

MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN
EN CORRIENTE DIRECTA

IVÁN DARÍO BAUTISTA BARAJAS
ALEXANDER GONZÁLEZ GALEANO

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
BUCARAMANGA
2008

MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN EN
CORRIENTE DIRECTA

IVÁN DARÍO BAUTISTA BARAJAS
ALEXANDER GONZÁLEZ GALEANO

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director
HERMANN RAÚL VARGAS TORRES
Doctor Ingeniero Electricista

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
BUCARAMANGA
2008

A mis padres

Juan de Jesús Bautista Calderón.

Aura Celia Barajas Benavides.

Y a mis hermanos

Iván Darío Bautista Barajas

A mis padres

José Agustín González

Juana María Galeano

Y a mis hermanos

Wilmer, Yesenia y Milena

Y a mi sobrino

Andrey

Alexander González

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Al Dr. Hermann Raúl Vargas, director del proyecto por su dirección y asesoría las cuales hicieron posible la realización de este trabajo de grado.

Resumen

TITULO: MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE TRANSMISIÓN EN CORRIENTE DIRECTA*

AUTORES: ALEXANDER GONZÁLEZ GALEANO, ÍVAN D. BAUTISTA BARAJAS**

PALABRAS CLAVES: HVDC, corriente directa, sistemas de transmisión, unidades convertidoras, VSC, CSC, ATP.

DESCRIPCIÓN:

La transmisión de energía eléctrica en corriente directa ofrece muchas ventajas respecto a la transmisión en corriente alterna como el rápido y flexible control de la potencia activa y reactiva, la transmisión para grandes distancias en líneas aéreas, subterráneas y submarinas, la interconexión de sistemas de diferentes frecuencias o que no se pueden sincronizar y la reducción del impacto ambiental y visual. El avance en la electrónica de potencia mejoró las características de los elementos de conmutación, reduciendo sus costos, siendo ésta, la principal desventaja que tienen dichos sistemas, que cada día se hacen mas viables y competitivos con los sistemas AC. Esto hace que sea importante entender y estar en capacidad de desarrollar proyectos empleando la tecnología HVDC (High Voltage Direct Current).

En el presente trabajo se analizarán los sistemas de transmisión en corriente directa, describiendo los elementos que los conforman como lo son los rectificadores e inversores de tipo VSC (Voltage Source Converter) y CSC (Current Source Converter), el enlace DC, transformadores y filtros, y se explicará su funcionamiento. Se harán diferentes modelos para ser simulados en el software ATP (Alternative Transients Program) y HAGP (Herramienta software para el modelado y simulación de sistemas de eléctricos de potencia ante grandes perturbaciones). Las simulaciones incluyen análisis de las exigencias a las están sometidos los dispositivos de conmutación ante operación normal y fallas.

*Proyecto de grado

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

Abstract

TITLE: MODEL AND SIMULATION OF DIRECT CURREN TRANSMISSION SYSTEMS*

AUTHORS: ALEXANDER GONZÁLEZ GALEANO, ÍVAN D. BAUTISTA BARAJAS**

KEY WORDS: HVDC, direct current, transmission systems, unit converter, VSC, CSC, ATP.

DESCRIPTION:

The transmission of electricity in direct current offers many advantages over the alternating current transmission in the rapid and flexible control of the active and reactive power, overhead transmission lines, underground and submarine cable for long distances, interconnection of different frequencies systems or that can not synchronized and reduction visual and environmental impact. Developments in power electronics improved characteristics of switching elements, reducing their costs, this being the main disadvantage that have such systems, which every day becomes more viable and competitive with AC systems. This makes it important to understand and be able to develop projects using technology HVDC (High Voltage Direct Current).

In this paper analysing the direct current transmission systems describing the elements that make up such as the rectifiers and inverters type VSC (Source Voltage Converter) and CSC (Current Source Converter), DC lines, converters and filters, and will explain its operation. Will be different models to be simulated in the software ATP (Alternative Transients Program) and HAGP (software tool for modeling and simulation of electric power systems to major disruptions). The simulations include analysis of the requirements are subject to the devices switching to normal operation and failures.

