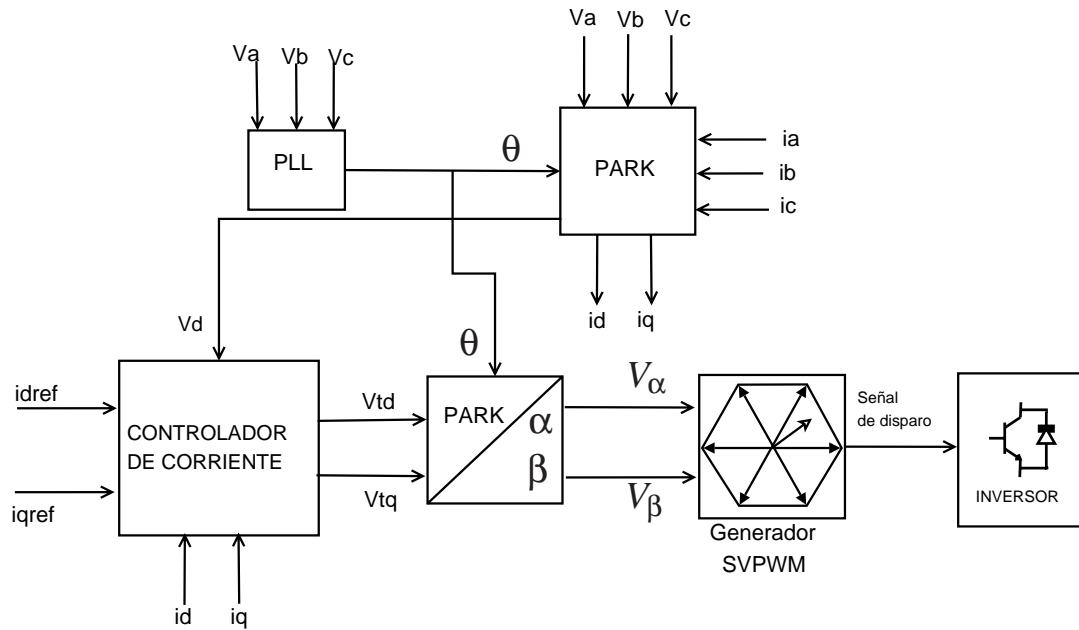


Figura 7.2: Sistema de control para el caso de simulación 1

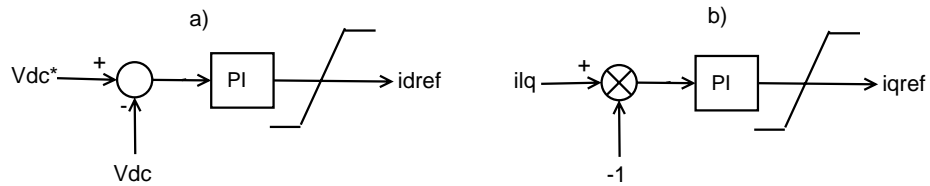


Figura 7.3: Señales de referencia del sistema de control para el caso de simulación 1

La carga se modeló mediante su equivalente RL, la fuente de tensión se modeló como fuente de tensión AC trifásica Type 14 en ATP. El STATCOM se conecta a través de un interruptor tripolar a los 0,3ms de haber arrancado la fuente de tensión V_s , la carga trifásica inicialmente está fuera, al cabo de 3ms se conecta por intermedio de un interruptor tripolar, donde los tres polos se cierran simultáneamente. Cabe anotar que las señales de disparo empiezan a actuar a los 3ms.

Dado que se desea compensar toda la potencia reactiva por la carga, las entradas de referencia al bloque de *control de corriente* en la figura 7.2, para las corrientes de referencia i_{dref} e i_{qref} viene dado por los controladores de la figura 7.3.

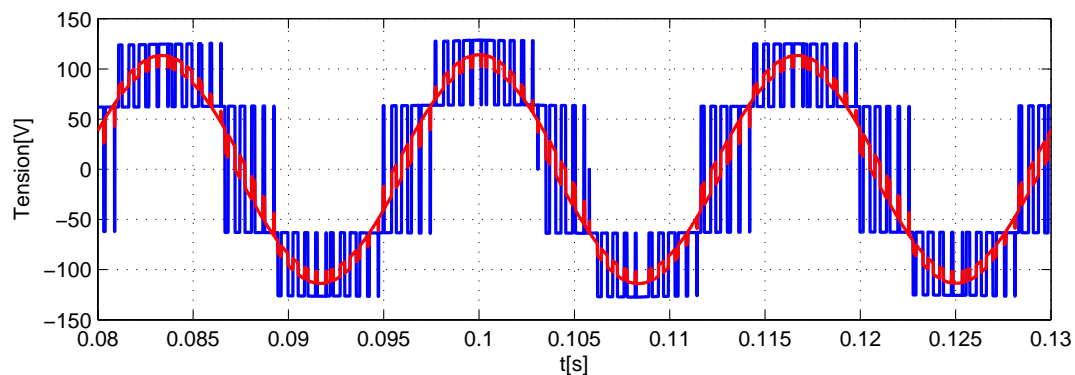


Figura 7.4: Tensiones del sistema AC y a la salida del convertidor

De los resultados de la simulación, en la figura 7.4 se muestran las tensiones del sistema AC y la señal de tensión a la salida del convertidor, en la cual se puede notar que entre ellas no existe desfase, el cual, es requisito para el intercambio de potencia reactiva entre el sistema AC y el STATCOM. También se muestra el espectro armónico de la tensión de salida del STATCOM en la figura 7.5, luego en la figura 7.6 se muestran las componentes en cuadratura de las corrientes de la carga y la corriente de compensación que fluye entre el STATCOM y el sistema AC.

Puede notarse que al rededor de los 80 ms el compensador ya muestra una respuesta aceptable. También se puede decir que en este caso el compensador está actuando en modo capacitivo y está entregando reactivos capacitivos al sistema AC.

En la figura 7.7 se muestra la componente en cuadratura de la corriente suministrada por la fuente de tensión V_s , después del transitorio se puede notar que esta corriente

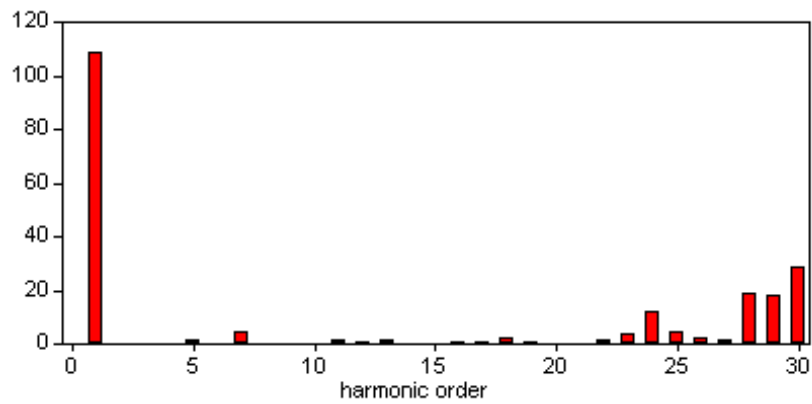


Figura 7.5: Armónicos en la tensión de salida del compensador

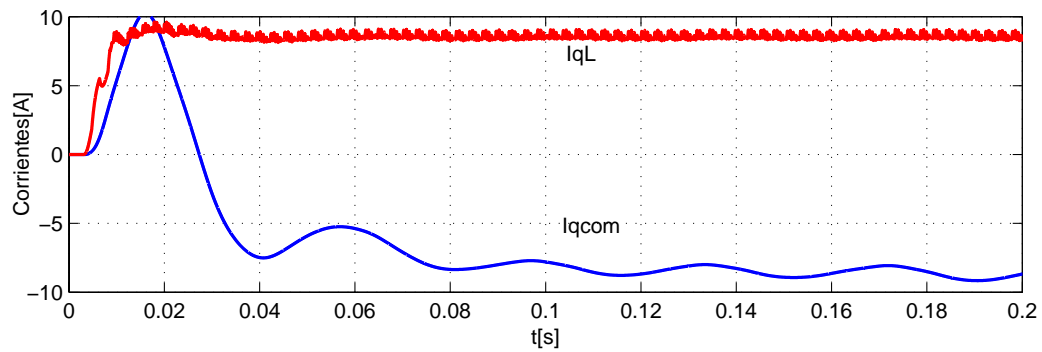


Figura 7.6: Componentes en cuadratura de las corrientes de la carga y del compensador

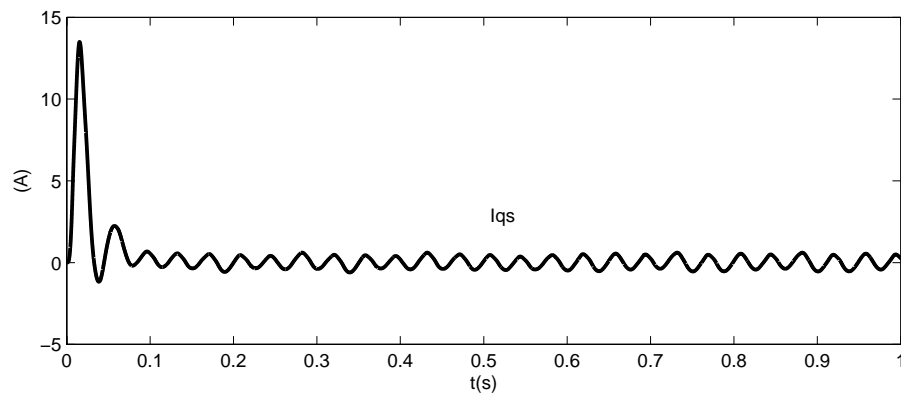


Figura 7.7: Componente en cuadratura de la corriente suministrada por la fuente de tensión

tiende a cero, con pequeñas oscilaciones debido a los armónicos generados. Con esto se cumple el objetivo de compensar toda la potencia reactiva consumida por la carga.

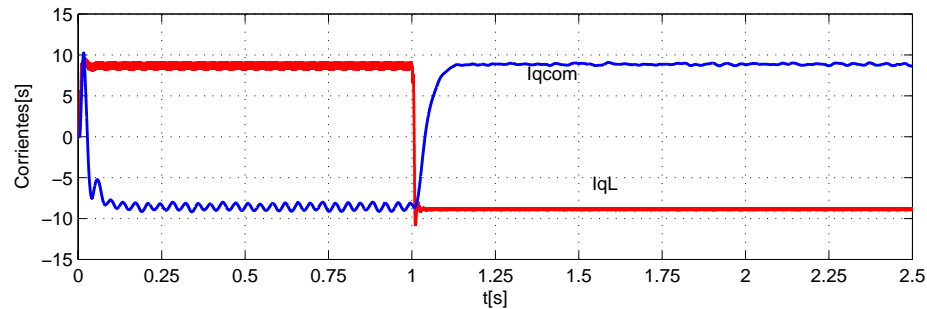


Figura 7.8: Compensación dinámica del factor de potencia de la carga

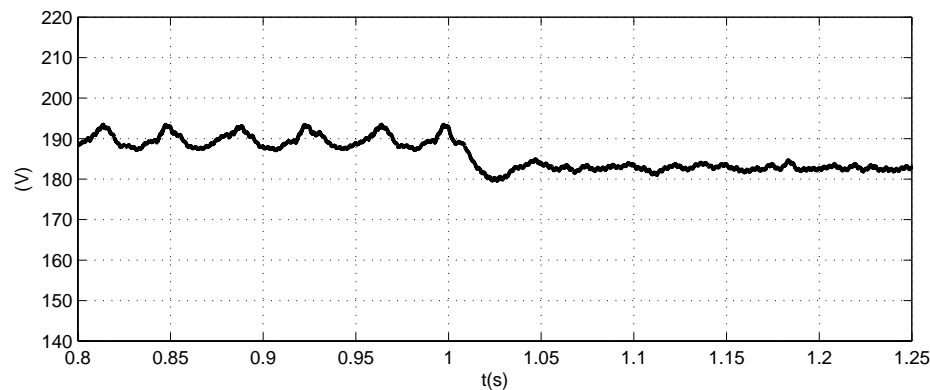


Figura 7.9: Dinámica de la tensión del capacitor en el lado DC del compensador

Con este mismo ejemplo de simulación se conmutaron dos cargas, una de tipo inductivo y otra de tipo capacitivo, el evento simulado fué que primero la simulación empezara con compensación del factor de potencia para la carga inductiva, luego al cabo de 1 (un) segundo se desconecta la carga inductiva y se conecta al mismo tiempo una carga capacitiva tipo RC que entregue la misma cantidad de reactivos, equivalente al de la carga inductiva. En la figura 7.8 se muestran las componentes en cuadratura de las corrientes de compensación y carga. En esta figura se puede notar la compensación dinámica del factor de potencia de la carga conectada al sistema.

En la figura 7.9 se puede notar como el capacitor se carga y se descarga al pasar de una compensación del factor de potencia inductivo a una compensación del factor de potencia capacitivo, permitiendo el cambio del flujo de potencia reactiva.

7.2.2. Caso 2

El ejemplo que se relata a continuación es un ejemplo muy empleado en [Canizares., 2000].

El sistema de potencia utilizado para la simulación se muestra en la figura 7.11. El objetivo de la inclusión del STATCOM en la barra ocho del sistema de potencia es la regulación de tensión, para mejorar el perfil de tensión en estado estable y en estado dinámico. En las siguientes tablas se presentan los parámetros del sistema de potencia, de la máquina síncrona y del STATCOM.

El STATCOM utilizado es una configuración de 12 pulsos mostrado por la figura 7.10, donde el transformador de acoplamiento posee una reactancia de dispersión $X = 7,5\%$ con una potencia de 150 MVA, los transformadores que conforman el circuito magnético de eliminación de armónicos, poseen una reactancia de dispersión cada uno de $3,75\%$ en una potencia de 75 MVA/cu.

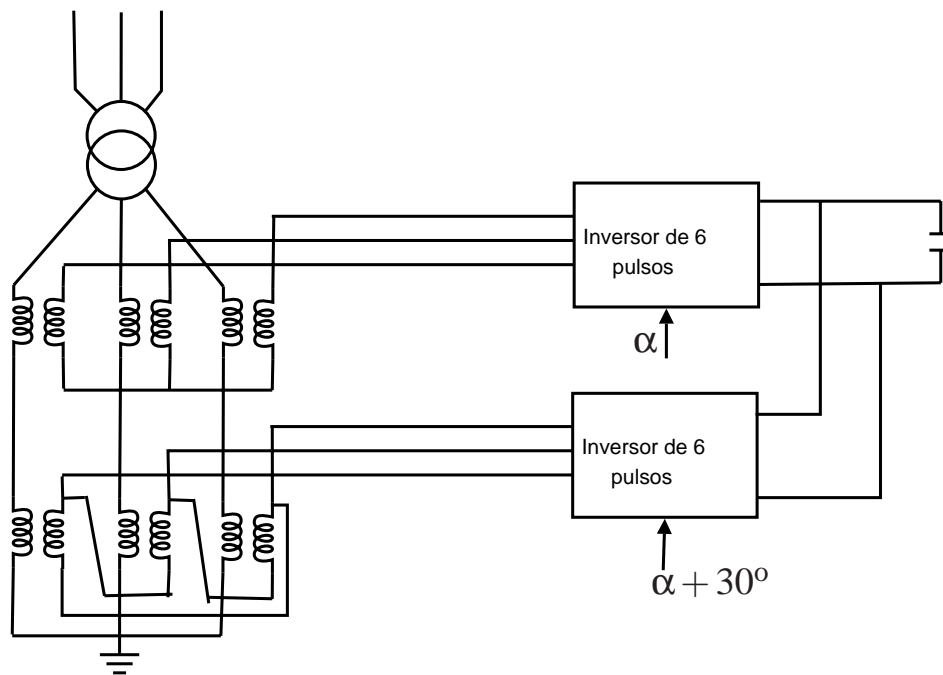


Figura 7.10: Configuración de un STATCOM de 12 pulsos

El Regulador Automático de Tensión (AVR) del generador utilizado es el que se muestra en la figura 7.12.

Variable	Valor [p.u]	Variable	Valor [p.u]
Polo	2	H	2,7113
R_a	0,001096	D	0
X_l	0,15	T'_{d_0}	6,19488
X_d	1,7	T'_{q_0}	0
X_q	1,64	T''_{d_0}	0,028716
X'_d	0,238324	T''_{q_0}	0,07496
X''_d	0,18469	X''_q	0,185151

Cuadro 7.2: Parámetros de la maquina síncrona, con bases de 200MVA y 13.8kV

Elemento	R	X	B/2
1-2	0,0003	0,0684	0
2-3	0,0159	0,2275	0,0754
3-8	0,022	0,316	0,1047
4-3	0	0,08	0
5-6	0,0026	0,0379	0,0126
6-7	0	0,12	0
8-9	0,0026	0,0379	0,0126
9-10	0	0,12	0
Filtro	0,0087	-4,3	0

Cuadro 7.3: Parámetros del sistema de potencia en p.u., con potencia base de 240 MVA

Variable	Valor p.u.
R	0
X	0,0145
Gc	2,16
C	0,0432

Cuadro 7.4: Parámetros del STATCOM en p.u., con potencia base de 150 MVA y 12 kV

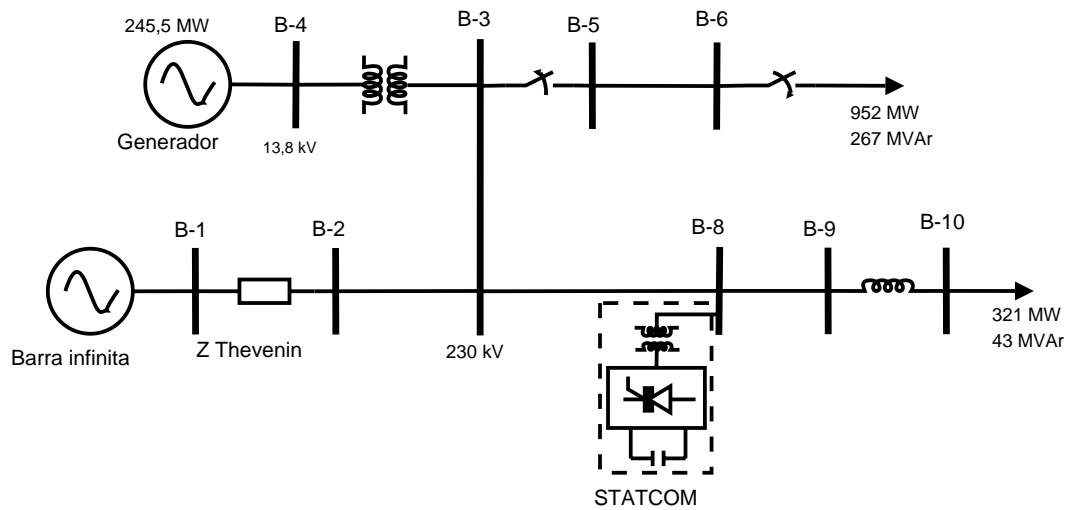


Figura 7.11: Sistema de potencia para el caso de simulación 2

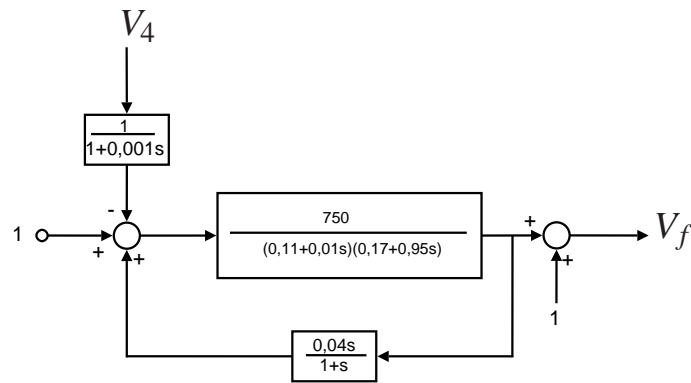


Figura 7.12: Regulador Automático de Tensión, AVR

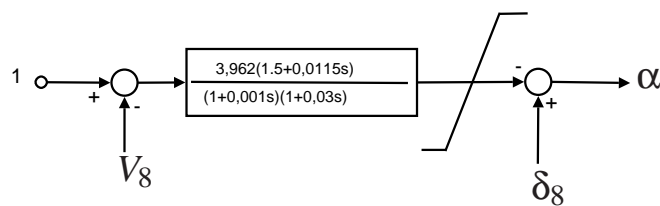


Figura 7.13: Sistema de control de fase

7.2.2.1. Modelo del STATCOM en el software HAGP

El modelo del sistema de control empleado se explico en el capítulo anterior. Los parámetros eléctricos del STATCOM y del sistema de potencia se relatan en la tablas 7.2, 7.3 y 7.4.

Tiempo	Evento
0,00 s	Inicio de simulación
4,5 s	Conexión de una gran carga en barra 6
4,65 s	Desconexión de carga de la barra 6
10 s	Fin de simulación

Cuadro 7.5: Secuencia de eventos de la simulación caso 2

La descripción de los eventos para el caso simulado bajo la herramienta de simulación HAGP se detallan en la tabla 7.5.

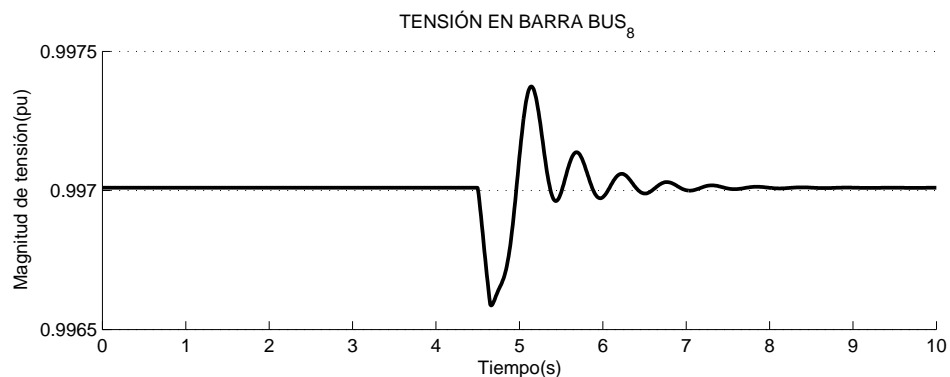


Figura 7.14: Magnitud de tensión en la barra 8

Como puede observarse, las respuestas dinámicas dadas por el software HAGP, en cuenta a el ángulo del rotor del generador(figura 7.15) y la tensión en el barra 8 del sistema de potencia(figura 7.14) ante la ocurrencia de la perturbación descrita anteriormente difieren un poco de las respuestas dinámicas dadas con los modelos creados en ATP.

También se debe tener en cuenta que los sistemas de excitación del generador son diferentes en ésta simulación y en la siguiente, éstos se cambiaron para mejorar la dinámica de la tensión a la salida del generador.

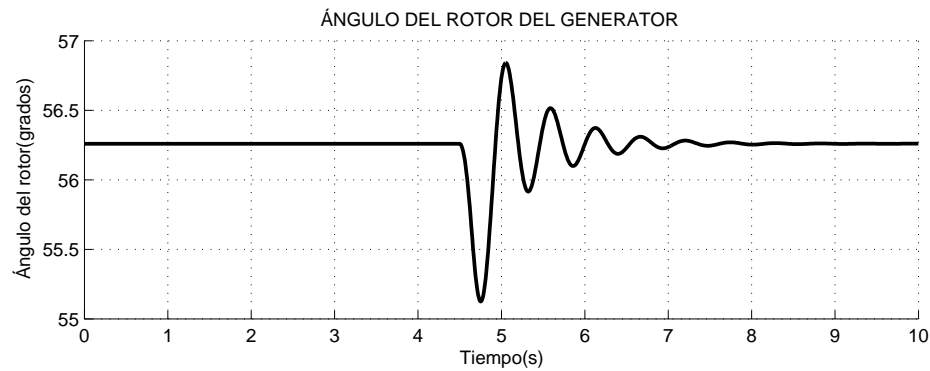


Figura 7.15: Ángulo del rotor del generador

Es importante resaltar que estos tipos de modelos desprecian los armónicos creados por las conmutaciones de los interruptores de potencia.

7.2.2.2. Técnica de control de fase

El sistema de control implementado para el STATCOM, es por medio de la técnica de control de fase explicada en el capítulo anterior donde el controlador utilizado se muestra en la figura 7.13.

En la figura 7.11 se conecta una carga de valor elevado a la barra 6 a los 4,5s y después el interruptor colocado entre barras 3-5 se abre en un tiempo de 4,65s para desconectar la carga (952 MW 267MVAR, con su equivalente RL en la herramienta ATP/EMTP). Ahora se observará la perturbación del sistema y de como actúa el STATCOM como regulador de tensión.

Con la inclusión del STATCOM en el sistema, el perfil de tensión de la barra 8, se ve mejorado tal y como lo muestra la figura 7.16, el cual pasa de 0,82 p.u. a 1 en p.u.

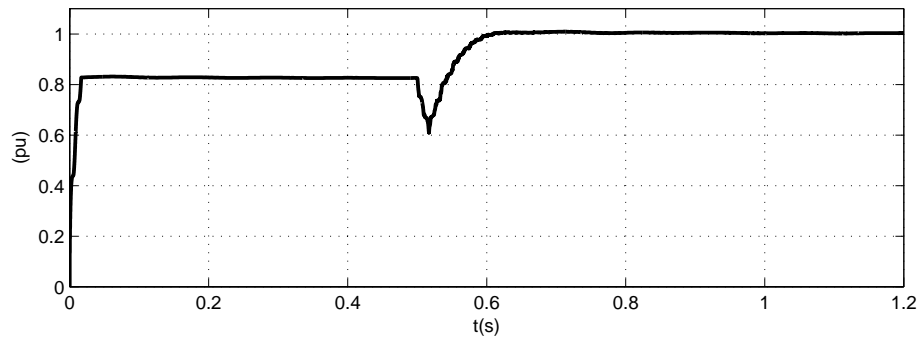


Figura 7.16: Inclusión del STATCOM en barra 8 a los 0,5 seg

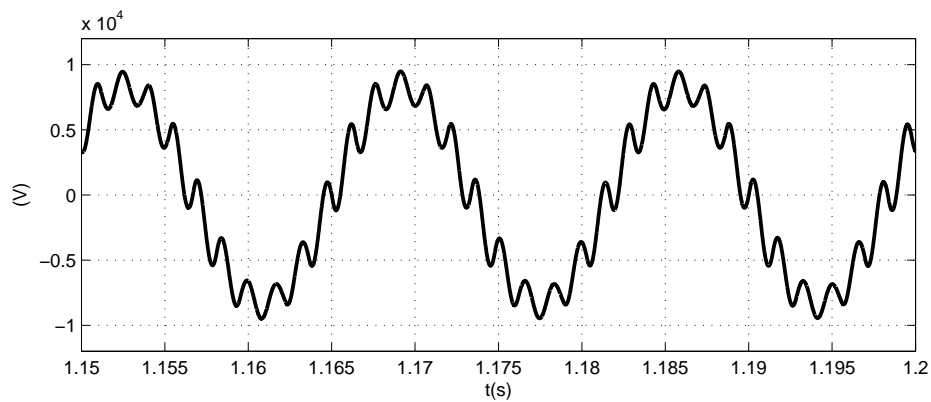


Figura 7.17: Forma de onda de la tensión a la salida del inversor

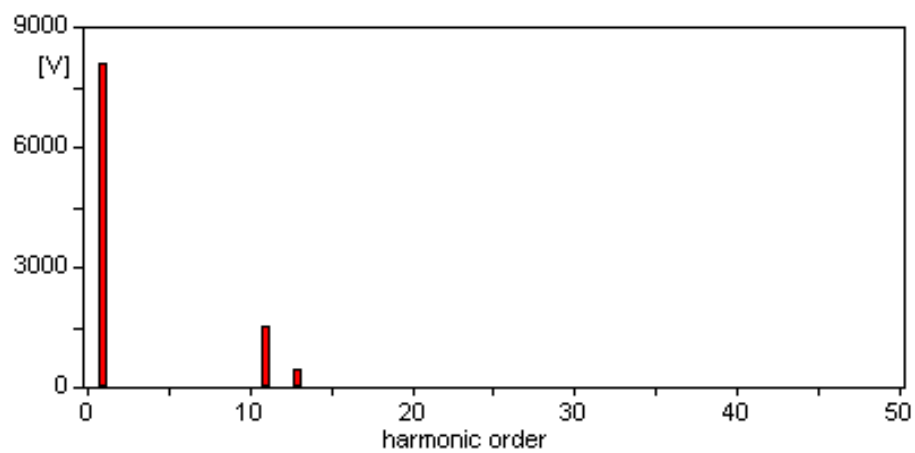


Figura 7.18: Espectro armónico de tensión en la salida del inversor

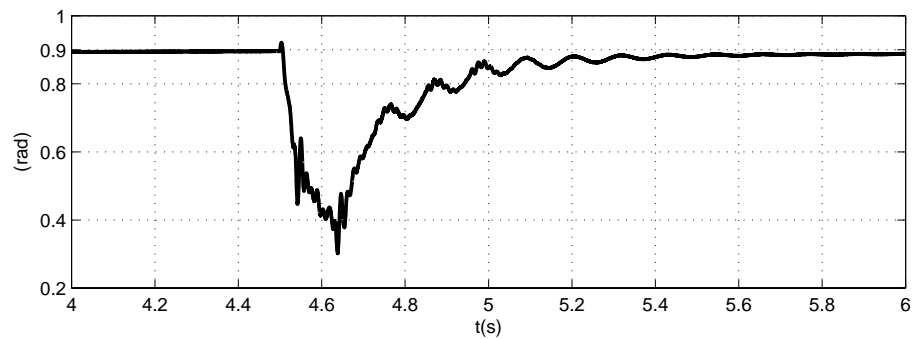


Figura 7.19: Ángulo del Generador

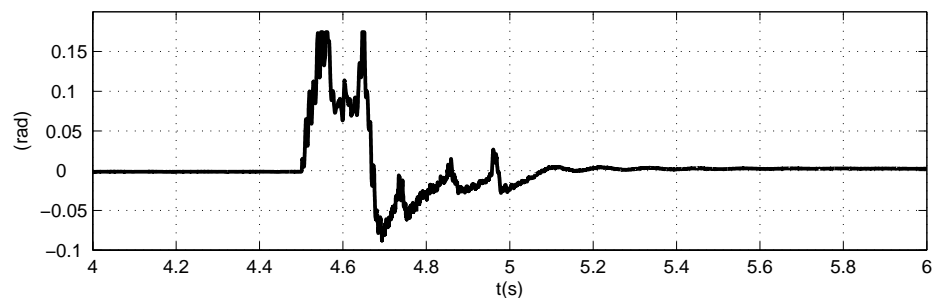


Figura 7.20: Ángulo de desfase del control

La forma de onda de tensión de la barra ocho muestra un risado debido a los armónicos incluidos por las conmutaciones de los interruptores del circuito inversor (figura 7.17). Su espectro armónico se muestra en la figura 7.18, donde solo aparecen los armónicos 11 y 13, por la actuación del filtro RC implementado en la salida del inversor del STATCOM.

La figura 7.19 muestra el transitorio del ángulo del generador, dado en radianes. Ésta se estabiliza al rededor del segundo despues de la perturbación, apreciandose la contribución a la estabilidad de ángulo del sistema de potencia.

También la figura 7.20, muestra el transitorio del ángulo de desfase existente entre la tensión del sistema AC y la tensión en lado de baja del transformador de acople. Cuando la perturbación se aplica al sistema de potencia, la tensión del conversor sufre una caída de tensión, por consiguiente el sistema de control, actúa al principio del transitorio para aumentar el angulo de desfase, y con ésto proporcionar los reactivos suficientes para

mantener la tensión en el punto de conexión del STATCOM. Por tanto, sin éste desfase el cargue y descargue del capacitor sería imposible de controlar, que en últimas es la tensión en el capacitor, la que se controla para producir el intercambio de potencia reactiva y activa entre el sistema de potencia y el STATCOM.

7.2.2.3. Esfuerzos en los elementos de conmutación

En la grafica mostrada por la figura 7.21 se muestra la corriente que aparece en uno de los elementos de conmutación con un valor de corriente al rededor de 15kA.

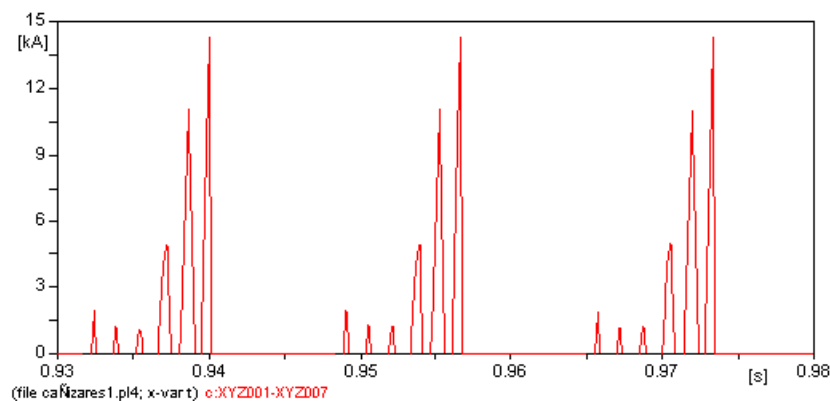


Figura 7.21: Corriente en un dispositivo de conmutación

Como el STATCOM, mejoró el perfil de tensión de la barra 8, entonces quiere decir que las exigencias de corriente y de tensión son altas, para una configuración de 12 pulsos, por tanto, es recomendable ampliar el número de pulsos para que la potencia se distribuya en todos los convertidores de 6 pulsos y así, atenuar la demanda de corriente.

7.2.3. Caso 3

El ejemplo correspondiente al caso 3 se implementó con la herramienta de simulación ATP/EMTP. Se trata del modelado y simulación de un STATCOM con una configuración de 48 pulsos, con la técnica de control de fase, como se explicó en el capítulo anterior. Este ejemplo es referenciado en [C.A.C. Cavaliere, 2000].

El sistema de potencia se simula un STATCOM conectado directamente a una barra infinita, centrando su modelado en el STATCOM, del cual, sus componentes se modelan

por intermedio de librerías, las cuales, dan origen a la creación de modelos más complejos, en base de los propios modelos de ATP. Éstas librerías son hechas bajo la subrutina DATA BASE MODULE que posee la herramienta de simulación ATP. La creación de librerías para representar los componentes del STATCOM, es muy útil porque ayuda a minimizar la cantidad de modelos de ATP montados sobre su interfaz grafica (ATP-Draw).

La barra infinita está representada como una fuente de tensión con su impedancia equivalente de Thevenin. Su potencia de cortocircuito $S_{cc} = 2000\text{MVA}$, con una tensión nominal de 138 kV . La impedancia de Thevenin se calcula como:

$$X_{th} = \frac{V_{nominal}^2}{S_{cc}}$$

7.2.3.1. Inversor

La capacidad de interrupción de corriente y soporte de tensión de los dispositivos de conmutación determinan la potencia de los inversores. Los dispositivos semiconductores se modelan por medio interruptores ideales en ATP Type 13 (interruptores controlados por TACS), donde a cada dispositivo de conmutación se le adiciona una red snubber tipo RC. Para el modelo digital implementado se consideró que los inversores tendrían una potencia de 12,5 MVA. Estos inversores se basan en dispositivos semiconductores con características de bloqueo de 6kA/6kV (para una potencia de 100 MVA son necesarios 8 inversores).

7.2.3.2. Transformadores

Los transformadores se modelaron a través del acople de modelos de transformadores monofásicos saturables que posee ATP. Que necesitan como parámetros de entrada, las resistencias y las inductancias de dispersión de cada devanado de los transformadores. Se despreciaron las características de saturación de los transformadores.

Para la configuración estrella-delta de los transformadores para la estructura de reducción de armónicos, donde se necesitan 4 transformadores estrella-estrella y cuatro transformadores estrella-delta, cumpliendo respectivamente con las relaciones de transformación de 1:1 para los transformadores estrella-estrella y $1 : \sqrt{3}$, para transformadores estrella-delta.

Se consideró una salida de los inversores de 4,3kV, donde la disposición en serie de 8 transformadores dan una suma de 34,3 kV. Definiéndose una base en tensión de estos transformadores de 4,3 kV con una potencia base de 12,5 MVA , una reactancia del 8 % y una resistencia de 0.1 %.

El transformador de acoplamiento tiene una relación de transformación $138kV Y - 34,5kV \Delta (4 : \sqrt{3})$ respectivamente. Con una reactancia de 5 % y una resistencia de 0.1 % , en una base de 138kV y una potencia de 100MVA.

El capacitor que se utilizo tiene un valor de $4820 \mu F$.

En la tabla 7.6 se define la secuencia de los eventos de la simulación.

Tiempo [s]	Evento
0,00	Inicio de simulación
0,05	Partida del STATCOM(sin el PLL activado)
0,25	Partida de los inversores y control de potencia reactiva
0,5	Modo inductivo- referencia de potencia reactiva +1 p.u.
0,75	Modo capacitivo- referencia de potencia reactiva -1 p.u.
1,00	Referencia nula-referencia de potencia reactiva cero
1,25	fin de simulación

Cuadro 7.6: Secuencia de eventos de la simulación

A continuación se muestran las gráficas que definen la simulación.

En los primeros instantes de simulación se muestra la dinámica de partida de la señal de frecuencia (figura 7.22), ω , obtenida del PLL, se muestra un transitorio de aproximadamente de 150 ms para estabilizarse en una frecuencia de 376 rad/seg, también se observa de este resultado una pequeña variación de la señal creada a partir de la conmutación de los interruptores a los 0,25 s de simulación.

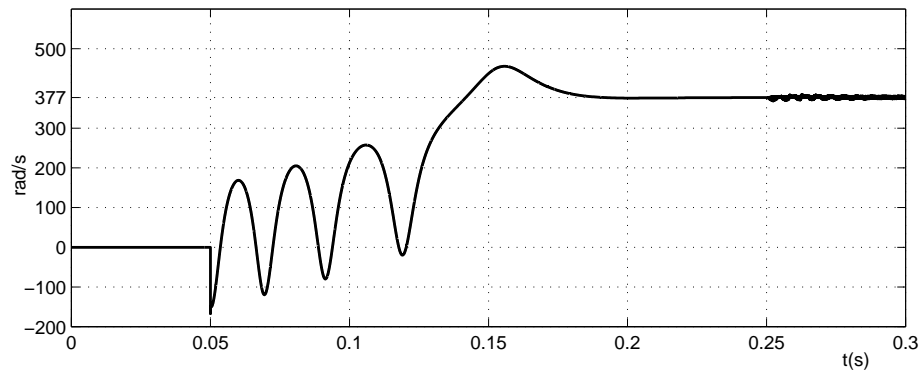


Figura 7.22: Frecuencia en radianes por segundo

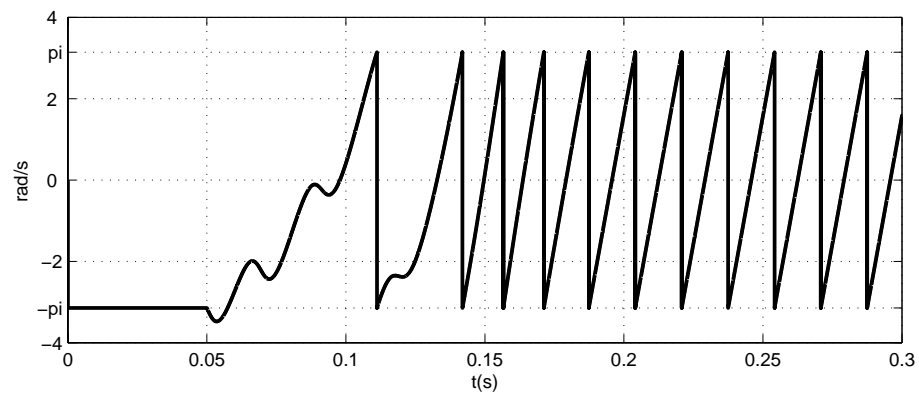


Figura 7.23: Señal de sincronismo del PLL

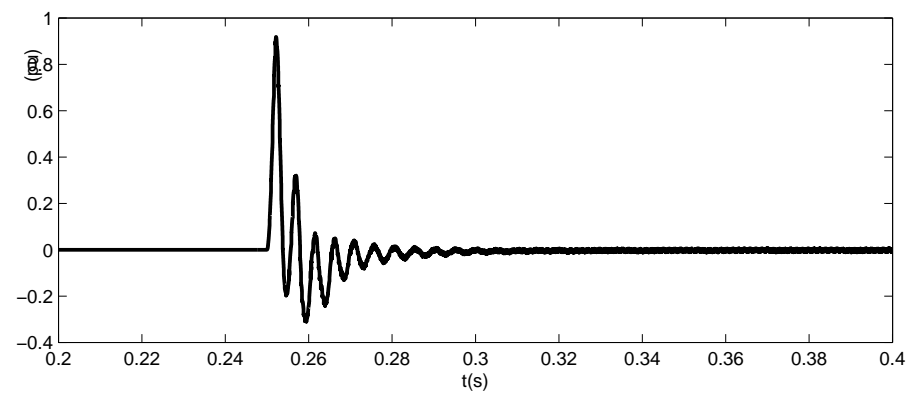


Figura 7.24: Potencia imaginaria instantánea inicial

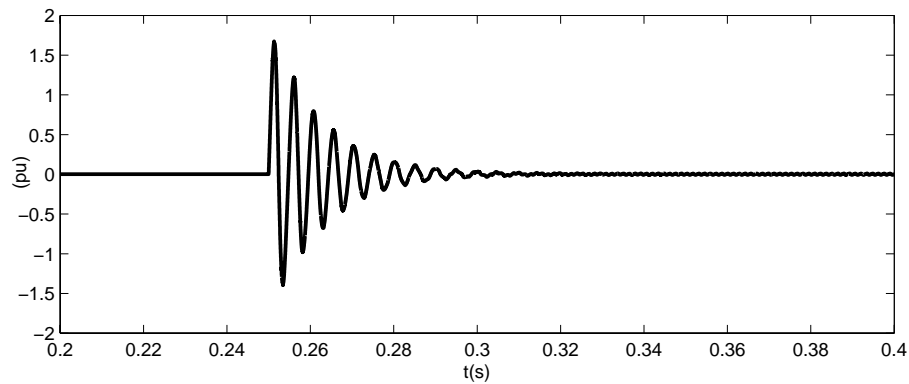


Figura 7.25: Potencia activa instantánea inicial

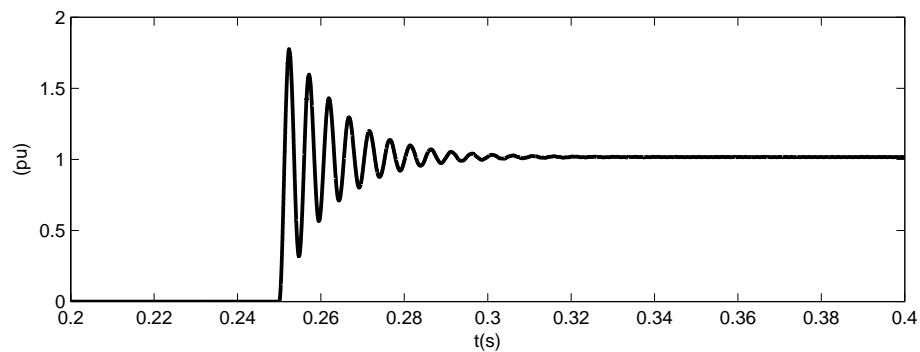


Figura 7.26: Tensión del capacitor

Además, la figura 7.23 muestra la señal de sincronismo, ωt , generada por el PLL. La interferencia del accionamiento de los inversores no se nota mucho porque el PLL tiene un integrador que actúa como filtro.

La figura 7.24 muestra la señal de potencia imaginaria instantánea, q , durante el intervalo de partida del STATCOM.

La figura 7.25 muestra la señal de potencia activa instantánea, p , durante el intervalo de partida del STATCOM.

La figura 7.26 muestra el transitorio que ocurre con la tensión del capacitor, donde se producen unas oscilaciones para luego en aproximadamente 90ms se estabilice a su valor nominal.

Los picos observados en las potencias imaginarias y activas instantáneas son consecuentes del cargado inicial del capacitor. En el instante de partida del STATCOM, el capacitor está descargado y con tensión cero. Cuando los inversores se accionan, permiten el paso de energía del sistema al capacitor, para cargarlo a su tensión nominal, que corresponde a un valor nulo de potencia imaginaria instantánea.