*Degree Proyect

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

Índice general

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción	1
1.2. Historia de los sistemas de transmisión en corriente directa	2
1.3. Motivación del trabajo	3
1.4. Objetivos	3
1.5. Organización del documento	4
2. Generalidades de los sistemas HVDC	5
2.1. Configuraciones de los sistemas HVDC	5
2.1.1. Sistema HVDC monopolar con retorno por tierra	5
2.1.2. Sistema HVDC monopolar con retorno metálico	6
2.1.3. Sistema HVDC bipolar con retorno por tierra	7
2.1.4. Sistema HVDC bipolar con neutro metálico	7
2.1.5. Sistema HVDC Back-to-Back	9
2.2. Componentes del sistema HVDC	9
2.2.1. Tipos de válvulas	9
2.2.2. Filtros	10
2.2.3. Líneas de transmisión	12
2.2.4. Transformadores de conversión	14
3. Circuitos de las unidades conversoras	15
3.1. Unidad convertora con fuente de corriente constante	15

3.1.1.	Análisis de la unidad CSC	16
3.1.1.1.	Análisis de la conmutación sin traslape	17
3.1.1.2.	Análisis incluyendo el traslape en la conmutación	20
3.1.2.	Funcionamiento como Rectificador	25
3.1.3.	Funcionamiento como Inversor	25
3.2.	Unidad convertora de fuente de tensión (VSC)	27
3.2.1.	Funcionamiento del VSC	29
4.	Modelado del sistema HVDC	31
4.1.	Principios del control del sistema HVDC	31
4.2.	Modelo del convertor CSC	32
4.2.1.	Características de control del Rectificador e Inversor	33
4.2.2.	Controlador de corriente	34
4.2.3.	Control del ángulo de Extinción en el inversor	35
4.2.4.	Sistema de control de disparo para el convertor	35
4.2.4.1.	Sistema de control de fase individual	36
4.2.4.2.	Sistema de control de pulso equidistante	36
4.3.	Modelo del convertor VSC	38
4.3.1.	Sistema de control independiente de P_c y Q_s	40
4.3.2.	Estrategia de control del HVDC-VSC	40
5.	Modelo reducido del sistema HVDC	44
5.1.	Modelo reducido	44
5.1.1.	Sistema de control	48
5.2.	Ecuaciones del modelo HVDC-VSC para incluir en HAGP	50
5.2.1.	Estructura de un modelo de sistema de potencia	50
5.2.2.	Simulación dinámica de un sistema de potencia	51
5.2.3.	Ecuaciones del enlace HVDC-VSC	53

6. Resultado de las simulaciones	55
6.1. Caso HVDC-CSC	55
6.1.1. Simulación en estado estable y cambio de referencia en la corriente . .	57
6.1.2. Análisis de armónicos	61
6.1.3. Falla trifásica de 5 ciclos en el rectificador	62
6.1.4. Falla en la línea DC	64
6.1.5. Esfuerzos de los elementos de conmutación	66
6.1.6. Modelo del sistema HVDC en el software HAGP	66
6.2. Caso HVDC-VSC	69
6.2.0.1. Análisis de armónicos	76
6.2.1. Falla trifásica en el inversor	77
6.2.2. Falla en línea DC al lado del rectificador	79
6.2.3. Falla en línea DC al lado del inversor	81
6.2.3.1. Exigencias de los dispositivos	83
7. Conclusiones, observaciones y aportes	84
A. Guía del usuario HAGP	89
A.1. Instalación	89
A.2. Ejecución	90
A.3. Enlaces de corriente directa HVDC-CSC	90
A.4. Enlaces de corriente directa HVDC-VSC	90
B. Modelos y librerías en ATP	99
B.1. Caso de simulación HVDC-CSC	99
B.2. Caso de simulación del sistema de potencia con enlace HVDC	110
B.3. Caso de simulación HVDC-VSC	110