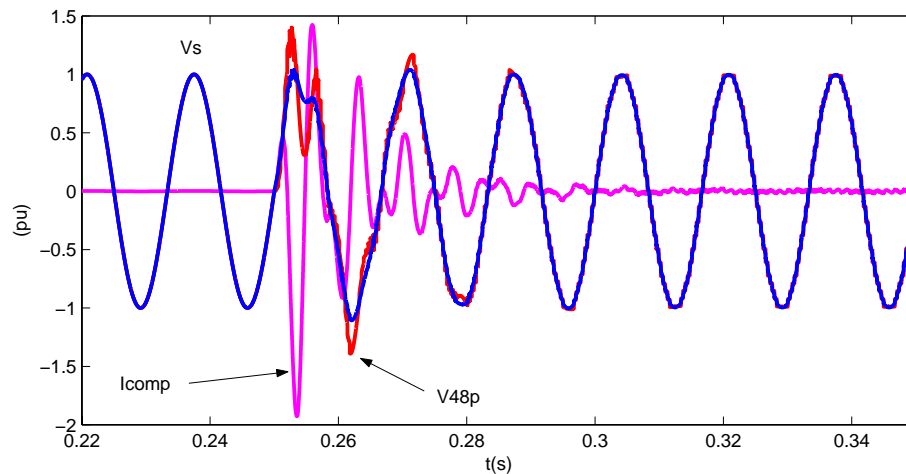


Figura 7.27: Tensión del sistema V_s , tensión 48 pulsos y corriente de compensación I_c

En la figura 7.27 se muestra la tensión del sistema AC, V_s , la tensión del convertor de 48 pulsos, y la corriente de compensación de la fase “a”, normalizadas. El transitorio de partida del STATCOM, también interfiere con los valores de tensión y corrientes. La tensión de 48 pulsos, está relacionada con la tensión del capacitor, por este motivo los transitorios de la tensión del capacitor, afectan a la tensión de 48 pulsos, pero a su vez la tensión de 48 pulsos interactúa con la tensión del sistema y afecta la corriente de compensación.

7.2.3.3. Resultados de la respuesta dinámica del STATCOM

La figura 7.28 muestra la potencia imaginaria del STATCOM y la potencia imaginaria instantánea de referencia, en el intervalo de actuación del control de potencia reactiva. Con este resultado fué probada la capacidad del STATCOM para operar tanto en modo inductivo, como en el modo capacitivo con la potencia deseada. La potencia imaginaria sigue perfectamente la referencia del control.

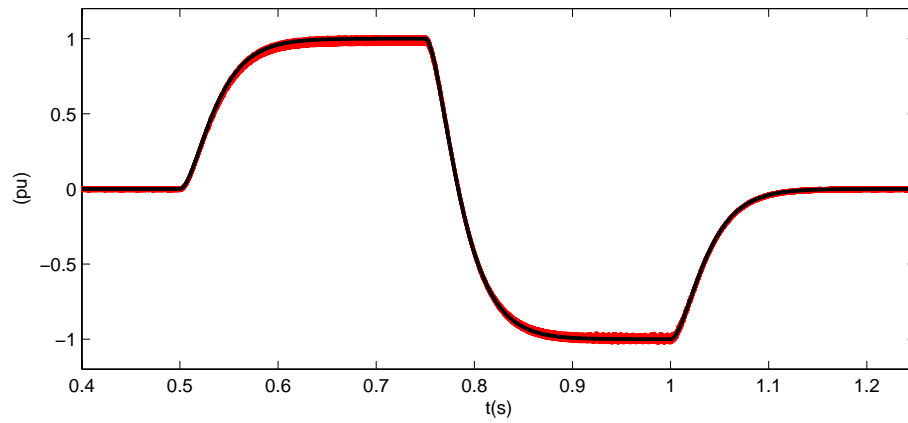


Figura 7.28: Potencia imaginaria instantánea

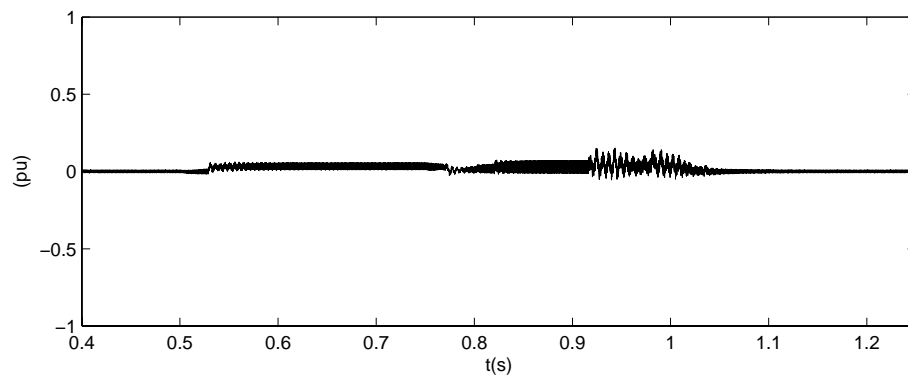


Figura 7.29: Potencia activa instantánea

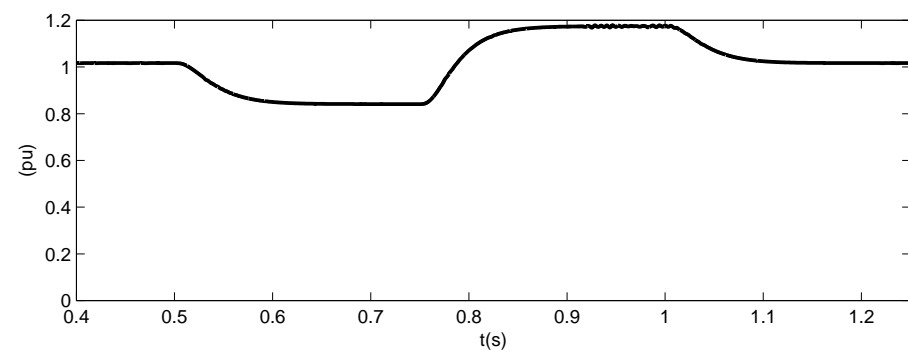


Figura 7.30: Tensión del capacitor

La figura 7.29 muestra la potencia activa instantánea p , en este resultado se observan las variaciones de potencia activa necesarias para el funcionamiento del STATCOM.

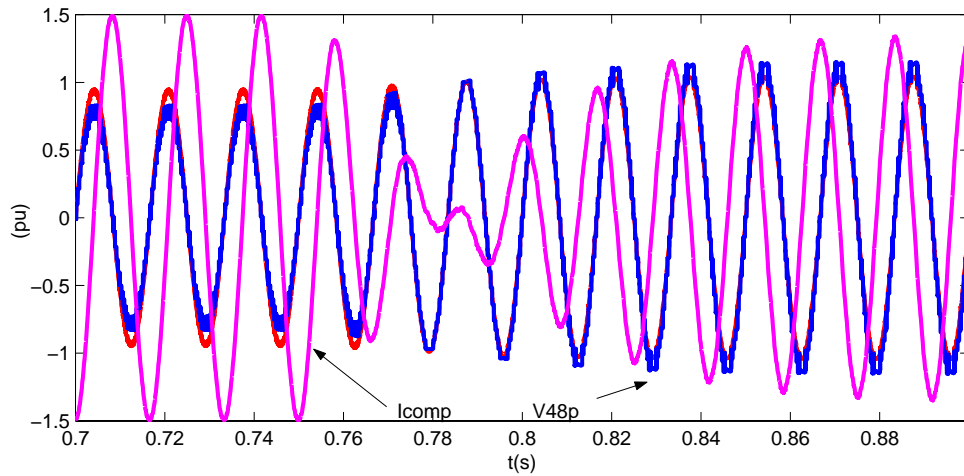


Figura 7.31: Tensión del sistema V_s , tensión 48 pulsos y corriente de compensación I_c

En la figura 7.30 se muestra la tensión en el capacitor, respecto a los modos de compensación, cero, inductivo y capacitivo.

En la figura 7.31 se muestra la tensión del sistema AC, V_s , la tensión de 48 pulsos, V_{48} , y la corriente de compensación en el instante que pasa del modo inductivo al modo capacitivo.

Observar en la figura 7.31 que en el modo inductivo, la tensión del sistema AC, está por encima de la tensión de 48 pulsos y la corriente de compensación está atrasada 90° de las tensiones. Cuando pasa al modo capacitivo, la tensión de 48 pulsos, sobrepasa a la tensión del sistema AC y la corriente de compensación pasa a estar 90° adelantadas de las tensiones.

7.2.3.4. Esfuerzos en los elementos de conmutación

En las gráficas de las figuras 7.32, 7.33 y 7.34 se muestran las corrientes que circulan por unos de los dispositivos de conmutación modelados en este ejemplo con ATP/EMTP, cuando el STATCOM se encuentra operando en modo capacitivo, inductivo y nulo, respectivamente. La máxima corriente demandada para tal propósito es cercana 2500 A .

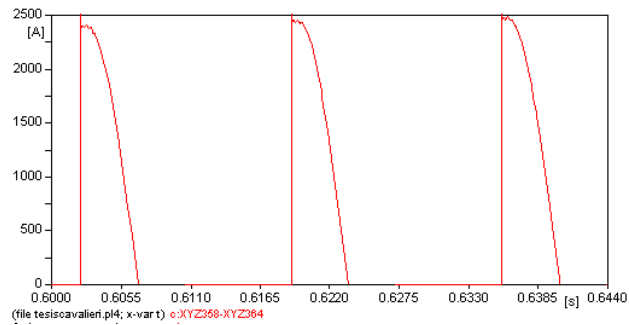


Figura 7.32: Corriente que circula por uno de los elementos de conmutación, en modo inductivo

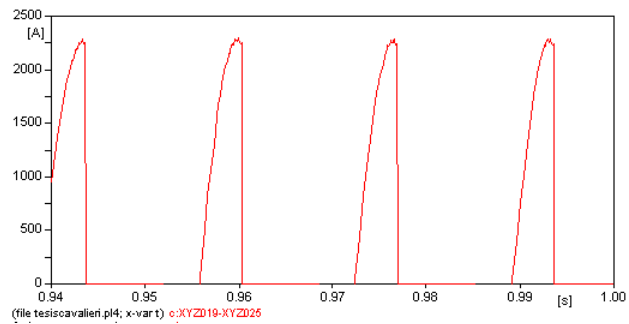


Figura 7.33: Corriente que circula por uno de los elementos de conmutación, en modo capacitivo

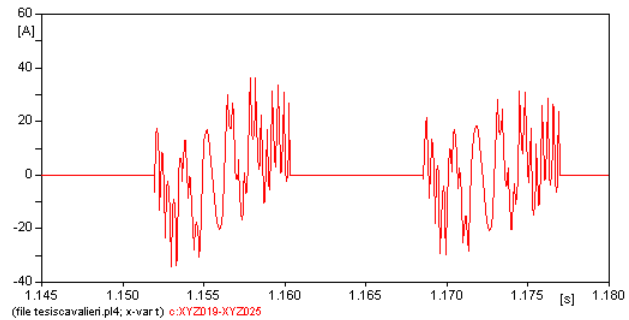


Figura 7.34: Corriente que circula por uno de los elementos de conmutación, con referencia de potencia reactiva cero

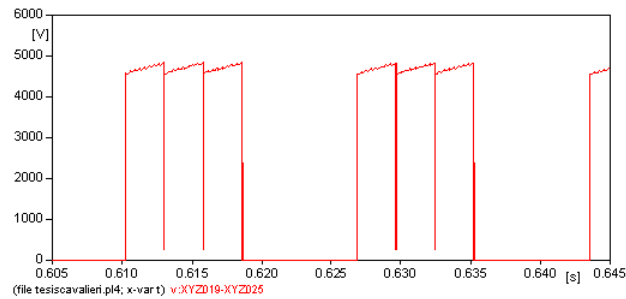


Figura 7.35: Tensiones de los elementos de conmutación, en modo inductivo

En las gráficas de las figuras 7.35, 7.36 y 7.37 se muestran las tensiones que aparecen en los extremos de los dispositivos de conmutación, cuando el STATCOM se encuentra operando en modo capacitivo, inductivo y nulo, respectivamente.

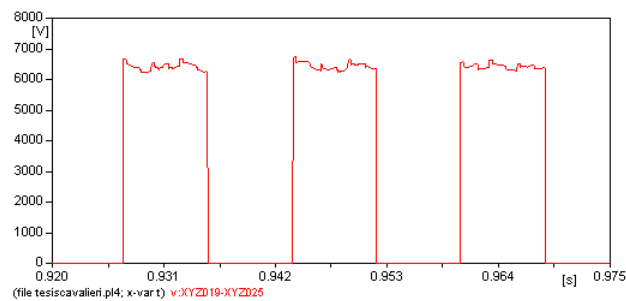


Figura 7.36: Tensiones de los elementos de conmutación, en modo capacitivo

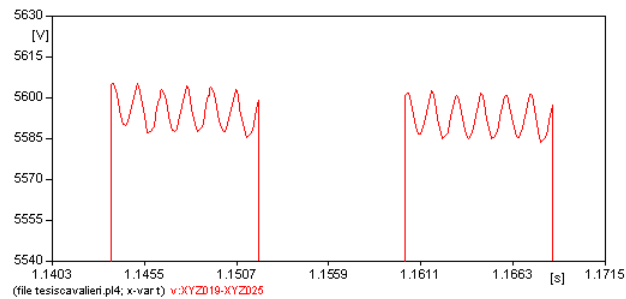


Figura 7.37: Tensiones de los elementos de conmutación, con referencia de potencia reactiva cero

Cuando el STATCOM está operando en modo capacitivo, aparece la máxima tensión

entre los extremos de los dispositivos de conmutación. Ésta tensión corresponde a unos 6600 V.

Es importante resaltar que en cuanto a las especificaciones dadas en la sección 7.2.3.1 para los dispositivos de conmutación (6kV/6kA), los valores de tensión de bloqueo están muy ajustados, aún sabiendo que no se ha simulado el ejemplo para una perturbación del sistema considerable. Solo los límites de corrientes no se superaron para los propósitos de esta simulación.

Capítulo 8

Conclusiones y sugerencias

La apropiación de este tipo de tecnologías por medio de modelos digitales es muy importante, en el sentido de que pueden predecir el comportamiento del sistema y su interacción con otro tipos de dispositivos.

El STATCOM tiene la gran capacidad de producir potencia reactiva bien sea inductiva o capacitiva, a partir de la misma energía que le entrega la red de energía eléctrica.

Las técnicas de control de éste tipo de dispositivo, dependen de la aplicación que se quiera en el momento, ya que las técnicas de modulación PWM ofrecen mayor capacidad de respuesta en comparación con otras, como las técnicas de control de fase, ésta última, muy utilizada en los últimos años para configuraciones de STATCOM-multipulsos.

Se comprobó la versatilidad que puede tener el STATCOM, en el sentido de la estrategia y de las variables a compensar, factor de potencia, regulación de tensión en un punto de conexión, control de potencia reactiva.

A nivel de Distribución es más aconsejable montar equipamientos controlados por técnicas PWM debido a su rapidez de respuesta, teniendo en cuenta que los armónicos generados pueden ser atenuados por intermedio de filtros adecuados.

La creación de los modelos digitales fue muy decisiva para el buen desempeño de las simulaciones. El modelo del STATCOM y del sistema de potencia se llevó a cabo por la creación de librerías, a través de la subrutina DATA BASE MODULE que contiene ATP para la creación de modelos más acordes con los requerimientos de la simulación.

El porqué de tantos módulos creados para la simulación del STATCOM de 48 pulsos es que antes de simular un equipamiento tan detallado, primero hay que garantizar la

estabilidad numérica. Las oscilaciones que se presentan se deben a la cantidad de elementos no lineales en la simulación. Dichas oscilaciones son propias y se acentúan aún más en los programas de simulación que utilizan en su algoritmo de solución, la regla trapezoidal.

En cuanto a las simulaciones en ATP, es muy importante encontrar un buen punto de operación de los sistemas de potencia (especialmente para sistemas de potencia medianos y grandes), para poder hacer comparaciones más precisas con otros programas de simulación. Estos se pueden mejorar utilizando rutinas propias de flujos de cargas de ATP como lo son FIX SOURCE y CAO LOAD FLOW, para obtener unas condiciones iniciales en estado estable más acordes entre un software y otro.

8.1. Aportes originales del trabajo

- Creación de modelos detallados de los componentes básicos del STATCOM en ATPDraw y del sistema de potencia, ya que éste no cuenta con modelos base para llevar a cabo este tipo de simulaciones.
- Estructuración de uno de los modelos más representativos de los dispositivos FACTS, en el caso específico de este trabajo: EL STATCOM.
- Creación de un modelo reducido del STATCOM para su posterior inclusión en el software de simulación de sistemas de potencia para el análisis de estabilidad ante grandes perturbaciones (HAGP).

8.2. Sugerencias para posteriores desarrollos

- A nivel académico se sugiere la creación de un banco de módulos de librerías en ATP, para hacer las simulaciones posteriores más rápidas y fáciles, por ejemplo: sistemas de protecciones, módulos estándar para el sistema de excitación de la máquina síncrona, entre otros.
- Crear una estrategia para la linealización del sistema de potencia con sus dispositivos de control para encontrar de una manera más fácil los parámetros de los diferentes sistemas de control, que al final darán una respuesta dinámica más acorde con la teoría.

- Verificar nuevas topologías para el STATCOM, utilizando inversores trifásicos de tres niveles, transformadores en zig-zag.
- Investigar el desempeño dinámico del STATCOM utilizando además del condensador, elementos de almacenamiento de energía como:

Materiales superconductores

Baterías, etc.

- Diseñar estrategias de control para sistemas de potencias desbalanceados

Bibliografía

- C.A.C. CAVALIERE E.H. WATANABE M. A. “ANÁLISE DE OPERAÇÃO DE STATCOM EM SISTEMAS DESBALANCEADOS”. *CBA2000*, FLORIANOPOLIS, BRASIL 2000.
- CANIZARES. C. A. “MODELING AND IMPLEMENTATION OF TCR AND VSI BASED FACTS CONTROLLERS”. *Internal Report, ENEL and Politecnico di Milano, Milan, Italy*, OCT. 1999.
- CANIZARES. C. A. “POWER FLOW AND TRANSIENT STABILITY MODELS OF FACTS CONTROLLERS FOR VOLTAGE AND ANGLE STABILITY STUDIES”. *Proc. of IEEE/PES Winter Meeting, Singapore*, JANUARY 2000.
- C.SCHAUDER E.STACEY M. L. L. A. A. “AEP UPFC PROJECT: INSTALLATION, COMMISSIONING AND OPERATION OF THE +/- 160 MVA STACOM (PHASE I)”. *IEEE Trans. on Power Delivery*, VOL. 13, No. 4, PP. 1530–1535, OCTOBER 1998.
- C.SHAUDER M.GERNHARDT E. T. L. T. Y A.EDRIS. “DEVELOPMENT OF A +/- 100 MVAR STATIC CONDENSER FOR VOLTAGE CONTROL OF TRANSMISSION SYSTEMS”. *IEEE Trans. on Power Delivery*, VOL. 10, No. 3, PP. 371– 379, JULY 1995.
- EDWARDS C. “ADVANCED STATIC VAR GENERATOR EMPLOYING GTO THYRISTORS”. *IEEE PES Winter Power Meeting*, VOL. PWRS-4, No. 38WM109-1, PP. 177–179, SEPTEMBER 1988.
- EDWARDS C. “ADVANCED STATIC VAR GENERATOR EMPLOYING GTO THYRISTORS”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, VOL. 3, No. 4, PP. 1622–1627, OCTOBER 1988.

- E.H. WATANABE R.M. STEPHAN M. A. “NEW CONCEPTS OF INSTANTANEOUS ACTIVE Y REACTIVE POWERS IN ELECTRICAL SYSTEMS WITH GENERIC LOADS”. *IEEE Trans. on Power Delivery*, VOL. 8, NO. 2, PP. 697–703, APRIL 1993.
- GRAINGER J. J. Y STEVENSON W. D. *Análisis de Sistemas de Potencia*. MCGRAW-HILL, 1996, 1DA. EDITION.
- GYUGYI L. “DYNAMIC COMPENSATION OF AC TRANSMISSION LINES BY SOLID STATE SYNCHRONOUS VOLTAGE SOURCE”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, VOL. 9, NO. 2, PP. 904–911, APRIL 1994.
- H. FUJITA S. TOMINAGA H. A. “ANALYSIS AND DESIGN OF A DC VOLTAGE CONTROLLED STATIC VAR COMPENSATOR USING QUAD SERIES VOLTAGE SOURCE INVERTERS”. *IEEE Trans. on Industry Applications*, VOL. 32, NO. 4, JULY/AUGUST 1996.
- KUNDUR P. *Power System Stability and Control*. MCGRAW-HILL, INC., 1994, 1ST. EDITION.
- MEJÍA L. *Herramienta software para el modelado y simulación de sistemas eléctricos de potencia ante grandes perturbaciones. Diseño y elaboración*. TESIS PREGRA-DO, ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES, UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, ABRIL 2005.
- N. MOHAN T.M. UNDELAND W. R. *Power Electronics*. JOHN WILEY AND SONS INC., NEW YORK, 1995.
- NARAIN G. HINGORANI L. G. *UNDERSTANDING FACTS Concepts And Technology Of Flexible AC Transmission Systems*. IEEE PRESS, 2000, 1ST. EDITION.
- N.G.HINGORANI. “FLEXIBLE AC TRANSMISSION”. *IEEE Spectrum*, VOL. 30, NO. 4, PP. 40–45, APRIL 1988.
- N.G.HINGORANI. “FACTS-FLEXIBLE AC TRANSMISSION SYSTEMS”. *Workshop on the Future in High-Voltage Transmission Systems, Cincinnati, Ohio*, NOV. 1990.

- P. GARCIA GONZALEZ A. G. C. "CONTROL SYSTEM FOR A PWM BASED STATCOM". *IEEE Trans. on Power Delivery*, VOL. 15, No. 4, pp. 1140–1145, OCTOBER 2000.
- P.M. ANDERSON A. F. *Power System Control and Stability*. IEEE PRESS, 1994, 1A. EDITION.
- RASHID M. *Electronica de Potencia: Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*. PEARSON PRENTICE HALL, 2004, 3RA. EDITION.
- RODRÍGUEZ C. *Herramienta software para el modelado y simulación de sistemas eléctricos de potencia ante grandes perturbaciones. Diseño y elaboración*. TESIS PREGRADO, ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES, UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, DICIEMBRE 2003.
- S. KINCIC A. CHANDRA S. B. "MULTILEVER INVERTER AND ITS LIMITATIONS WHEN APLIED AS STATCOM".
- SCHAUDER C. Y MEHTA H. "VECTOR ANALYSIS AND CONTROL OF ADVANCED STATIC VAR COMPENSATORS". *Proc. Inst. Elect. Eng.*, VOL. 140, No. 4, pp. 299–306, JULY 1993.
- S.MORI K.MATSUNO M. M. "DEVELOPMENT OF A LARGE VAR GENERATOR USING SELF-COMMUTATED INVERTERS FOR IMPROVING POWER SYSTEM STABILITY". *IEEE Trans. Power Delivery*, VOL. 8, No. 1, pp. 371– 377, FEB. 1993.
- VARGAS H. R. *Control Digital de un Inversor Trifásico*. TESIS DE MAESTRÍA, ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES, UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, DICIEMBRE 1990.
- VAS P. *Vector Control of AC Machines*. OXFORD:CLAREDON PRESS, 1994, 1ST. EDITION.
- WILLIAM H. HAYT JR. J. K. *Análisis de Circuitos en Ingeniería*. MC GRAW HILL, 1998, 5TA. EDITION.

- Y. SUMI Y. HARUMOTO T. H. M. Y. K. I. "NEW STATIC VAR CONTROL USING FORCE COMMUTATED INVERTERS". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, VOL. PAS 100, No. 9, pp. 4216–4224, SEPTEMBER 1981.

Apéndice A

Ecuaciones diferenciales para incluir en el HAGP

A.1. Solución en estado estable

A continuación se presentan las ecuaciones para la solución del flujo de cargas de un sistema de potencia con la inclusión del STATCOM.

Para la solución de un sistema de ecuaciones no-lineales, tradicionalmente se emplea el método iterativo de Newton-Raphson, que a continuación se presenta en forma compacta:

$$x(i+1) = x(i) + J^{-1}(i)\{y - f[x(i)]\} \quad (\text{A.1})$$

donde el error viene dado por la relación:

$$\varepsilon = |x(i+1) - x(i)|$$

De acuerdo con el circuito equivalente mostrado en la figura A.1, se deducen las siguientes expresiones:

$$P_{stat} = V^2 G - kV_{dc} V G \cos(\delta - \alpha) + kV_{dc} V B \sin(\delta - \alpha) \quad (\text{A.2})$$

$$Q_{stat} = -V^2 B - kV_{dc} V G \sin(\delta - \alpha) + kV_{dc} V B \cos(\delta - \alpha) \quad (\text{A.3})$$

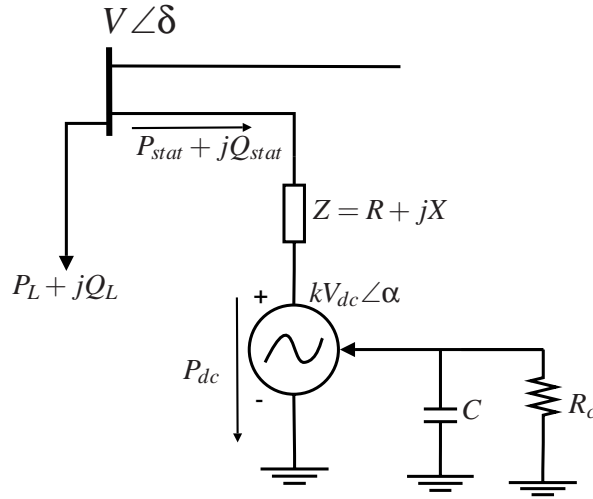


Figura A.1: Circuito equivalente del STATCOM

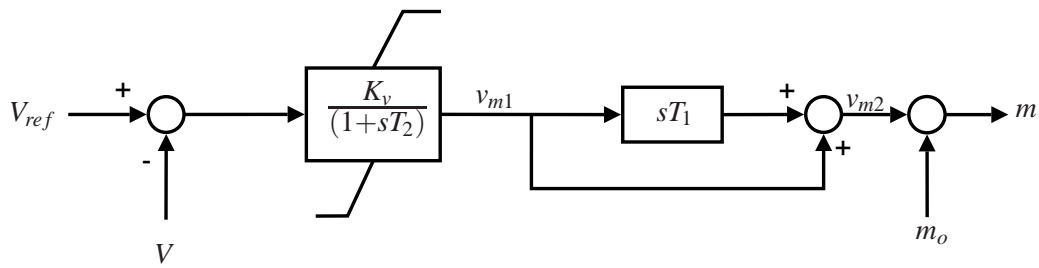


Figura A.2: Técnica de control PWM para control de tensión

De acuerdo a la figura A.2, se pueden deducir las ecuaciones que definen la dinámica del controlador:

$$\frac{\partial v_{m1}}{\partial t} = \frac{1}{T_2} [K_v(V_{ref} - V) - v_{m1}] \tag{A.4}$$

$$\frac{\partial v_{m1}}{\partial t} = \frac{1}{T_1} (v_{m1} - v_{m2}) \tag{A.5}$$

Ahora bien, como se dijo anteriormente que igualando a cero las ecuaciones dinámicas del controlador, se pueden encontrar las ecuaciones para estado estable de dicho controlador, por tanto se tiene que:

$$f_1 = -m + K_v(V_{ref} - V) + m_0 = 0 \tag{A.6}$$

Además, para que se cumpla el balance de potencia, se tiene que:

$$f_2 = P_{stat} - P_{perdidas} = P_{dc} \quad ; \quad P_{perdidas} = G_c V_{dc}^2 + RI^2 \quad (A.7)$$

El solución de flujos de potencias de Newton-Raphson se determina a continuación:

$$\begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & 0 & 0 \\ J_{21} & J_{22} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial f_1}{\partial V} & \frac{\partial f_1}{\partial k} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial f_2}{\partial k} & \frac{\partial f_2}{\partial \alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \\ \Delta k \\ \Delta \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta f_1 \\ \Delta f_2 \end{bmatrix} \quad (A.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_j}{\partial \delta_j} &= \frac{\partial P_j}{\partial \delta_j} + \frac{\partial P_{stat}}{\partial \delta_j} & \frac{\partial Q_j}{\partial \delta_j} &= \frac{\partial Q_j}{\partial \delta_j} + \frac{\partial Q_{stat}}{\partial \delta_j} & \frac{\partial P_{dc}}{\partial \delta_j} &= \frac{\partial P_{dc}}{\partial \delta_j} + \frac{\partial P_{dc}}{\partial \delta_j} \\ \frac{\partial P_j}{\partial V_j} &= \frac{\partial P_j}{\partial V_j} + \frac{\partial P_{stat}}{\partial V_j} & \frac{\partial Q_j}{\partial V_j} &= \frac{\partial Q_j}{\partial V_j} + \frac{\partial Q_{stat}}{\partial V_j} & \frac{\partial P_{dc}}{\partial V_j} &= \frac{\partial P_{dc}}{\partial V_j} + \frac{\partial P_{dc}}{\partial V_j} & \frac{\partial f_1}{\partial k} &= \frac{\partial f_1}{\partial k} + \frac{\partial f_1}{\partial k} \\ \frac{\partial P_j}{\partial k} &= \frac{\partial P_j}{\partial k} + \frac{\partial P_{stat}}{\partial k} & \frac{\partial Q_j}{\partial k} &= \frac{\partial Q_j}{\partial k} + \frac{\partial Q_{stat}}{\partial k} & \frac{\partial P_{dc}}{\partial k} &= \frac{\partial P_{dc}}{\partial k} + \frac{\partial P_{dc}}{\partial k} & \frac{\partial f_1}{\partial V_j} &= \frac{\partial f_1}{\partial V_j} + \frac{\partial f_1}{\partial V_j} \\ \frac{\partial P_j}{\partial \alpha} &= \frac{\partial P_j}{\partial \alpha} + \frac{\partial P_{stat}}{\partial \alpha} & \frac{\partial Q_j}{\partial \alpha} &= \frac{\partial Q_j}{\partial \alpha} + \frac{\partial Q_{stat}}{\partial \alpha} & \frac{\partial P_{dc}}{\partial \alpha} &= \frac{\partial P_{dc}}{\partial \alpha} + \frac{\partial P_{dc}}{\partial \alpha} \end{aligned}$$

Los elementos del jacobiano que se encuentran en cero, algunos son reemplazados por las derivadas anteriores.

Con la inclusión del STATCOM en un sistema de potencia el orden de la matriz jacobiana J , se aumenta en dos, tal y como se muestra en la ecuación (A.8).

A.2. Simulación dinámica

Un algoritmo de integración numérica de un conjunto de ecuaciones diferenciales calcula la evolución en el tiempo de las variables de estado en instantes de tiempo discreto ($x_0, \dots, x_k \dots$), separados un intervalo de tiempo Δt .

La herramienta software utilizada (HAGP), utiliza un método de integración implícito llamado regla trapezoidal [Kundur, 1994]. La regla trapezoidal calcula las variables de estado en el paso $n + 1$ por medio de la expresión:

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n + \frac{\Delta t}{2} [\dot{\mathbf{x}}_n + \dot{\mathbf{x}}_{n+1}] \quad (A.9)$$

Donde \mathbf{x}_n y \mathbf{v}_n son los valores del vector de estado y del vector de tensiones en $t = t_n$, y \mathbf{x}_{n+1} y \mathbf{v}_{n+1} son los valores del vector de estado y del vector de tensiones en $t = t_{n+1}$.

Para $t = t_{n+1}$ también se debe satisfacer la ecuación de red:

$$\mathbf{i}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{v}_{n+1}) = \mathbf{Y}\mathbf{v}_{n+1} \quad (\text{A.10})$$

El cálculo de las variables de estado en el paso $n + 1$ por medio de la ecuación (A.9) implica la resolución de un sistema de ecuaciones no lineales. Ello se puede apreciar al sustituir en la ecuación (A.9) $\dot{\mathbf{x}}$ por $\mathbf{f}(\mathbf{x})$:

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n + \frac{\Delta t}{2} [\mathbf{f}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{v}_{n+1}) + \mathbf{f}(\mathbf{x}_n, \mathbf{v}_n)] \quad (\text{A.11})$$

Si se definen los vectores \mathbf{F} y \mathbf{G} como:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{v}_{n+1}) = \mathbf{x}_{n+1} - \mathbf{x}_n - \frac{\Delta t}{2} [\mathbf{f}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{v}_{n+1}) + \mathbf{f}(\mathbf{x}_n, \mathbf{v}_n)] \quad (\text{A.12})$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{v}_{n+1}) = \mathbf{Y}\mathbf{v}_{n+1} - \mathbf{i}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{v}_{n+1}) \quad (\text{A.13})$$

los valores desconocidos \mathbf{x}_{n+1} y \mathbf{v}_{n+1} deben satisfacer la condición:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{v}_{n+1}) = \mathbf{0} \quad (\text{A.14})$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{v}_{n+1}) = \mathbf{0} \quad (\text{A.15})$$

Las ecuaciones (A.14) y (A.15) son ecuaciones algebraicas lineales. Aplicando el método de Newton para solucionar estas ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_{n+1}^{k+1} \\ \mathbf{v}_{n+1}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{n+1}^k \\ \mathbf{v}_{n+1}^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_{n+1}^k \\ \Delta \mathbf{v}_{n+1}^k \end{bmatrix} \quad (\text{A.16})$$

Los valores de $\Delta \mathbf{x}_{n+1}^k$ y $\Delta \mathbf{v}_{n+1}^k$ son hallados a partir de:

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{F}(\mathbf{x}_{n+1}^k, \mathbf{v}_{n+1}^k) \\ -\mathbf{G}(\mathbf{x}_{n+1}^k, \mathbf{v}_{n+1}^k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{v}} \\ \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{v}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_{n+1}^k \\ \Delta \mathbf{v}_{n+1}^k \end{bmatrix} \quad (\text{A.17})$$

Los valores del jacobiano \mathbf{J} en la ecuación anterior se hallan para \mathbf{x}_{n+1}^k y \mathbf{v}_{n+1}^k , y este tiene la siguiente estructura:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{v}} \\ \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{v}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_D & \mathbf{B}_D \\ \mathbf{C}_D & (\mathbf{Y} + \mathbf{Y}_D) \end{bmatrix} \quad (\text{A.18})$$

Las matrices \mathbf{A}_D , \mathbf{B}_D , \mathbf{C}_D y \mathbf{Y}_D dependen de los modelos de los elementos dinámicos del sistema y las cargas estáticas no lineales. Estas matrices tienen las siguientes composiciones:

$$\mathbf{A}_D = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{d1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_{d2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \mathbf{A}_{dm} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_D = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{d1} \\ \mathbf{B}_{d2} \\ \vdots \\ \mathbf{B}_{dm} \end{bmatrix} \quad \mathbf{Y}_D = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{d1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{Y}_{d2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \mathbf{Y}_{dN} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_D = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{d1} & \mathbf{C}_{d2} & \cdots & \mathbf{C}_{dm} \end{bmatrix} \quad (\text{A.19})$$

donde \mathbf{m} es el número de elementos dinámicos del sistema y \mathbf{N} el número de barras.

Las ecuaciones (A.14) y (A.15) pueden expresarse en términos de las matrices como:

$$\mathbf{A}_D \Delta \mathbf{x}_{n+1}^k + \mathbf{B}_D \Delta \mathbf{v}_{n+1}^k = -\mathbf{F}(\mathbf{x}_{n+1}^k, \mathbf{v}_{n+1}^k) \quad (\text{A.20})$$

$$\mathbf{C}_D \Delta \mathbf{x}_{n+1}^k + (\mathbf{Y} + \mathbf{Y}_D) \Delta \mathbf{v}_{n+1}^k = -\mathbf{G}(\mathbf{x}_{n+1}^k, \mathbf{v}_{n+1}^k) \quad (\text{A.21})$$

A partir de estas ecuaciones es posible hallar $\Delta \mathbf{x}_{n+1}^k$ y $\Delta \mathbf{v}_{n+1}^k$ a partir de:

$$\Delta \mathbf{x}_{n+1}^k = -\mathbf{A}_D^{-1} \left[\mathbf{F}_{n+1}^k + \mathbf{B}_D \Delta \mathbf{v}_{n+1}^k \right] \quad (\text{A.22})$$

$$(\mathbf{Y} + \mathbf{Y}_D - \mathbf{C}_D \mathbf{A}_D^{-1} \mathbf{B}_D) \Delta \mathbf{v}_{n+1}^k = -\mathbf{G}_{n+1}^k + \mathbf{C}_D \mathbf{A}_D^{-1} \mathbf{F}_{n+1}^k \quad (\text{A.23})$$

Finalmente teniendo estos valores se hallan \mathbf{x}_{n+1}^{k+1} y \mathbf{v}_{n+1}^{k+1} a partir de la ecuación A.16. Hay que tener en cuenta que el procedimiento anterior es válido cuando las funciones

F y **G** son diferenciables. Cuando ocurre una discontinuidad tal como una falla u operación de interruptores, solamente se resuelven las ecuaciones de red para corregir los valores del vector **v** en el instante en que ocurre la perturbación, el vector de estado **x** no se cambia. Luego se continúa con el proceso de integración.

A.3. Ecuaciones dinámicas del modelo del STATCOM

Las ecuaciones (A.4) y (A.5) son las ecuaciones dinámicas para el control del índice de modulación. Por consiguiente, las ecuaciones que definen este controlador son:

$$\frac{\partial v_{m1}}{\partial t} = \frac{1}{T_2} [K_v(V_{ref} - V) - v_{m1}] \quad (A.24)$$

$$v_{m2} = K_v \frac{T_1}{T_2} (V_{ref} - V) + \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) v_{m2} \quad (A.25)$$

Las ecuaciones que definen el controlador del ángulo α , se relatan a continuación:

$$v_{d1} = K_p(V_{dcref} - V_{dc}) \quad (A.26)$$

$$\frac{\partial v_{d2}}{\partial t} = K_I(V_{dcref} - V_{dc}) \quad (A.27)$$

La ecuación dinámica de STATCOM es:

$$\dot{V}_{dc} = \frac{VI}{CV_{dc}} \cos(\delta - \theta) - \frac{G_c}{C} V_{dc} - \frac{R}{C} \frac{I^2}{V_{dc}} \quad (A.28)$$

Las ecuaciones diferenciales (A.24), (A.27) y (A.28), representan las variables de estado que el modelo aporta para la solución del sistema .

Los vectores **F** se definen a continuación:

$$\mathbf{F}_1 = v_{dc1} - v_{dc2} - \frac{dt}{2C} \left\{ \left(\frac{P_{ac1}}{v_{dc1}} + \frac{P_{ac2}}{v_{dc2}} \right) - G_c (v_{dc1} + v_{dc2}) \cdots \right. \\ \left. \cdots - R \left(\frac{I_{11}^2}{v_{dc1}} - \frac{I_{12}^2}{v_{dc2}} \right) \right\} \quad (A.29)$$

$$\mathbf{F}_2 = v_{m11} - v_{m12} - \frac{dt}{2} \frac{1}{T_2} \{2K_v [V_{ref} - (V_1 + V_2)] + (v_{m11} - v_{m12})\} \quad (\text{A.30})$$

$$\mathbf{F}_3 = v_{d21} - v_{d22} - \frac{dtK_I}{2} [v_{dc1} + v_{dc2} - 2V_{dcref}] \quad (\text{A.31})$$

Las componentes real e imaginaria de la corriente inyectada por el STATCOM al sistema AC están dadas por:

$$I_R = GV_R - BV_I - kV_{DC} (G\cos(\alpha) - B\sin(\alpha)) \quad (\text{A.32})$$

$$I_I = BV_R + GV_I - kV_{DC} (B\cos(\alpha) + G\sin(\alpha)) \quad (\text{A.33})$$

Las componentes real e imaginaria de la corriente inyectada por el STATCOM al sistema se utilizan para hallar el vector \mathbf{G} , el cual se expresa como:

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{v}_{n+1}) = \mathbf{Y}\mathbf{v}_{n+1} - \mathbf{i}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{v}_{n+1})$$

Los elementos del jacobiano \mathbf{J} de la solución dinámica, los cuales corresponden a las matrices \mathbf{A}_D , \mathbf{B}_D , \mathbf{C}_D y \mathbf{Y}_D , se encuentran calculando las ecuaciones diferenciales de los vectores \mathbf{F} y \mathbf{G} , pertinentes para cada matriz, tal y como se explicó con la ecuación (A.18).

Apéndice B

Guía de usuario del HAGP

B.1. Introducción

Este apéndice contiene una guía de usuario del paquete HAGP (*Herramienta Software para el Análisis de Estabilidad de Gran Perturbación de Sistemas Eléctricos de Potencia*). HAGP es un conjunto de funciones MATLAB para el análisis de estabilidad de ángulo y de tensión de sistemas eléctricos de potencia. Este software corresponde a un gran trabajo realizado por el Ing. Carlos Rodríguez S [Rodríguez, 2003] bajo la dirección del Dr. Hermann Vargas, donde en primera instancia se analizaba la estabilidad de ángulo de gran perturbación de los sistemas de potencia eléctricos, luego con la ayuda de la ingeniera Lizette Mejía [Mejía, 2005], se incluyeron los modelos necesarios para los estudios de estabilidad de tensión de los sistema eléctricos de potencia.

Esta guía contiene exclusivamente los parámetros de los datos de entrada del STAT-COM. Para obtener información de los generadores, su sistema de excitación y control, además de otras instrucciones de simulación y datos del sistema, consultar [Rodríguez, 2003].

B.2. Instalación y Ejecución

HAGP puede ser instalado en PC con versiones de MATLAB 5.3 o superiores, el proceso de instalación comprende los siguientes pasos:

1. Descomprimir la carpeta de archivos HAGP 2.3.0 utilizando WinZip.

2. Copiar la carpeta con el conjunto de funciones HAGP en un directorio determinado.
3. Adicionar al *path* de MATLAB la carpeta HAGP con todas las subcarpetas.

Para ejecutar HAGP, se escribe (en la ventana de comandos de MATLAB) la siguiente instrucción:

```
>>hagp('nombre')
```

Donde *nombre* corresponde a un archivo de datos (sin la extensión .m).

Para nuestro caso, escribir >>hagp('facts').

B.3. Datos de entrada

La entrada de datos se realiza por medio de archivos de MATLAB que contienen datos de los elementos dinámicos como se muestra a continuación:

- **statcom** = matriz de datos del STATCOM. Cada fila de la matriz corresponde a un conjunto de datos de un STATCOM determinado, cuyos parámetros corresponden a cada columna.
1. Número de barra a la cual se conecta el STATCOM.
 2. Status inicial del STATCOM. STATCOM en línea = 1, STATCOM desconectado = 0.
 3. R = resistencia equivalente del transformador de acople, pu.
 4. X = reactancia equivalente del transformador de acople, pu.
 5. R_C = resistencia equivalente en paralelo con el condensador, para contabilizar pérdidas de las redes snubber del inversor, pu.
 6. C = Valor de capacitancia del lado DC del inversor, pu.
 7. V_{refac} = Tensión de referencia AC, pu.

8. V_{dref} = Tensión de referencia en el lado DC del STATCOM, pu.
9. K_v = ganancia del regulador de tensión, pu.
10. T_1 = constante de tiempo del controlador del índice de modulación, s.
11. T_2 = constante de tiempo del controlador del índice de modulación, s.
12. K_p = ganancia del controlador proporcional para el control del ángulo α .
13. K_I = ganancia del controlador integral para el control del ángulo α .
14. k_0 = valor inicial de la constante k , asociada al índice de modulación, m .
15. α_0 = valor inicial del ángulo de la tensión a la salida del inversor

Notas:

- Todas las constantes de tiempo deben ser diferentes de cero.
- Para una mejor comprensión del archivo de entrada, ver el archivo de entrada correspondiente al caso ejemplo 'dc1a.m', o mejor escribir el comando >>help dc1a.
- Los datos de entrada en pu de los modelos implementados deben estar en la base del sistema.

Apéndice C

Modelos y librerías en ATP

A continuación se detallarán los diferentes modelos utilizados en las simulaciones realizadas en ATP a través de su interfaz gráfica ATPDRAW.

C.1. Caso de simulación 1

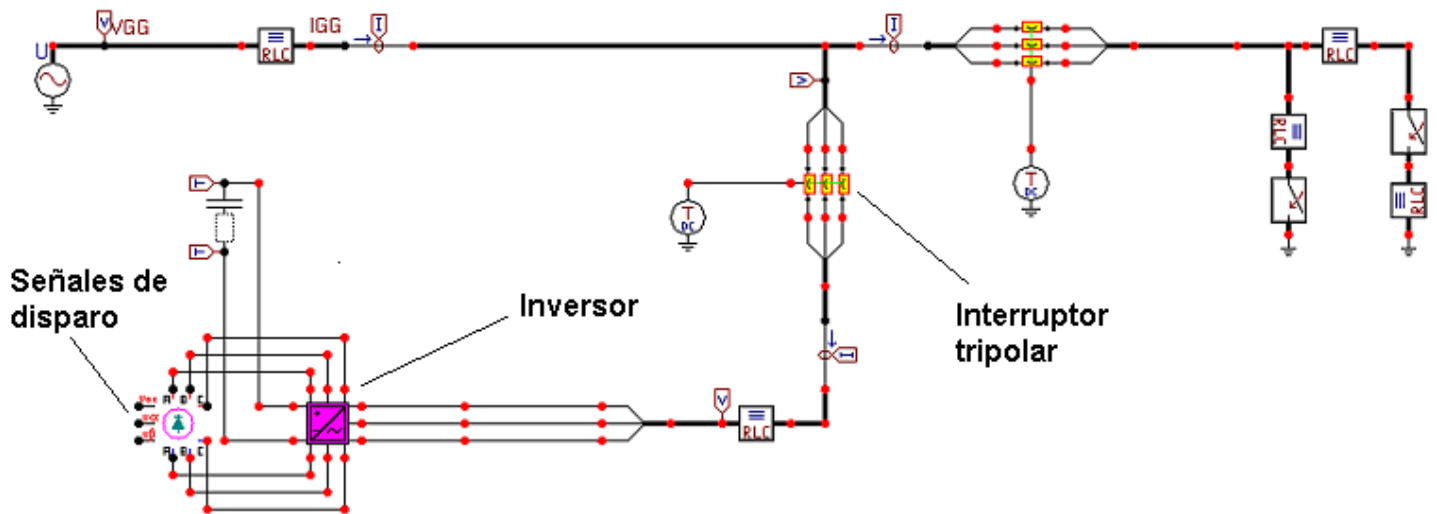



Figura C.1: Caso de simulación 1

	<p>inv_vs.mod</p>	<p>Modelo que recibe la señal de referencia en coordenadas $\alpha - \beta$ y la magnitud de la tensión del condensador. Genera los tiempos de disparo de la técnica de modulación SVPWM .</p>
---	-------------------	---

MODEL INV_VS

```

comment *****
*
* ESTE PROGRAMA PERMITE REALIZAR EL CONTROL DE UN INVERSOR *
* POR MEDIO DE LA TÉCNICA DE MODULACIÓN DEL VECTOR ESPACIAL SVPWM *
***** endcomment

-- DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES DE ENTRADA

INPUT  VDC    -- TENSIÓN EN EL CAPACITOR DEL INVERSOR (SE RECOMIENDA EMPLEAR UN INTEGRADOR)
        INVALF -- COMPONENTE EN EL EJE ALFA DEL VECTOR ESPACIAL DE TENSIÓN
        INVBET -- COMPONENTE EN EL EJE BETA DEL VECTOR ESPACIAL DE TENSIÓN

-- DEFINICION DE LOS DATOS QUE SON INTRODUCIDOS POR EL USUARIO
-- (AL HACER DOBLE CLICK SOBRE EL MODELO EN ATPDRAW)

DATA   FREC    -- FRECUENCIA DE LA SEÑAL DE SALIDA EN HERTZ
        POSVS   -- NÚMERO DE POSICIONES DEL VECTOR ESPACIAL
                -- EMPLEADO PARA DETERMINAR EL NÚMERO DE PULSOS DEL INVERSOR, V
                -- ALORES (MÚLTIPLOS DE 6)

-- DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES A EMPLEAR POR EL MODELO (SE INCLUYEN LAS SALIDAS)

VAR    INVTPA  -- SEÑAL DE CONTROL CONECTADA AL TERMINAL POSITIVO DEL INVERSOR DE LA FASE A
        INVNTA  -- SEÑAL DE CONTROL CONECTADA AL TERMINAL NEGATIVO DEL INVERSOR DE LA FASE A
        INVTPB  -- SEÑAL DE CONTROL CONECTADA AL TERMINAL POSITIVO DEL INVERSOR DE LA FASE B
        INVNTB  -- SEÑAL DE CONTROL CONECTADA AL TERMINAL NEGATIVO DEL INVERSOR DE LA FASE B
        INVTPC  -- SEÑAL DE CONTROL CONECTADA AL TERMINAL POSITIVO DEL INVERSOR DE LA FASE C
        INVNTC  -- SEÑAL DE CONTROL CONECTADA AL TERMINAL NEGATIVO DEL INVERSOR DE LA FASE C

        FCMAG   -- FACTOR DE CORRECCIÓN DE LA MAGNITUD (INVERSIÓN DE TRANSFORMACIÓN DEL VECTOR ESPACIAL) ((3^0.5)/2)
        FCFASE  -- FACTOR DE CORRECCIÓN DE LA FASE (INVERSIÓN DE TRANSFORMACIÓN DEL VECTOR ESPACIAL) 30°

        TEMP    -- VARIABLE EMPLEADA PARA DETERCAR EL FIN DE LOS TIEMPOS (TPOCO) POR MEDIO DE LA
                -- DIFERENCIA CON EL TIEMPO ACTUAL t
        POBVS   -- POSICIÓN BÁSICA DEL VECTOR ESPACIAL VALORES DE 1 A 6
        POIVS   -- POSICIÓN INTERMEDIA DEL VECTOR ESPACIAL, ACORDE A LOS CINCO VALORES DE TEMORIZACIÓN
                -- TPOCO QUE INDICA CUANTO TIEMPO DEBE DURARA EN LAS POSICIONES BÁSICAS
        J       -- VARIABLE EMPLEADA PARA CICLOS FOR

-- VARIABLES QUE SON EMPLEADAS PARA EL USO DEL PROGRAMA TIEMPO

-- ENTRADAS
ANGVS   -- DEL VECTOR ESPACIAL PARA GENERAR LAS TENSIONES DEL SISTEMA TRIFÁSICO

```

```

MAGVS  -- MAGNITUD DEL VECTOR ESPACIAL PARA GENERAR LAS TENSIONES DEL SISTEMA TRIFÁSICO
VDCINV -- TENSIÓN EN EL CAPACITOR DEL INVERSOR
TTVS   -- TIEMPO TOTAL EN QUE DEBE UBICARSE EL VECTOR ESPACIAL EN UNA POSICIÓN (T1+T2+T0=1/(FRECUENCIA*POSVS))
MAGVS1
-- SALIDAS
TPOCO[1..5] -- TIEMPO DE LAS POSICIONES COMPUESTAS (DOS POSICIONES A TRAVES DEL TIEMPO PARA
              -- OBTENER UNA EQUIVALENTE) DEL VECTOR ESPACIAL CALCULADA POR MEDIO DEL SUBPROGRAMA TIEMPO

OUTPUT INVTPA -- SEÑAL DE CONTROL CONECTADA AL TERMINAL POSITIVO DEL INVERSOR DE LA FASE A
INVTNA  -- SEÑAL DE CONTROL CONECTADA AL TERMINAL NEGATIVO DEL INVERSOR DE LA FASE A
INVTPB  -- SEÑAL DE CONTROL CONECTADA AL TERMINAL POSITIVO DEL INVERSOR DE LA FASE B
INVTNB  -- SEÑAL DE CONTROL CONECTADA AL TERMINAL NEGATIVO DEL INVERSOR DE LA FASE B
INVTPC  -- SEÑAL DE CONTROL CONECTADA AL TERMINAL POSITIVO DEL INVERSOR DE LA FASE C
INVTNC  -- SEÑAL DE CONTROL CONECTADA AL TERMINAL NEGATIVO DEL INVERSOR DE LA FASE C

-----
-- MODELO EMPLEADO PARA CALCULAR LOS TIMEPOS DEL VECTOR ESPACIAL--
-----
MODEL TIEMPO
  INPUT ANGVS  -- ANGULO DEL VECTOR ESPACIAL PARA GENERAR LAS TENSIONES DEL SISTEMA TRIFÁSICO
             MAGVS  -- MAGNITUD DEL VECTOR ESPACIAL PARA GENERAR LAS TENSIONES DEL SISTEMA TRIFÁSICO
             VDCINV -- TENSIÓN EN EL CAPACITOR DEL INVERSOR
             TTVS   -- TIEMPO TOTAL EN QUE DEBE UBICARSE EL VECTOR ESPACIAL EN UNA POSICIÓN (T1+T2+T0=1/(FRECUENCIA*POSVS))

  OUTPUT TPOCO[1..5] -- TIEMPO DE LAS POSICIONES COMPUESTAS (DOS POSICIONES A TRAVES DEL TIEMPO PARA
                    -- OBTENER UNA EQUIVALENTE) DEL VECTOR ESPACIAL CALCULADA POR MEDIO DEL SUBPROGRAMA TIEMPO

  VAR V1          -- PROYECCIÓN DEL VECTOR ESPACIAL SOBRE LA POSICIÓN BÁSICA 1 (0 GRADOS)
V2              -- PROYECCIÓN DEL VECTOR ESPACIAL SOBRE LA POSICIÓN BÁSICA 2 (60 GRADOS)
             T1    -- TIEMPO EN QUE SE POSICIONA EL VECTOR ESPACIAL EN LA POSICIÓN BÁSICA 1
             T2    -- TIEMPO EN QUE SE POSICIONA EL VECTOR ESPACIAL EN LA POSICIÓN BÁSICA 2
             T0    -- TIEMPO EN QUE SE POSICIONA EL VECTOR ESPACIAL EN LA POSICIÓN BÁSICA 0
             TPOCO[1..5] -- VARIABLE DE SALIDA
             ANG1  -- ÁNGULO COMPRENDIDO ENTRE 0° Y 60°
             K

EXEC
  ANG1:=ANGVS  -- SE AJUSTA EL ÁNGULO A VALORES POSITIVOS (ENTRE 0° Y 360°)

  -- SUBROUTINA EMPLEADA PARA MODIFICAR EL ÁNGULO A UN VALOR ENTRE 0 Y 60°
  FOR K:=6 TO 1 BY -1 DO
    IF ANG1>=(60*PI*K/180) THEN
      ANG1:=ANG1-(60*PI*K/180)
    ENDIF
  ENDFOR

  V1:=2*MAGVS*SIN(60*PI/180-ANG1)/(3**0.5)
  V2:=2*MAGVS*SIN(ANG1)/(3**0.5)

  T1:=V1/VDCINV*TTVS
  T2:=V2/VDCINV*TTVS

```

```

T0:=TTVS-T1-T2
TPOCO[1]:=T1/2
TPOCO[5]:=T1/2
TPOCO[2]:=T2/2
TPOCO[4]:=T2/2
TPOCO[3]:=T0
ENDEXEC
ENDMODEL

-- A CONTINUACIÓN SE MUESTRAN LOS PULSOS (CONEXIÓN A LOS TERMINALES POSITIVO 1 O NEGATIVO 0
-- DE LAS FASES DE ACUERDO A LA TÉCNICA DE MODULACIÓN SVPWM POR MEDIO DE UNA TABLA DE VALORES
-----
--FUNCIÓN PARA DETERMINAR LOS DISPAROS DE LOS INVERSORES FASEA
-----
FUNCTION DISPAROA POINTLIST (1,1), (2,1), (3,1), (4,1), (5,1),
                             (6,1), (7,0), (8,0), (9,0), (10,1),
                             (11,0), (12,0), (13,1), (14,0), (15,0),
                             (16,0), (17,0), (18,0), (19,0), (20,0),
                             (21,0), (22,1), (23,1), (24,1), (25,0),
                             (26,1), (27,1), (28,0), (29,1), (30,1)
-----
--FUNCIÓN PARA DETERMINAR LOS DISPAROS DE LOS INVERSORES FASE B
-----
FUNCTION DISPAROB POINTLIST (1,0), (2,1), (3,1), (4,1), (5,0),
                             (6,1), (7,1), (8,0), (9,1), (10,1),
                             (11,1), (12,1), (13,1), (14,1), (15,1),
                             (16,1), (17,0), (18,0), (19,0), (20,1),
                             (21,0), (22,0), (23,1), (24,0), (25,0),
                             (26,0), (27,0), (28,0), (29,0), (30,0)
-----
--FUNCIÓN PARA DETERMINAR LOS DISPAROS DE LOS INVERSORES FASE C
-----
FUNCTION DISPAROC POINTLIST (1,0), (2,0), (3,1), (4,0), (5,0),
                             (6,0), (7,0), (8,0), (9,0), (10,0),
                             (11,0), (12,1), (13,1), (14,1), (15,0),
                             (16,1), (17,1), (18,0), (19,1), (20,1),
                             (21,1), (22,1), (23,1), (24,1), (25,1),
                             (26,1), (27,0), (28,0), (29,0), (30,1)

-- EN PRIMER LUGAR SE INICIALIZAN LAS VARIABLES DEL MODELO

INIT

TTVS:=1/(FREC*POSVS)
TEMP:=0
TPOCO[1..5]:=0
FCMAG:=(3**0.5)/2
FCFASE:=-30*PI/180
POBVS:=1

```

```
POIVS:=5
INVTPA:=1
INVTNA:=0
INVTPB:=0
INVTNB:=1
INVTPC:=1
INVTNC:=0
ENDINIT

EXEC

IF (((t-TEMP)>=TPOCO[POIVS]) AND (t>=0.003))
THEN

-- CÁLCULO DEL ÁNGULO DEL VECTOR ESPACIAL (valores entre 0° y 360°)
ANGVS:=ATAN(INVBET/(INVALF))

IF ((INVALF>=0) AND (INVBET<=0))
THEN
  ANGVS:=ANGVS+2*PI
ELSE
  IF INVALF<=0 THEN
    ANGVS:=ANGVS+PI
  ENDIF
ENDIF

--LUEGO SE DETERMINA LA MAGNITUD DEL VECTOR ESPACIAL
MAGVS:=((INVALF**2)+(INVBET**2))**0.5

-- LUEGO SE EMPLEAN LOS FACTORES DE CORRECCIÓN PARA LLAMAR AL PROGRAMA DEL
-- CÁLCULO DE LOS TIEMPOS

MAGVS:=((3*0.5)/2)*MAGVS
ANGVS:=ANGVS-PI/6

IF (ANGVS>2*PI)
THEN
  ANGVS:=ANGVS-2*PI
ENDIF

IF (ANGVS<(0))
THEN
  ANGVS:=ANGVS+2*PI
ENDIF
```

```

-- SE DETECTA EL FIN DE CADA TEMPORIZACIÓN Y SE PROCEDE A REALIZAR LA
-- CONMUTACIÓN AL SIGUIENTE ESTADO

IF ((POIVS=5) OR ((TPOCO[POIVS+1]<=Timestep) AND (POIVS=4)))
THEN
  POIVS:=1
  -- SE DETECTA LA POSICIÓN BÁSICA EN LA QUE SE ENCUENTRA EL VECTOR ESPACIAL 1 - 6
  FOR J:=1 TO 6 BY 1
  DO
    IF (((J-1)*60*PI/180<ANGVS) AND (ANGVS<=(J*60*PI)))
    THEN
      POBVS:=J

      ENDIF
    ENDFOR

    VDCINV:=VDC
    -----
    -- Llamado de la rutina para cálculo normal de tiempos
    -----
    USE TIEMPO AS TIEMPO ITERATE
    INPUT VDCINV:=VDCINV
    MAGVS:=MAGVS
    ANGVS:=ANGVS
    TTVS:=TTVS

    OUTPUT TPOCO[1..5]:=TPOCO[1..5]
  ENDUSE
  -----

ELSE
  -- SI UN TIEMPO DE CONMUTACIÓN ES INFERIOR AL PASO DE SIMULACIÓN SE
  -- ELIMINA LA CONMUTACIÓN SE SE PASA A LA SIGUIENTE POSICIÓN INTERMEDIA

  IF ((TPOCO[POIVS+1]<=Timestep) AND (POIVS<=3))
  THEN
    POIVS:=POIVS+2
  ELSE
    POIVS:=POIVS+1
  ENDIF

ENDIF

ENDIF
TEMP:=t
INVTPA:=DISPAROA(5*(POBVS-1)+POIVS)
INVTNA:=1-DISPAROA(5*(POBVS-1)+POIVS)
INVTPB:=DISPAROB(5*(POBVS-1)+POIVS)
INVTNB:=1-DISPAROB(5*(POBVS-1)+POIVS)
INVTPC:=DISPAROC(5*(POBVS-1)+POIVS)

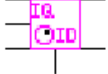
```

```

        INVTNC:=1-DISPAROC(5*(POBVS-1)+POIVS)
    ENDIF
-- write(' VCAPACITOR          :', VDC)
    ENDEXEC

ENDMODEL

```

	iqcal.mod	Este modelo hace la transformación de Park de tensiones o corrientes.
---	-----------	---

```
MODEL IQCAL
```

```

-- EN ESTA SECCIÓN SE DEFINEN LAS ENTRADAS DEL MODELO,DEFINIDAS EN EL GRÁFICO *.MOD

INPUT IFASEA      -- CORRIENTE DE LA FASE A
IFASEB      -- CORRIENTE DE LA FASE B
IFASEC      -- CORRIENTE DE LA FASE C
TETA

-- EN ESTA SECCIÓN SE DEFINAN LAS VARIABLES DEL MODELO
-- QUE CORRESPONDEN EN NUESTRO CASO A LAS SALIDAS Y LAS TENSIONES DE LÍNEA

VAR  CORD
     CORQ

-- EN ESTA SECCIÓN SE DEFINEN LAS SALIDAS DEL MODELO DEFINIDAS EN EL GRÁFICO *.MOD

OUTPUT CORD
CORQ

-- EN PRIMER LUGAR SE INICIALIZAN LAS SALIDAS, PARA QUE EL MODELO NO PRESENTE ERRORES
-- DURANTE LA SIMULACIÓN PORQUE NO SE CONOCEN LOS VALORES DE LA VARIABLE

INIT
    CORQ:=0
    CORD:=0

ENDINIT

EXEC

CORD:=(2/3)*(IFASEA*cos(TETA)+IFASEB*cos(TETA-2*PI/3)
             +IFASEC*cos(TETA+2*PI/3))

```

```

CORQ:=(2/3)*(IFASEA*sin(TETA)+IFASEB*sin(TETA-2*PI/3)
+IFASEC*sin(TETA+2*PI/3))

--WRITE(' ANGULO', TETA*180/pi)
--WRITE(' IQ', CORQ)

--WRITE(' IFAA', IFASEA)
ENDEXEC

ENDMODEL
    
```

C.2. Caso de simulación 2

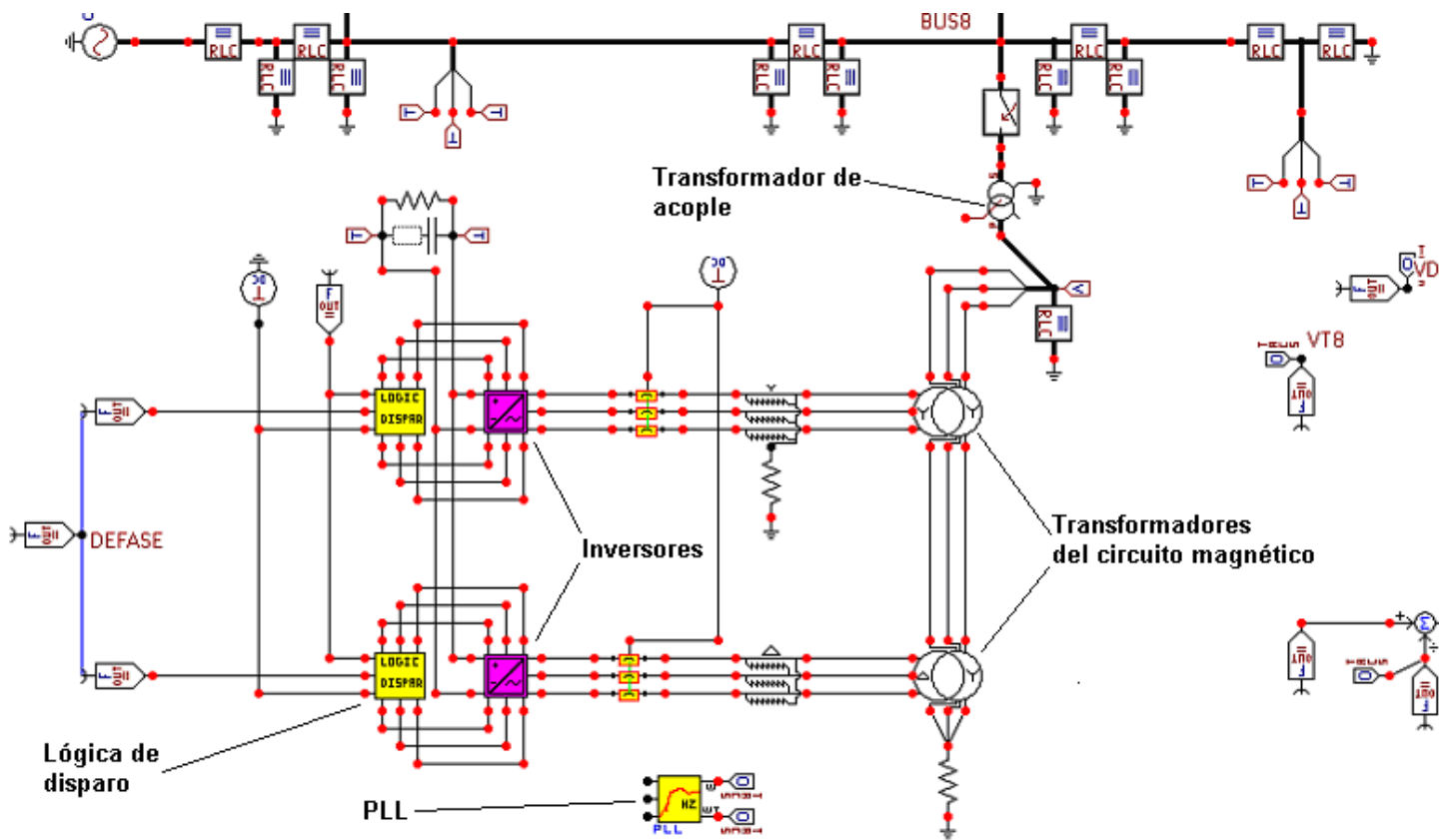



Figura C.2: Caso de simulación 2

	<p>invcav.mod</p>	<p>Inversor trifásico con interruptores ideales controlados por TACS. Por cada interruptor, existe un circuito snubber tipo RC con diodo antiparalelo</p>
---	-------------------	---

```


BEGIN NEW DATA CASE --NOSORT--
DATA BASE MODULE
$ERASE
ARG,FASEXA,FASEXB,FASEXC,VDCPOS,VDCNEG
ARG,GATE11,GATE12,GATE13,GATE14,GATE15,GATE16
ARG,RSNUBB,CSNUBB,VDIODE
NUM,RSNUBB,CSNUBB,VDIODE
DUM,DWFS11,DWFS12,DWFS13,DWFS14,DWFS15,DWFS16
DUM,SWTX11,SWTX13,SWTX15,SWTX12,SWTX14,SWTX16
DUM,SWPS11,SWPS13,SWPS15,SNUB11,SNUB13,SNUB15
DUM,SNUB12,SNUB14,SNUB16,DIOD11,DIOD12,DIOD13
DUM,DIOD14,DIOD15,DIOD16,SWPS12,SWPS14,SWPS16
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
DWFS14FASEXA .001 0
DWFS11SNUB11 CSNUBB 0
DWFS13SNUB13 CSNUBB 0
DWFS15SNUB15 CSNUBB 0
SWPS14SNUB14 CSNUBB 0
SWPS12SNUB12 CSNUBB 0
SWPS16SNUB16 CSNUBB 0
SWPS11SNUB11 RSNUBB 0
SWPS13SNUB13 RSNUBB 0
SWPS15SNUB15 RSNUBB 0
DWFS14SNUB14 RSNUBB 0
DWFS12SNUB12 RSNUBB 0
DWFS16SNUB16 RSNUBB 0
FASEXADWFS11 .001 0
FASEXBDWFS13 .001 0
FASEXCDWFS15 .001 0
DWFS12DIOD12 .001 0
DWFS14DIOD14 .001 0
DWFS16DIOD16 .001 0
SWTX11SWPS11 .001 0
SWTX13SWPS13 .001 0
SWTX15SWPS15 .001 0
SWPS12SWTX12 .001 0
SWPS14SWTX14 .001 0
SWPS16SWTX16 .001 0
VDCPOSSWPS11 .001 0
VDCPOSSWPS13 .001 0
VDCPOSSWPS15 .001 0
VDCNEGSWPS12 .001 0
VDCNEGSWPS14 .001 0
VDCNEGSWPS16 .001 0

```

```

DWFS11DIOD11      .001      0
DWFS13DIOD13      .001      0
DWFS15DIOD15      .001      0
FASEXBDWFS16      .001      0
FASEXCDWFS12      .001      0
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
13DWFS11SWTX11      GATE11  0
13DWFS13SWTX13      GATE13  0
13DWFS15SWTX15      GATE15  0
13SWTX16DWFS16      GATE16  0
13SWTX12DWFS12      GATE12  0
13SWTX14DWFS14      GATE14  0
11DIOD11SWPS11     VDIODE  0
11DIOD13SWPS13     VDIODE  0
11DIOD15SWPS15     VDIODE  0
11SWPS14DIOD14     VDIODE  0
11SWPS16DIOD16     VDIODE  0
11SWPS12DIOD12     VDIODE  0
/SOURCE
BEGIN NEW DATA CASE
C
$PUNCH,INCAV.LIB
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

	<p>logic1.atp</p>	<p>Lógica de disparo de los dispositivos de conmutación. Recibe la señal de sincronismo, un desfase y monta los disparos de los interruptores del inversor.</p>
---	-------------------	---

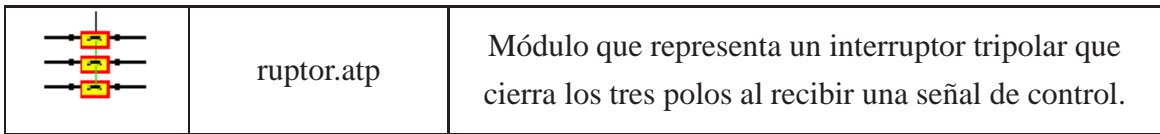
```

BEGIN NEW DATA CASE --NOSORT--
DATA BASE MODULE
$ERASE
ARG,WTXXXX,DELTAX,STTSWT,GATEUA,GATEUB,GATEUC,GATEDA,GATEDB,GATEDC
ARG,VALORX
NUM,VALORX
DUM,VAGATE,VBGATE,VCGATE,GATE11,GATE13,GATE15
/TACS
98VAGATE =SIN(WTXXXX-PI/2+DELTAX)*STTSWT
98VBGATE =SIN(WTXXXX-PI/2+DELTAX-2*PI/3)*STTSWT
98VCGATE =SIN(WTXXXX-PI/2+DELTAX+2*PI/3)*STTSWT
98GATE1160+ZERO +ZERO +UNITY      VAGATEZERO
98GATE1360+ZERO +ZERO +UNITY      VBGATEZERO
98GATE1560+ZERO +ZERO +UNITY      VCGATEZERO
98GATEUA =GATE11*STTSWT
98GATEDA =( .NOT. (GATE11))*STTSWT
98GATEUB =GATE13*STTSWT
98GATEDB =( .NOT. (GATE13))*STTSWT
98GATEUC =GATE15*STTSWT

```


```

98GATEDC =( .NOT. (GATE15))*STTSWT
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
/SOURCE
BEGIN NEW DATA CASE
C
$PUNCH,LOGIC1.LIB
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
    
```




```

BEGIN NEW DATA CASE --NOSORT--
DATA BASE MODULE
$ERASE
ARG,VA0000,VB0000,VC0000,VA0003,VB0003,VC0003,CLOSFA
DUM,VA0001,VB0001,VC0001,VA0002,VB0002,VC0002
/BRANCH
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
VA0000VA0001      .001      0
VA0001      1.E6      0
VB0000VB0001      .001      0
VB0001      1.E6      0
VC0000VC0001      .001      0
VC0001      1.E6      0
VA0002      1.E6      0
VB0002      1.E6      0
VC0002      1.E6      0
VA0002VA0003      .001      0
VB0002VB0003      .001      0
VC0002VC0003      .001      0
VC0001VC0002      1.E9      0
VB0001VB0002      1.E9      0
VA0001VA0002      1.E9      0
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
13VA0001VA0002      CLOSFA 0
13VB0001VB0002      CLOSFA 0
13VC0001VC0002      CLOSFA 0
BEGIN NEW DATA CASE
C
$PUNCH
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
    
```

	<p>pll.atp</p>	<p>Módulo que detecta la frecuencia de las tensiones de fase y genera la señal de sincronismo.</p>
---	----------------	--

```

BEGIN NEW DATA CASE --NOSORT--
DATA BASE MODULE
C Diode_C. Diode circuit with series RD and LD, and snubber RS and CS.
C Diode points from AN to CA. Series RD and LD between CA and TP
$ERASE
ARG,VAXXXX,VBXXXX,VCXXXX,WXXXX,WTTETA
ARG,VBASEX,GPIPPP,GPIPPPI
NUM,VBASEX,GPIPPP,GPIPPPI
DUM,P10000,P20000,IAREFX,ICREFX,P00000,RESETX
DUM,PPI000,OUTPPP,OUTPPI,COND TN,C1XXXX,ZOH000
/TACS
98COND TN =2*pi
1OUTPPI +PPI000 1.
1.
1.
0ZOH000 +RESETX 1.
98WTTETA58 +WXXXX 1. 1.ZOH000C1XXXX
98P10000 =(VAXXXX-VBXXXX)*IAREFX/((VBASEX)*SQRT(2/3))
98P20000 =(VCXXXX-VBXXXX)*ICREFX/((VBASEX)*SQRT(2/3))
98OUTPPP =GPIPPP*P00000
98P00000 =P10000+P20000
98PPI000 =GPIPPPI*P00000
98IAREFX =SIN(WTTETA)
98ICREFX =SIN(WTTETA+2*PI/3)
98C1XXXX =0
98RESETX60+UNITY +ZERO +ZERO WTTETA COND TN
0WXXXX +OUTPPI +OUTPPP 1.
C 1 2 3 4 5 6 7 8
C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
/SOURCE
BEGIN NEW DATA CASE
C
$PUNCH,PLLCV1.LIB
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
    
```


	<p>trany.atp</p>	<p>Transformador trifásico compuesto por tres transformadores monofásicos, con una configuración estrella-estrella. Por el lado secundario se encuentra abierto para permitir conexiones.</p>
---	------------------	---

```

BEGIN NEW DATA CASE --NOSORT--
DATA BASE MODULE
C Diode_C. Diode circuit with series RD and LD, and snubber RS and CS.
C Diode points from AN to CA. Series RD and LD between CA and TP
$ERASE
ARG,VA0001,VB0001,VC0001,VA0002,VB0002,VC0002,VASCRO,VBSCRO,VCSCRO
ARG,TNPRIM,TNSCND,LLPRIM,LLSCND,RRPRIM,RRSCND,RSTMAG
NUM,TNPRIM,TNSCND,LLPRIM,LLSCND,RRPRIM,RRSCND,RSTMAG
DUM,TX0001,TX0002,TX0003,GNDPRM,GNSCD
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
TRANSFORMER TX0001RSTMAG 0
9999
1VA0001GNDPRM RRPRIMLLPRIMTNPRIM
2VA0002VASCRO RRSCNDLLSCNDTNSCND
TRANSFORMER TX0002RSTMAG 0
9999
1VB0001GNDPRM RRPRIMLLPRIMTNPRIM
2VB0002VBSCRO RRSCNDLLSCNDTNSCND
TRANSFORMER TX0003RSTMAG 0
9999
1VC0001GNDPRM RRPRIMLLPRIMTNPRIM
2VC0002VCSCRO RRSCNDLLSCNDTNSCND
GNSCD 1.E6 0
GNDPRM 1.E6 0
TX0001 1.E6 0
TX0002 1.E6 0
TX0003 1.E6 0
VA0002TX0001 1.E6 0
VB0002TX0002 1.E6 0
VC0002TX0003 1.E6 0
TX0001VA0001 1.E6 0
TX0002VB0001 1.E6 0
TX0003VC0001 1.E6 0
GNDPRMVA0001 1.E6 0
GNDPRMVB0001 1.E6 0
GNSCDVC0002 1.E6 0
GNSCDVA0002 1.E6 0
GNSCDVB0002 1.E6 0
GNDPRMVC0001 1.E6 0
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
/INITIAL
/OUTPUT
BEGIN NEW DATA CASE
C
$PUNCH,TRANYY.LIB
BEGIN NEW DATA CASE

```

BLANK

	<p>tranyy.atp</p>	<p>Transformador trifásico compuesto por tres transformadores monofásicos, con una configuración delta-estrella. Por el lado secundario se encuentra abierto para permitir conexiones.</p>
---	-------------------	--

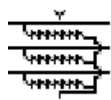
```

BEGIN NEW DATA CASE --NOSORT--
DATA BASE MODULE
C Diode_C. Diode circuit with series RD and LD, and snubber RS and CS.
C Diode points from AN to CA. Series RD and LD between CA and TP
$ERASE
ARG,VA0001,VB0001,VC0001,VA0002,VB0002,VC0002,VASCRO,VBSCRO,VCSCRO
ARG,TNPRIM,TNSCND,LLPRIM,LLSCND,RRPRIM,RRSCND,RSTMAG
NUM,TNPRIM,TNSCND,LLPRIM,LLSCND,RRPRIM,RRSCND,RSTMAG
DUM,TX0001,TX0002,TX0003,GNDPRM
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
TRANSFORMER TX0001RSTMAG 0
9999
1VA0001VB0001 RRPRIMLLPRIMTNPRIM
2VA0002VASCRO RRSCNDLLSCNDTNSCND
TRANSFORMER TX0002RSTMAG 0
9999
1VB0001VC0001 RRPRIMLLPRIMTNPRIM
2VB0002VBSCRO RRSCNDLLSCNDTNSCND
TRANSFORMER TX0003RSTMAG 0
9999
1VC0001VA0001 RRPRIMLLPRIMTNPRIM
2VC0002VCSCRO RRSCNDLLSCNDTNSCND
VA0002TX0001 1.E6 0
VB0002TX0002 1.E6 0
VC0002TX0003 1.E6 0
TX0001VA0001 1.E6 0
TX0002VB0001 1.E6 0
TX0003VC0001 1.E6 0
VB0001VA0001 1.E6 0
VC0003VB0001 1.E6 0
VA0001VC0001 1.E6 0
GNDPRMVA0002 1.E6 0
GNDPRMVB0002 1.E6 0
GNDPRMVC0002 1.E6 0
TX0001 1.E6 0
TX0002 1.E6 0
TX0003 1.E6 0
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >

```

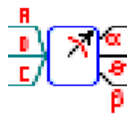
```

/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
/INITIAL
/OUTPUT
BEGIN NEW DATA CASE
C
$PUNCH,TRANDY.LIB
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
    
```

	<p>gndstr.atp</p>	<p>Este módulo representa un snubber numérico cuya función es estabilizar oscilaciones conectando las fases en un puente neutro a través de resistencias de 1 MΩ.</p>
---	-------------------	---

```

BEGIN NEW DATA CASE --NOSORT--
DATA BASE MODULE
$ERASE
ARG,FASEA1,FASEB1,FASEC1
ARG,FASEA2,FASEB2,FASEC2
ARG,GNDYXX
DUM,DELTA,DELTAA,DELTAB,DELTAC
/BRANCH
DELTAAGNDYXX          1.E6          0
DELTABGNDYXX          1.E6          0
DELTACGNDYXX          1.E6          0
DELTAFASEA2           .0001         0
DELTABFASEB2           .0001         0
DELTACFASEC2           .0001         0
FASEA1DELTA            .0001         0
FASEB1DELTAB           .0001         0
FASEC1DELTAC           .0001         0
BEGIN NEW DATA CASE
C
$PUNCH
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
    
```

	<p>tr_ac_vs.mod</p>	<p>Este módulo hace la transformación de las señales monofásicas de tensión o corrientes, al sistema de coordenadas $\alpha - \beta$.</p>
---	---------------------	--

```

MODEL TR_AC_VS
comment *****
*
* ESTE PROGRAMA REALIZA LA TRANSFORMACIÓN DEL VECTOR ESPACIAL
*
    
```

```

*   LAS ENTRADAS CORRESPONDEN A LAS TENSIONES DE FASE DE UN SISTEMA   *
*   TRIFÁSICO, Y LAS SALIDAS CORRESPONDEN A LA TRANSFORMACIÓN DEL    *
*   VECTOR ESPACIAL, CON LAS COMPONENTES ALFA, BETA Y CERO           *
***** endcomment

-- EN ESTA SECCIÓN SE DEFINEN LAS ENTRADAS DEL MODELO,DEFINIDAS EN EL GRÁFICO *.MOD

INPUT VFASEA    -- TENSIÓN DE LA FASE A
      VFASEB    -- TENSIÓN DE LA FASE B
      VFASEC    -- TENSIÓN DE LA FASE C

-- EN ESTA SECCIÓN SE DEFINAN LAS VARIABLES DEL MODELO
-- QUE CORRESPONDEN EN NUESTRO CASO A LAS SALIDAS Y LAS TENSIONES DE LÍNEA

VAR   VALFA     -- PROYECCIÓN DEL VECTOR ESPACIAL SOBRE EL EJE ALFA
      VBETA     -- PROYECCIÓN DEL VECTOR ESPACIAL SOBRE EL EJE BETA
      VCERO     -- COMPONENTE DE SECUENCIA CERO DEL VECTOR ESPACIAL
      VAB       -- VALOR INSTANTÁNEO DE LA TENSIÓN DE FASE AB
      VBC       -- VALOR INSTANTÁNEO DE LA TENSIÓN DE FASE AB
      VCA       -- VALOR INSTANTÁNEO DE LA TENSIÓN DE FASE AB

-- EN ESTA SECCIÓN SE DEFINEN LAS SALIDAS DEL MODELO DEFINIDAS EN EL GRÁFICO *.MOD

OUTPUT VALFA    -- PROYECCIÓN DEL VECTOR ESPACIAL SOBRE EL EJE ALFA
      VBETA     -- PROYECCIÓN DEL VECTOR ESPACIAL SOBRE EL EJE BETA
      VCERO     -- COMPONENTE DE SECUENCIA CERO DEL VECTOR ESPACIAL

-- EN PRIMER LUGAR SE INICIALIZAN LAS SALIDAS, PARA QUE EL MODELO NO PRESENTE ERRORES
-- DURANTE LA SIMULACIÓN PORQUE NO SE CONOCEN LOS VALORES DE LA VARIABLE

INIT
  VALFA:=0
  VBETA:=0
  VCERO:=0
ENDINIT

-- EN ESTA SECCIÓN SE DEFINE EL PROGRAMA, EL CUAL SERÁ EJECUTADO
-- CADA INTERVALO DE TIEMPO DEFINIDO COMO PASO DE LA SIMULACIÓN

EXEC
  -- SE CALCULAN LAS TENSIONES DE LÍNEA

  VAB:=VFASEA-VFASEB
  VBC:=VFASEB-VFASEC
  VCA:=VFASEC-VFASEA

  -- SE CALCULAN LAS COMPONENTES DEL VECTOR ESPACIAL, SEGUN LIBRO PETER BASS

  VALFA:=(2/3)*(VFASEA-0.5*VFASEB-0.5*VFASEC)

```

```

VBETA:=(2/3)*(SQRT(3)/2)*(VFASEB-VFASEC)
VCERO:=(2/3)*(VAB+VBC+VCA)
ENDEXEC

ENDMODEL

```

A continuación se presenta el listado que corresponde al archivo *.ATP del caso de simulación 2.

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW marzo, miércoles 22, 2006
C A Bonneville Power Administration program
C Programmed by H. K. Høidalen at SEFAS - NORWAY 1994-2002
C -----
$DUMMY, XYZ000
C dt >> Tmax >> Xopt >> Copt >
  5.E-6  10.
  500    1    1    1    1    0    0    1    0
TACS HYBRID
/MODELS
MODELS
/TACS
92TQ                                -1.    10.
92TITA                              -1.    10.
90BUS4C                             -1.    10.
90BUS4A                             -1.    10.
92OMEGA                             -1.    10.
92IF1                                -1.    10.
2XX0336                             +XX0334    750.
  1.
  .0187  .1062  .0095
1XX0308 +VT4                          1.
  1.
  1.    0.001
90BUS4B                             -1.    10.
90BUS10B                            -1.    10.
90BUS10A                            -1.    10.
90BUS10C                            -1.    10.
98DELTA =(TITA-OMEGAR*TIMEX-PI/2)*180/PI
99PG   =TQ*OMEGA
1XX0340 +XX0336                       0.04
  1.
  1.    1.
98XX0334 = XX0332 - XX0340
98XX0332 = XX0310 - XX0308
98XX0310 =1
98XX0112 = XX0336 + XX0346
98XX0346 =1

```

```

90BUS3C                -1.      10.
90BUS3A                -1.      10.
90BUS3B                -1.      10.
98VT10  =(SQRT(BUS10A**2+BUS10B**2+BUS10C**2)/230000)*SQRT(2)
90BUS8B                -1.      10.
90BUS8C                -1.      10.
90BUS8A                -1.      10.
98VT8  =(SQRT(BUS8A**2+BUS8B**2+BUS8C**2)/230000)*SQRT(2)
98VF  =      1. * XX0112
98XX0496 =TETA3
11STTSWT      1.                .505      10.
11XX0502      1.                .5        10.
 2XX0532                +XX0516                2.1
      1.5      .0115
      11.      .041      3.E-5
98XX0516 = XX0520 - XX0462
98XX0520 =1
98VDC  =VDCPOS-VDCNEG
90VDCPOS                -1.      10.
90VDCNEG                -1.      10.
98XX0518 =-DELT+DEFASE*PI/180
98XX0524 =-DELT-30*PI/180+DEFASE*PI/180
98XX0530 =BUS8A
98VRMS8 66                +XX0530                60.
 0DELT                +XX0532                1.-0.174 .1745
98DEFASE =90+90-30-10
90TETA3                -1.      10.
98XX0462 =VRMS8*sqr(6)/230000
98VT4  =(SQRT(BUS4A**2+BUS4B**2+BUS4C**2)/13800)*SQRT(2)
33PG
33DELTA
33DELTA
33VT8
33WT1
33DELT
33VDC
33XX0141
33XX0462
33VT4
/MODELS
INPUT
  IX0001 {tacs(BUS8A )}
  IX0002 {tacs(BUS8B )}
  IX0003 {tacs(BUS8C )}
OUTPUT
  VA1
  VB1
  XX0281
  TETA2
MODEL TR_AC_VS
comment *****
*

```

```

* ESTE PROGRAMA REALIZA LA TRANSFORMACIÓN DEL VECTOR ESPACIAL *
* LAS ENTRADAS CORRESPONDEN A LAS TENSIONES DE FASE DE UN SISTEMA *
* TRIFÁSICO, Y LAS SALIDAS CORRESPONDEN A LA TRANSFORMACIÓN DEL *
* VECTOR ESPACIAL, CON LAS COMPONENTES ALFA, BETA Y CERO *
***** endcomment
-- EN ESTA SECCIÓN SE DEFINEN LAS ENTRADAS DEL MODELO,DEFINIDAS EN EL GRÁFICO *.MOD
INPUT VFASEA -- TENSIÓN DE LA FASE A
      VFASEB -- TENSIÓN DE LA FASE B
      VFASEC -- TENSIÓN DE LA FASE C
-- EN ESTA SECCIÓN SE DEFINAN LAS VARIABLES DEL MODELO
-- QUE CORRESPONDEN EN NUESTRO CASO A LAS SALIDAS Y LAS TENSIONES DE LÍNEA
VAR VALFA -- PROYECCIÓN DEL VECTOR ESPACIAL SOBRE EL EJE ALFA
    VBETA -- PROYECCIÓN DEL VECTOR ESPACIAL SOBRE EL EJE BETA
    VCERO -- COMPONENTE DE SECUENCIA CERO DEL VECTOR ESPACIAL
    VAB -- VALOR INSTANTÁNEO DE LA TENSIÓN DE FASE AB
    VBC -- VALOR INSTANTÁNEO DE LA TENSIÓN DE FASE AB
    VCA -- VALOR INSTANTÁNEO DE LA TENSIÓN DE FASE AB
-- EN ESTA SECCIÓN SE DEFINEN LAS SALIDAS DEL MODELO DEFINIDAS EN EL GRÁFICO *.MOD
OUTPUT VALFA -- PROYECCIÓN DEL VECTOR ESPACIAL SOBRE EL EJE ALFA
      VBETA -- PROYECCIÓN DEL VECTOR ESPACIAL SOBRE EL EJE BETA
      VCERO -- COMPONENTE DE SECUENCIA CERO DEL VECTOR ESPACIAL
-- EN PRIMER LUGAR SE INICIALIZAN LAS SALIDAS, PARA QUE EL MODELO NO PRESENTE ERRORES
-- DURANTE LA SIMULACIÓN PORQUE NO SE CONOCEN LOS VALORES DE LA VARIABLE
INIT
    VALFA:=0
    VBETA:=0
    VCERO:=0
ENDINIT
-- EN ESTA SECCIÓN SE DEFINE EL PROGRAMA, EL CUAL SERÁ EJECUTADO
-- CADA INTERVALO DE TIEMPO DEFINIDO COMO PASO DE LA SIMULACIÓN
EXEC
    -- SE CALCULAN LAS TENSIONES DE LÍNEA
    VAB:=VFASEA-VFASEB
    VBC:=VFASEB-VFASEC
    VCA:=VFASEC-VFASEA
    -- SE CALCULAN LAS COMPONENTES DEL VECTOR ESPACIAL, SEGUN LIBRO PETER BASS
    VALFA:=(2/3)*(VFASEA-0.5*VFASEB-0.5*VFASEC)
    VBETA:=(2/3)*(SQRT(3)/2)*(VFASEB-VFASEC)
    VCERO:=(2/3)*(VAB+VBC+VCA)
ENDEXEC
ENDMODEL
MODEL ANGUL
comment *****
* ESTE PROGRAMA REALIZA LA TRANSFORMACIÓN DEL VECTOR ESPACIAL *
* LAS ENTRADAS CORRESPONDEN A LAS TENSIONES DE FASE DE UN SISTEMA *
* TRIFÁSICO, Y LAS SALIDAS CORRESPONDEN A LA TRANSFORMACIÓN DEL *
* VECTOR ESPACIAL, CON LAS COMPONENTES ALFA, BETA Y CERO *
***** endcomment
-- EN ESTA SECCIÓN SE DEFINEN LAS ENTRADAS DEL MODELO,DEFINIDAS EN EL GRÁFICO *.MOD
INPUT VALFA -- TENSIÓN DE LA FASE A
      VBETA -- TENSIÓN DE LA FASE B

```

```

-- EN ESTA SECCIÓN SE DEFINAN LAS VARIABLES DEL MODELO
-- QUE CORRESPONDEN EN NUESTRO CASO A LAS SALIDAS Y LAS TENSIONES DE LÍNEA
VAR  ANGVS
-- EN ESTA SECCIÓN SE DEFINEN LAS SALIDAS DEL MODELO DEFINIDAS EN EL GRÁFICO *.MOD
OUTPUT ANGVS
-- EN PRIMER LUGAR SE INICIALIZAN LAS SALIDAS, PARA QUE EL MODELO NO PRESENTE ERRORES
-- DURANTE LA SIMULACIÓN PORQUE NO SE CONOCEN LOS VALORES DE LA VARIABLE
INIT
    ANGVS:=0
ENDINIT
-- EN ESTA SECCIÓN SE DEFINE EL PROGRAMA, EL CUAL SERÁ EJECUTADO
-- CADA INTERVALO DE TIEMPO DEFINIDO COMO PASO DE LA SIMULACIÓN
EXEC
    -- CÁLCULO DEL ÁNGULO DEL VECTOR ESPACIAL (valores entre 0° y 360°)
    ANGVS:=ATAN(VBETA/VALFA)
    IF ((VALFA>=0) AND (VBETA<=0))
    THEN
        ANGVS:=ANGVS+2*PI
    ELSE
        IF VALFA<=0 THEN
            ANGVS:=ANGVS+PI
        ENDIF
    ENDIF
    -- WRITE('  ANGULO', ANGVS*180/pi)
ENDEXEC
ENDMODEL
USE TR_AC_VS AS TR_AC_VS
INPUT
    VFASEA:= IX0001
    VFASEB:= IX0002
    VFASEC:= IX0003
OUTPUT
    VA1  :=VALFA
    VB1  :=VBETA
    XX0281:=VCERO
ENDUSE
USE ANGUL AS ANGUL
INPUT
    VALFA:= VA1
    VBETA:= VB1
OUTPUT
    TETA2 :=ANGVS
ENDUSE
ENDMODELS
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
TRANSFORMER          X0034A  1.E5          0
          9999
1X0298AX0298B          .005.16838  13.8

```

2BUS3A	.0146.773132.79		
TRANSFORMER X0034A		X0034B	
1X0298BX0298C			
2BUS3B			
TRANSFORMER X0034A		X0034C	
1X0298CX0298A			
2BUS3C			
X0306AX0068A	.06613	40.	0
X0306BX0068B	.06613	40.	0
X0306CX0068C	.06613	40.	0
X0060AX0061A	.57322.158		0
X0060BX0061B	.57322.158		0
X0060CX0061C	.57322.158		0
X0061A		.15163	0
X0061B		.15163	0
X0061C		.15163	0
X0060A		.15163	0
X0060B		.15163	0
X0060C		.15163	0
X0066A	51.5138.307		0
X0066B	51.5138.307		0
X0066C	51.5138.307		0
X0068ABUS3A	3.5046133.01		0
X0068BBUS3B	3.5046133.01		0
X0068CBUS3C	3.5046133.01		0
BUS3A		.9073	0
BUS3B		.9073	0
BUS3C		.9073	0
BUS3A BUS8A	4.8492184.75		0
BUS3B BUS8B	4.8492184.75		0
BUS3C BUS8C	4.8492184.75		0
BUS8A		1.26	0
BUS8B		1.26	0
BUS8C		1.26	0
BUS3A		1.26	0
BUS3B		1.26	0
BUS3C		1.26	0
X0068A		.9073	0
X0068B		.9073	0
X0068C		.9073	0
BUS8A X0083A	.57322.158		0
BUS8B X0083B	.57322.158		0
BUS8C X0083C	.57322.158		0
X0083A		.15163	0
X0083B		.15163	0
X0083C		.15163	0
BUS8A		.15163	0
BUS8B		.15163	0
BUS8C		.15163	0
BUS10A	161.8957.524		0
BUS10B	161.8957.524		0
BUS10C	161.8957.524		0

```

X0320AX0066A          46.772          0
X0320BX0066B          46.772          0
X0320CX0066C          46.772          0
X0123A                .00522      700.          0
X0123B                .00522      700.          0
X0123C                .00522      700.          0
X0083ABUS10A          46.772          0
X0083BBUS10B          46.772          0
X0083CBUS10C          46.772          0
VDCNEGVDCPOS          4.5E4          0
XX0490                .001          0
TRANSFORMER          X0225A  1.E5          0
    9999
1VOA  VOB              .369  12.
2X0486A                136. 132.8
    TRANSFORMER X0225A          X0225B
1VOB  VOC
2X0486B
    TRANSFORMER X0225A          X0225C
1VOC  VOA
2X0486C
    NETRY1              1.E8          0
    VDCNEGVDCPOS        2.25          0
    X0294A              1.9176      2.          0
    X0294B              1.9176      2.          0
    X0294C              1.9176      2.          0
    VOA                 .00522     1028.          0
    VOB                 .00522     1028.          0
    VOC                 .00522     1028.          0
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\logic1.lib, XX0496, XX0518, STTSWT, XX0348 $$
, XX0354, XX0360, XX0366, XX0372, XX0378, 100.
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\pll.lib, BUS8A#, BUS8B#, BUS8C#, XX0141, WT1### $$
, 1.38E5, 100., 5.E3
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\invcav.lib, XX0420, XX0422, XX0424, VDCPOS $$
, VDCNEG, XX0348, XX0378, XX0354, XX0366, XX0360, XX0372, 500., 0.5 $$
, 0.0
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\logic1.lib, XX0496, XX0524, STTSWT, XX0384 $$
, XX0390, XX0396, XX0402, XX0408, XX0414, 100.
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\invcav.lib, XX0426, XX0428, XX0430, VDCPOS $$
, VDCNEG, XX0384, XX0414, XX0390, XX0402, XX0396, XX0408, 500., 0.5 $$
, 0.0
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\tranyy.lib, XX0450, XX0452, XX0454, VOA### $$
, VOB###, VOC###, XX0444, XX0446, XX0448, 3500., 3500.,0.0314,0.0314 $$
, 0.0, 0.0, 1.E5
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\trandy.lib, XX0438, XX0440, XX0442, XX0444 $$
, XX0446, XX0448, XX0490, XX0490, XX0490, 6063., 3500.,0.0314,0.0314 $$
, 0.0, 0.0, 1.E5
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\gndelt.lib, XX0432, XX0434, XX0436, XX0438 $$
, XX0440, XX0442
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\gndstr.lib, XX0460, XX0458, XX0456, XX0450 $$
, XX0452, XX0454, NETRY1
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\ruptor.lib, XX0420, XX0422, XX0424, XX0460 $$

```

```

, XX0458, XX0456, XX0502
$INCLUDE, C:\ATP\project\uspruptor.lib, XX0426, XX0428, XX0430, XX0432 $$
, XX0434, XX0436, XX0502
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><VÉ/CLOP >< type >
  BUS4A X0298A      -1.    10.                0
  BUS4B X0298B      -1.    10.                0
  BUS4C X0298C      -1.    10.                0
  BUS3A X0060A      -1.    4.65             0
  BUS3B X0060B      -1.    4.65             0
  BUS3C X0060C      -1.    4.65             0
  X0061AX0320A      4.5    10.                0
  X0061BX0320B      4.5    10.                0
  X0061CX0320C      4.5    10.                0
  BUS8A X0486A       .5     10.                0
  BUS8B X0486B       .5     10.                0
  BUS8C X0486C       .5     10.                0
  TETA2 TETA3                                MEASURING 0
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
14X0306A 0  1.38E5    60.                -1.    10.
14X0306B 0  1.38E5    60.   -120.            -1.    10.
14X0306C 0  1.38E5    60.    120.            -1.    10.
60TETA2  0                                -1.    10.
59BUS4A   8.E3    60.    -5.
  BUS4B
  BUS4C
PARAMETER FITTING          2.
  1 1 1 2      1.      1.    200.    13.8    300.
BLANK
  .001096      .15      1.7      1.64  .238324    .378    .18469    .185151
  6.19488      .028716  .07496  .1053
  1            1.0      2.7113
BLANK
  11
  21
  31
  41
  51
BLANK
74OMEGA      2
73TQ         14
74TITA       1
71VF
73IF1        4
  FINISH
/INITIAL
/OUTPUT
  VOA  VOB  VOC
BLANK TACS
BLANK MODELS
BLANK BRANCH

```

```

BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK INITIAL
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
    
```

C.3. Caso de simulación 3

La figura C.3 muestra parte del sistema de potencia de un STATCOM con una barra infinita, la cual está representada por una fuente trifasica tipo TACS(60).

La figura C.4 muestra parte del montaje del STATCOM de 48 pulsos, en la cual se presentan solo dos inversores de seis pulsos. El mismo montaje es equivalente para los siguientes seis inversores de seis pulsos.

La figura C.5 muestra como se genera la señal de desfase a partir del controlador PI.

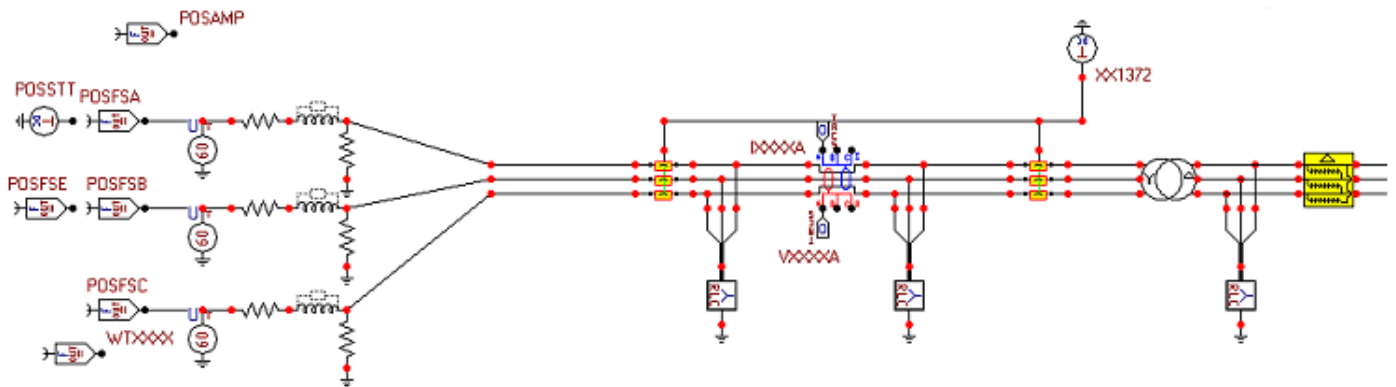


Figura C.3: Caso de simulación 3 - parte 1

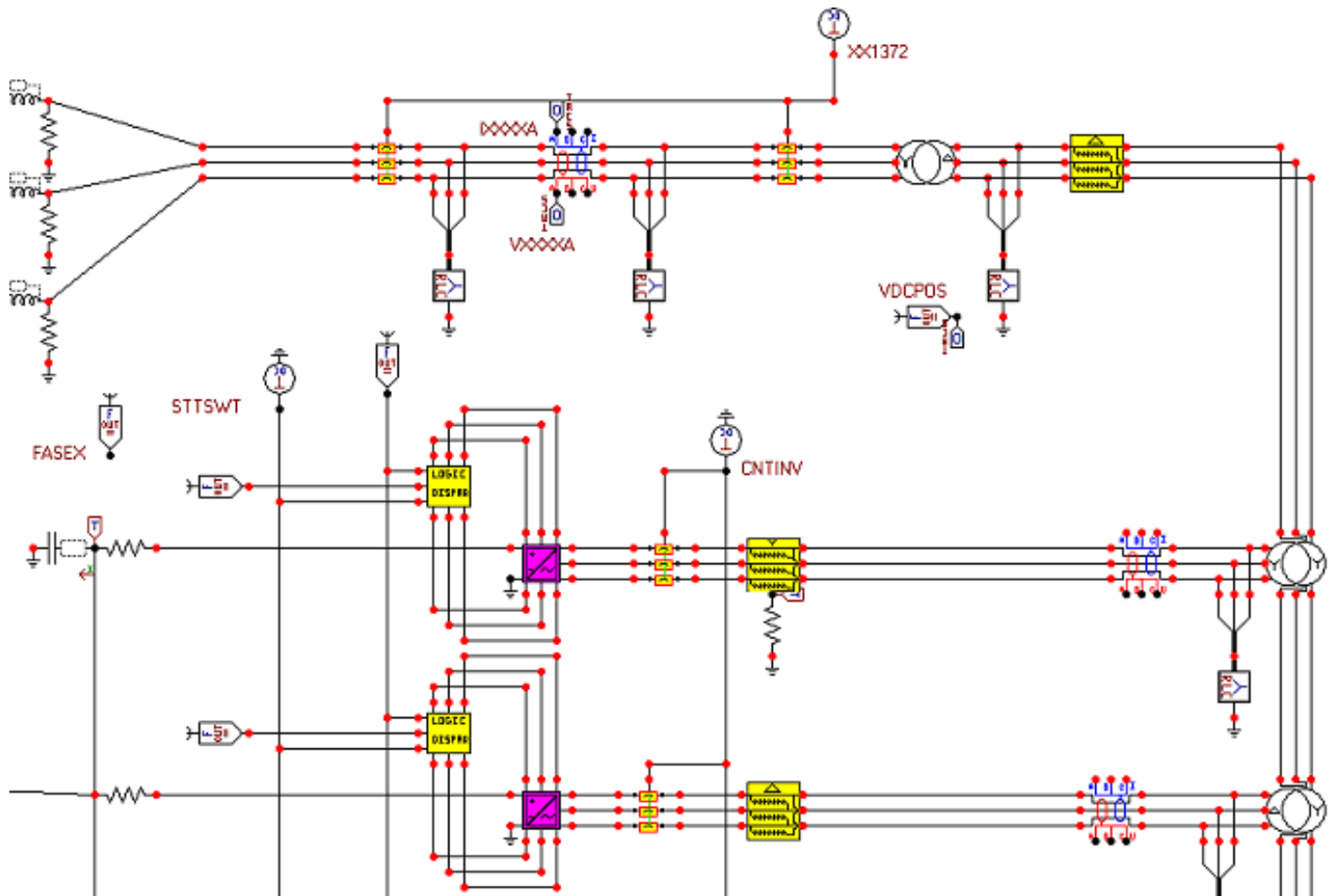


Figura C.4: Caso de simulación 3 - parte 2

	<p>medida.atp</p>	<p>Este módulo sensa las señales de tensión y corriente por las líneas</p>
--	-------------------	--

```

BEGIN NEW DATA CASE --NOSORT--
DATA BASE MODULE
$ERASE
ARG,VA0001,VB0001,VC0001,VA0003,VB0003,VC0003
ARG,VAXXXX,VBXXXX,VCXXXX,IAXXXX,IBXXXX,ICXXXX
DUM,VA0002,VB0002,VC0002
/TACS
90VA0001                                100.
90VB0001                                100.
90VC0001                                100.
91VA0002                                100.
    
```

```

91VB0002                                     100.
91VC0002                                     100.
98VAXXXX =VA0001
98IAXXXX =VA0002
98VBXXXX =VB0001
98IBXXXX =VB0002
98VCXXXX =VC0001
98ICXXXX =VC0002
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
  VA0001VA0002          .001                      0
  VB0001VB0002          .001                      0
  VC0001VC0002          .001                      0
  VA0001                 1.E9                     0
  VB0001                 1.E9                     0
  VC0001                 1.E9                     0
  VA0002                 1.E9                     0
  VB0002                 1.E9                     0
  VC0002                 1.E9                     0
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
  VB0002VB0003          MEASURING                  0
  VC0002VC0003          MEASURING                  0
  VA0002VA0003          MEASURING                  0
BEGIN NEW DATA CASE
C
$PUNCH,MEDIDA.LIB
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

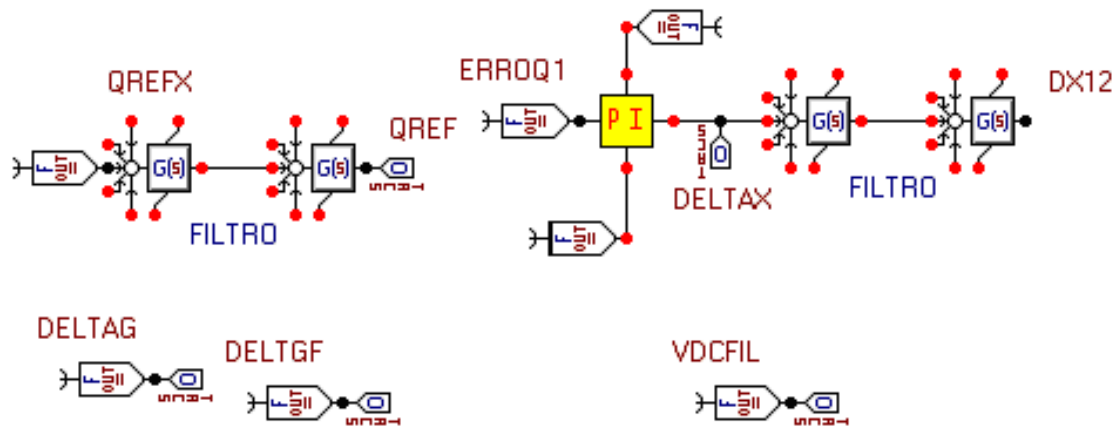


Figura C.5: Caso de simulación 3 - parte 3

A continuación se presenta el listado que corresponde al archivo *.ATP del caso de simulación 3.

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW  abril, lunes 17, 2006
C A Bonneville Power Administration program
C Programmed by H. K. Høidalen at SEFAS - NORWAY 1994-2002
C -----
$DUMMY, XYZ000
C dT >> Tmax >> Xopt >> Copt >
  2.5E-6    1.5
    500    1    1    1    1    0    0    1    0
TACS HYBRID
/MODELS
MODELS
/TACS
98WTX      =WT1
11STTSWT   1.                .25    10.
11CNTINV   1.                .25    10.
90VDC      -1.               -1.    10.
90NETRY3   -1.               -1.    10.
98FASEX    =DELTAX*STTQRF+CORETO*PI/180
11STTQRF   1.                .25    10.
90NETRY5   -1.               -1.    10.
23QS1      2.                .5     .25   .5    10.
23QS2      1.                1.     .5    .5    10.
98XX1378   =FASEX+30*PI/180
98QREFX    =(QS1-1)*QS2*STTQRF
    
```

```

98ERROQ1 =(QREF-QPU)*STTQRF
98POSFSA =POSSTT*POSAMP*1000*SIN(WTXXXX+(POSFSE)*PI/180)
11POSSTT      1.                                .05      10.
98POSFSB =POSSTT*POSAMP*1000*SIN(WTXXXX+(POSFSE)*PI/180-2*PI/3)
98POSFSC =POSSTT*POSAMP*1000*SIN(WTXXXX+(POSFSE)*PI/180+2*PI/3)
98POSFSE =0
1XX1534      +DELTA      1.
200.
200.      1.
98XX1540 =2.5*PI/180
98VDCPU   =VDCPOS/5500
98VDCFIL  =VDCFLT/5500
98DELTA   =DELTA*180/PI
98DELTF   =DX12*180/PI
98XX1510  =FASEX+0
98XX1512  =FASEX+37.5*PI/180
98XX1514  =FASEX+7.5*PI/180
98XX1516  =FASEX+45*PI/180
98XX1518  =FASEX+15*PI/180
98XX1520  =FASEX+52.5*PI/180
98POSAMP  =112.67
98WTXXXX  =2*PI*60*TIMEX
98XX1538  =-2.5*PI/180
98CORETO  =-70.885
98P1      =1.5*(VALFAX*IALFAX+VBETAX*IBETAX)
98Q1      =1.5*(VBETAX*IALFAX-VALFAX*IBETAX)
98QPU     =Q1/100E6
90VALFAX  -1.      10.
90VBETAX  -1.      10.
90IALFAX  -1.      10.
90IBETAX  -1.      10.
90NETRY1  -1.      10.
98VA12P1  =(VA61-NETRY1)+(VA62-VB62)/SQRT(3)
98VB12P1  =(VB61-NETRY1)+(VB62-VC62)/SQRT(3)
98V24P1   =(VA12P1-VB12P1)+(VA12P2-VB12P2)
98V24P2   =(VA12P3-VB12P3)+(VA12P4-VB12P4)
98VA12P2  =(VA63-NETRY3)+(VA64-VB64)/SQRT(3)
98VB12P2  =(VB63-NETRY3)+(VB64-VC64)/SQRT(3)
98VA12P3  =(VA65-NETRY5)+(VA66-VB66)/SQRT(3)
98VB12P3  =(VB65-NETRY5)+(VB66-VC66)/SQRT(3)
98VA12P4  =(VA67-NETRY7)+(VA68-VB68)/SQRT(3)
98VB12P4  =(VB67-NETRY7)+(VB68-VC68)/SQRT(3)
98V48P    =V24P1+V24P2
98VDCPOS  =VDC
90NETRY7  -1.      10.
11XX1368  1.                                .05      10.
98V48PU   =V48P/48.78E3
98VXXXXPU =VXXXXA/112.675E3
98ITXXPU  =IXXXXX/418.369
1XX1374   +VDC      1.
500.
500.      1.

```

```

1DX12          +XX1534          1.
  200.
  200.          1.
1XX1536        +QREFX          1.
  50.
  50.          1.
1QREF          +XX1536          1.
  50.
  50.          1.
1VDCFLT        +XX1374          1.
  500.
  500.          1.
98XX1526 =FASEX+22.5*PI/180
98VPU =SQRT(VXXXXA**2+VXXXXB**2+VXXXXC**2)/1.38E5
33WT1
33XX0044
33IXXXXA
33VDCFIL
33DELTAG
33DELTGF
33VDCPU
33VXXXXA
33V48P
33QREF
33QPU
33VDCPOS
33DELTAX
33P1
33V48PU
33VXXXPU
33ITXXPU
33Q1
33VPU
/MODELS
INPUT
  IX0001 {tacs(IXXXXA)}
  IX0002 {tacs(IXXXXB)}
  IX0003 {tacs(IXXXXC)}
  IX0004 {tacs(VXXXXA)}
  IX0005 {tacs(VXXXXB)}
  IX0006 {tacs(VXXXXC)}
OUTPUT
  XX0473
  XX0477
  XX0153
  XX0482
  XX0483
  XX0159
MODEL ITRAC_VE
comment *****
*
*   ESTE PROGRAMA REALIZA LA TRANSFORMACIÓN DEL VECTOR ESPACIAL
*
```

```

*   LAS ENTRADAS CORRESPONDEN A LAS TENSIONES DE FASE DE UN SISTEMA   *
*   TRIFÁSICO, Y LAS SALIDAS CORRESPONDEN A LA TRANSFORMACIÓN DEL   *
*   VECTOR ESPACIAL, CON LAS COMPONENTES ALFA, BETA Y CERO           *
***** endcomment
-- EN ESTA SECCIÓN SE DEFINEN LAS ENTRADAS DEL MODELO,DEFINIDAS EN EL GRÁFICO *.MOD
INPUT VFASEA   -- TENSIÓN DE LA FASE A
      VFASEB   -- TENSIÓN DE LA FASE B
      VFASEC   -- TENSIÓN DE LA FASE C
-- EN ESTA SECCIÓN SE DEFINAN LAS VARIABLES DEL MODELO
-- QUE CORRESPONDEN EN NUESTRO CASO A LAS SALIDAS Y LAS TENSIONES DE LÍNEA
VAR   VALFA    -- PROYECCIÓN DEL VECTOR ESPACIAL SOBRE EL EJE ALFA
      VBETA    -- PROYECCIÓN DEL VECTOR ESPACIAL SOBRE EL EJE BETA
      VCERO    -- COMPONENTE DE SECUENCIA CERO DEL VECTOR ESPACIAL
      VAB      -- VALOR INSTANTÁNEO DE LA TENSIÓN DE FASE AB
      VBC      -- VALOR INSTANTÁNEO DE LA TENSIÓN DE FASE AB
      VCA      -- VALOR INSTANTÁNEO DE LA TENSIÓN DE FASE AB
-- EN ESTA SECCIÓN SE DEFINEN LAS SALIDAS DEL MODELO DEFINIDAS EN EL GRÁFICO *.MOD
OUTPUT VALFA   -- PROYECCIÓN DEL VECTOR ESPACIAL SOBRE EL EJE ALFA
       VBETA   -- PROYECCIÓN DEL VECTOR ESPACIAL SOBRE EL EJE BETA
       VCERO   -- COMPONENTE DE SECUENCIA CERO DEL VECTOR ESPACIAL
-- EN PRIMER LUGAR SE INICIALIZAN LAS SALIDAS, PARA QUE EL MODELO NO PRESENTE ERRORES
-- DURANTE LA SIMULACIÓN PORQUE NO SE CONOCEN LOS VALORES DE LA VARIABLE
INIT
      VALFA:=0
      VBETA:=0
      VCERO:=0
ENDINIT
-- EN ESTA SECCIÓN SE DEFINE EL PROGRAMA, EL CUAL SERÁ EJECUTADO
-- CADA INTERVALO DE TIEMPO DEFINIDO COMO PASO DE LA SIMULACIÓN
EXEC
      -- SE CALCULAN LAS COMPONENTES DEL VECTOR ESPACIAL, SEGUN LIBRO PETER BASS
      VALFA:=(2/3)*(VFASEA-0.5*VFASEB-0.5*VFASEC)
      VBETA:=(2/3)*(SQRT(3)/2)*(VFASEB-VFASEC)
      VCERO:=(2/3)*(VFASEA+VFASEB+VFASEC)
ENDEXEC
ENDMODEL
MODEL TR_AC_VS
comment *****
*
*   ESTE PROGRAMA REALIZA LA TRANSFORMACIÓN DEL VECTOR ESPACIAL   *
*   LAS ENTRADAS CORRESPONDEN A LAS TENSIONES DE FASE DE UN SISTEMA *
*   TRIFÁSICO, Y LAS SALIDAS CORRESPONDEN A LA TRANSFORMACIÓN DEL *
*   VECTOR ESPACIAL, CON LAS COMPONENTES ALFA, BETA Y CERO         *
***** endcomment
-- EN ESTA SECCIÓN SE DEFINEN LAS ENTRADAS DEL MODELO,DEFINIDAS EN EL GRÁFICO *.MOD
INPUT VFASEA   -- TENSIÓN DE LA FASE A
      VFASEB   -- TENSIÓN DE LA FASE B
      VFASEC   -- TENSIÓN DE LA FASE C
-- EN ESTA SECCIÓN SE DEFINAN LAS VARIABLES DEL MODELO
-- QUE CORRESPONDEN EN NUESTRO CASO A LAS SALIDAS Y LAS TENSIONES DE LÍNEA
VAR   VALFA    -- PROYECCIÓN DEL VECTOR ESPACIAL SOBRE EL EJE ALFA
      VBETA    -- PROYECCIÓN DEL VECTOR ESPACIAL SOBRE EL EJE BETA

```

```

VCERO      -- COMPONENTE DE SECUENCIA CERO DEL VECTOR ESPACIAL
VAB        -- VALOR INSTANTÁNEO DE LA TENSIÓN DE FASE AB
VBC        -- VALOR INSTANTÁNEO DE LA TENSIÓN DE FASE AB
VCA        -- VALOR INSTANTÁNEO DE LA TENSIÓN DE FASE AB
-- EN ESTA SECCIÓN SE DEFINEN LAS SALIDAS DEL MODELO DEFINIDAS EN EL GRÁFICO *.MOD
OUTPUT VALFA  -- PROYECCIÓN DEL VECTOR ESPACIAL SOBRE EL EJE ALFA
VBETA      -- PROYECCIÓN DEL VECTOR ESPACIAL SOBRE EL EJE BETA
VCERO      -- COMPONENTE DE SECUENCIA CERO DEL VECTOR ESPACIAL
-- EN PRIMER LUGAR SE INICIALIZAN LAS SALIDAS, PARA QUE EL MODELO NO PRESENTE ERRORES
-- DURANTE LA SIMULACIÓN PORQUE NO SE CONOCEN LOS VALORES DE LA VARIABLE
INIT
  VALFA:=0
  VBETA:=0
  VCERO:=0
ENDINIT
-- EN ESTA SECCIÓN SE DEFINE EL PROGRAMA, EL CUAL SERÁ EJECUTADO
-- CADA INTERVALO DE TIEMPO DEFINIDO COMO PASO DE LA SIMULACIÓN
EXEC
  -- SE CALCULAN LAS TENSIONES DE LÍNEA
  VAB:=VFASEA-VFASEB
  VBC:=VFASEB-VFASEC
  VCA:=VFASEC-VFASEA
  -- SE CALCULAN LAS COMPONENTES DEL VECTOR ESPACIAL, SEGUN LIBRO PETER BASS
  VALFA:=(2/3)*(VFASEA-0.5*VFASEB-0.5*VFASEC)
  VBETA:=(2/3)*(SQRT(3)/2)*(VFASEB-VFASEC)
  VCERO:=(2/3)*(VAB+VBC+VCA)
ENDEXEC
ENDMODEL
USE ITRAC_VE AS ITRAC_VE
INPUT
  VFASEA:= IX0001
  VFASEB:= IX0002
  VFASEC:= IX0003
OUTPUT
  XX0473:=VALFA
  XX0477:=VBETA
  XX0153:=VCERO
ENDUSE
USE TR_AC_VS AS TR_AC_VS
INPUT
  VFASEA:= IX0004
  VFASEB:= IX0005
  VFASEC:= IX0006
OUTPUT
  XX0482:=VALFA
  XX0483:=VBETA
  XX0159:=VCERO
ENDUSE
ENDMODELS
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH

```

C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >
 C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0

VDC		4591.	1
NETRY1	1.E6		0
NETRY3	1.E6		0
X0001A	1.E6	1.	0
X0001B	1.E6	1.	0
X0001C	1.E6	1.	0
NETRY5	1.E6		0
X0005A	1.E6	1.	0
X0005B	1.E6	1.	0
X0005C	1.E6	1.	0
POFSAXX0395	.001		0
POFSBXX0397	.001		0
POFSCXX0399	.001		0
XX0395XX0401		25.256	0
XX0397XX0403		25.256	0
XX0399XX0405		25.256	0
XX1338	1.E6		0
XX0401	1.E6		0
XX0403	1.E6		0
XX0405	1.E6		0
X0009A	1.E6	1.	0
X0009B	1.E6	1.	0
X0009C	1.E6	1.	0
XX0473IALFAX	.001		0
XX0477IBETAX	.001		0
XX0482VALFAX	.001		0
XX0483VBETAX	.001		0
X0017A	1.E6	1.	0
X0017B	1.E6	1.	0
X0017C	1.E6	1.	0
X0025A	1.E6	1.	0
X0025B	1.E6	1.	0
X0025C	1.E6	1.	0
NETRY7	1.E6		0
X0021A	1.E6	1.	0
X0021B	1.E6	1.	0
X0021C	1.E6	1.	0
X0029A	1.E6	1.	0
X0029B	1.E6	1.	0
X0029C	1.E6	1.	0
VDC XX0858	.1		0
VDC XX0854	.1		0
VDC XX1010	.1		0
VDC XX1006	.1		0
X0033A	1.E6	1.	0
X0033B	1.E6	1.	0
X0033C	1.E6	1.	0
X0013A	1.E6	1.	0
X0013B	1.E6	1.	0
X0013C	1.E6	1.	0

```

X0037A          1.E6          1.          0
X0037B          1.E6          1.          0
X0037C          1.E6          1.          0
VDC   XX1160          .1          0
VDC   XX1156          .1          0
VDC   XX1346          .1          0
VDC   XX1330          .1          0
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\pllcv.lib, VXXXXA, VXXXXB, VXXXXC, XX0044 $$
, WT1###, 1.38E5, 100., 5.E3
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\logic1.lib, WTX###, XX1378, STTSWT, XX0748 $$
, XX0754, XX0760, XX0744, XX0746, XX0750, 100.
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\invcav.lib, XX0816, XX0818, XX0820, XX0858 $$
, #####, XX0748, XX0750, XX0754, XX0744, XX0760, XX0746, 500., 0.5 $$
, 1.
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\logic1.lib, WTX###, XX1510, STTSWT, XX0784 $$
, XX0790, XX0796, XX0780, XX0782, XX0786, 100.
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\invcav.lib, XX0856, XX1026, XX1436, XX0854 $$
, #####, XX0784, XX0786, XX0790, XX0780, XX0796, XX0782, 500., 0.5 $$
, 1.
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\tranyy.lib, X0017A, X0017B, X0017C, XX0864 $$
, XX0866, XX1194, XX0836, XX0838, XX0840, 1., 1., 0.157, 0.157 $$
, 7.4E-4, 7.4E-4, 0.0
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\trandy.lib, X0029A, X0029B, X0029C, XX0836 $$
, XX0838, XX0840, XX1210, XX1208, XX1206, 1.7321, 1., 0.474, 0.157 $$
, 0.0022, 7.4E-4, 0.0
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\gndelt.lib, XX0824, XX0826, XX0828, XX1440 $$
, XX1496, XX1498
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\gndstr.lib, XX0852, XX0850, XX0848, XX1490 $$
, XX1492, XX1494, NETRY1
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\ruptor.lib, XX0816, XX0818, XX0820, XX0852 $$
, XX0850, XX0848, CNTINV
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\ruptor.lib, XX0856, XX1026, XX1436, XX0824 $$
, XX0826, XX0828, CNTINV
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\logic1.lib, WTX###, XX1512, STTSWT, XX0880 $$
, XX0908, XX0914, XX0822, XX0876, XX0896, 100.
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\invcav.lib, XX0970, XX0972, XX0974, XX1010 $$
, #####, XX0880, XX0896, XX0908, XX0822, XX0914, XX0876, 500., 0.5 $$
, 1.
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\logic1.lib, WTX###, XX1514, STTSWT, XX0938 $$
, XX0944, XX0950, XX0934, XX0936, XX0940, 100.
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\invcav.lib, XX1008, XX1020, XX1030, XX1006 $$
, #####, XX0938, XX0940, XX0944, XX0934, XX0950, XX0936, 500., 0.5 $$
, 1.
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\tranyy.lib, X0001A, X0001B, X0001C, XX1210 $$
, XX1208, XX1206, XX0988, XX0990, XX0992, 1., 1., 0.157, 0.157 $$
, 7.4E-4, 7.4E-4, 0.0
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\trandy.lib, X0025A, X0025B, X0025C, XX0988 $$
, XX0990, XX0992, XX1204, XX1202, XX1200, 1.7321, 1., 0.474, 0.157 $$
, 0.0022, 7.4E-4, 0.0
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\gndelt.lib, XX0976, XX0978, XX0980, XX1034 $$
, XX1042, XX1044
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\gndstr.lib, XX1004, XX1002, XX1000, XX1036 $$

```

```
, XX1038, XX1040, NETRY3
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\ruptor.lib, XX0970, XX0972, XX0974, XX1004 $$
, XX1002, XX1000, CNTINV
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\ruptor.lib, XX1008, XX1020, XX1030, XX0976 $$
, XX0978, XX0980, CNTINV
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\logic1.lib, WTX###, XX1516, STTSWT, XX1050 $$
, XX1056, XX1062, XX1046, XX1048, XX1052, 100.
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\invcav.lib, XX1120, XX1122, XX1124, XX1160 $$
, #####, XX1050, XX1052, XX1056, XX1046, XX1062, XX1048, 500., 0.5 $$
, 1.
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\logic1.lib, WTX###, XX1518, STTSWT, XX1088 $$
, XX1094, XX1100, XX1084, XX1086, XX1090, 100.
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\invcav.lib, XX1158, XX1170, XX1178, XX1156 $$
, #####, XX1088, XX1090, XX1094, XX1084, XX1100, XX1086, 500., 0.5 $$
, 1.
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\tranxy.lib, X0005A, X0005B, X0005C, XX1204 $$
, XX1202, XX1200, XX1138, XX1140, XX1142, 1., 1., 0.157, 0.157 $$
, 7.4E-4, 7.4E-4, 0.0
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\trandxy.lib, X0033A, X0033B, X0033C, XX1138 $$
, XX1140, XX1142, XX1404, XX1402, XX1400, 1.7321, 1., 0.474, 0.157 $$
, 0.0022, 7.4E-4, 0.0
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\gndelt.lib, XX1126, XX1128, XX1130, XX1182 $$
, XX1196, XX1198
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\gndstr.lib, XX1154, XX1152, XX1150, XX1184 $$
, XX1190, XX1192, NETRY5
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\ruptor.lib, XX1120, XX1122, XX1124, XX1154 $$
, XX1152, XX1150, CNTINV
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\ruptor.lib, XX1158, XX1170, XX1178, XX1126 $$
, XX1128, XX1130, CNTINV
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\logic1.lib, WTX###, XX1520, STTSWT, XX1216 $$
, XX1224, XX1232, XX1212, XX1214, XX1218, 100.
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\ruptor.lib, X0013A, X0013B, X0013C, XX1452 $$
, XX1454, XX1456, XX1368
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\invcav.lib, XX1288, XX1290, XX1292, XX1346 $$
, #####, XX1216, XX1218, XX1224, XX1212, XX1232, XX1214, 500., 0.5 $$
, 1.
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\logic1.lib, WTX###, XX1526, STTSWT, XX1256 $$
, XX1262, XX1268, XX1252, XX1254, XX1258, 100.
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\invcav.lib, XX1344, XX1356, XX1384, XX1330 $$
, #####, XX1256, XX1258, XX1262, XX1252, XX1268, XX1254, 500., 0.5 $$
, 1.
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\medida.lib, X0009A, X0009B, X0009C, X0013A $$
, X0013B, X0013C, VXXXXA, VXXXXB, VXXXXC, IXXXXA, IXXXXB, IXXXXC
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\tranxy.lib, X0021A, X0021B, X0021C, XX1404 $$
, XX1402, XX1400, XX1312, XX1314, XX1316, 1., 1., 0.157, 0.157 $$
, 7.4E-4, 7.4E-4, 0.0
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\trandxy.lib, XX1300, XX1308, XX1310, XX1312 $$
, XX1314, XX1316, XX1338, XX1338, 1.7321, 1., 0.474, 0.157 $$
, 0.0022, 7.4E-4, 0.0
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\gndelt.lib, XX1294, XX1296, XX1298, XX1388 $$
, XX1396, XX1398
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\gndstr.lib, XX1328, XX1326, XX1324, XX1390 $$
```

```

, XX1392, XX1394, NETRY7
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\ruptor.lib, XX1288, XX1290, XX1292, XX1328 $$
, XX1326, XX1324, CNTINV
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\ruptor.lib, XX1344, XX1356, XX1384, XX1294 $$
, XX1296, XX1298, CNTINV
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\ruptor.lib, XX0401, XX0403, XX0405, X0009A $$
, X0009B, X0009C, XX1368
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\gndelt.lib, X0037A, X0037B, X0037C, XX0864 $$
, XX0866, XX1194
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\trfacolib.lib, XX1452, XX1454, XX1456, X0037A $$
, X0037B, X0037C, 4.,1.7321, 12.63, 0.789,0.0952, 0.006, 0.0
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\medida.lib, XX1490, XX1492, XX1494, X0017A $$
, X0017B, X0017C, VA61##, VB61##, VC61##, XX0602, XX0603, XX0604
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\medida.lib, XX1440, XX1496, XX1498, X0029A $$
, X0029B, X0029C, VA62##, VB62##, VC62##, XX0614, XX0615, XX0616
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\medida.lib, XX1036, XX1038, XX1040, X0001A $$
, X0001B, X0001C, VA63##, VB63##, VC63##, XX0626, XX0627, XX0628
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\medida.lib, XX1034, XX1042, XX1044, X0025A $$
, X0025B, X0025C, VA64##, VB64##, VC64##, XX0638, XX0639, XX0640
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\medida.lib, XX1184, XX1190, XX1192, X0005A $$
, X0005B, X0005C, VA65##, VB65##, VC65##, XX0650, XX0651, XX0652
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\medida.lib, XX1182, XX1196, XX1198, X0033A $$
, X0033B, X0033C, VA66##, VB66##, VC66##, XX0662, XX0663, XX0664
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\medida.lib, XX1390, XX1392, XX1394, X0021A $$
, X0021B, X0021C, VA67##, VB67##, VC67##, XX0674, XX0675, XX0676
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\medida.lib, XX1388, XX1396, XX1398, XX1300 $$
, XX1308, XX1310, VA68##, VB68##, VC68##, XX0686, XX0687, XX0688
$INCLUDE, C:\ATP\project\usp\pilimi.lib, ERROQ1, DELTAX, XX1540, XX1538 $$
, 1., 50.
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><VÉ/CLOP >< type >
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
60POSFSA 0 -1. 10.
60POSFSB 0 -1. 10.
60POSFSC 0 -1. 10.
60XX0473 0 -1. 10.
60XX0477 0 -1. 10.
60XX0482 0 -1. 10.
60XX0483 0 -1. 10.
/INITIAL
/OUTPUT
BLANK TACS
BLANK MODELS
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK INITIAL
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```