Índice de cuadros

A.1. Parámetros del enlace en corriente directa HVDC-CSC	91
A.2. Parámetros del enlace HVDC-VSC	92

Índice de figuras

2.1. Sistema HVDC monopolar con retorno por tierra	6
2.2. Sistema monopolar HVDC con retorno metálico	6
2.3. Sistema HVDC bipolar con retorno por tierra	8
2.4. Sistema HVDC bipolar con neutro metálico	8
2.5. Sistema HVDC Back-to-Back	9
2.6. Principales configuraciones de filtros shunt	13
2.7. Cable extruido VSC (Figura tomada de ABB)	14
3.1. Unidad convertora CSC	16
3.2. Operación del rectificador. (a) Tensión directa positiva y negativa con respecto al neutro del transformador. (b) Tensión DC del puente rectificador V_{dr} . (c) Corriente de línea AC	18
3.3. Relación entre las corrientes AC y DC con y sin traslape	20
3.4. Conducción válvulas v_1 , v_2 y v_3	21
3.5. Caída de tensión directa debido al traslape	23
3.6. Circuito equivalente del rectificador	25
3.7. Operación del inversor. (a) Tensión directa positiva y negativa con respecto al neutro del transformador. (b) Tensión DC del puente inversor V_{di} . (c) Corriente de línea AC	26
3.8. Circuito Equivalente del inversor	27
3.9. VSC trifásico con esquema de control de tensión	28
3.10. Generación de una señal PWM	28
3.11. Principio de funcionamiento del VSC	29

3.12. Funcionamiento del VSC de tres niveles	30
4.1. Enlace DC	32
4.2. Circuito equivalente del sistema DC	32
4.3. Características de los convertidores en estado estable	34
4.4. Controlador de corriente en el rectificador	35
4.5. Medición del ángulo de extinción γ	36
4.6. Unidad de disparo de puerta convencional	37
4.7. Unidad de disparo de puerta DQ	38
4.8. Modelo simplificado del VSC	39
4.9. Estructura del sistema de control independiente de P_c y Q_s	41
4.10. Sistema de control con tensión DC constante	42
4.11. Sistema de control con corriente DC constante	42
4.12. Sistema de control con tensión AC constante	43
5.1. Modelo en estado estable de un sistema HVDC-VSC	45
5.2. Modelo equivalente de un sistema HVDC-VSC	45
5.3. Control del ángulo del rectificador	48
5.4. Control del índice de modulación del rectificador	48
5.5. Control del ángulo del inversor	49
5.6. Control del índice de modulación del inversor	49
6.1. Sistema HVDC-CSC	56
6.2. Modelo de los tiristores	56
6.3. Control de la unidad rectificadora	57
6.4. Control de la unidad inversora	58
6.5. Cambio de la corriente de referencia en un 25%	58
6.6. Tensión DC en estado estable con cambio de referencia	59
6.7. Tensión ánodo-cátodo de la válvula en el rectificador	59
6.8. Corriente del dispositivo de conmutación en el rectificador	60
6.9. Tensión ánodo-cátodo de la válvula en el inversor	60

6.10. Corriente del dispositivo de conmutación en el inversor	60
6.11. Tensión AC de línea entrada del convertor	61
6.12. Análisis de armónicos de la tensión AC de línea	61
6.13. Corriente DC con falla trifásica en el sistema AC de 5 ciclos en el lado del rectificador	62
6.14. Tensión DC con falla trifásica en el sistema AC de 5 ciclos en el lado del recti- ficador	62
6.15. Tensión en la válvula del inversor con falla trifásica de 5 ciclos en el sistema AC en el lado del rectificador	63
6.16. Corriente del dispositivo de conmutación en el inversor con falla trifásica de 5 ciclos en el sistema AC en el lado del rectificador	63
6.17. Tensión en la válvula del rectificador con falla trifásica de 5 ciclos en el sistema AC en el lado del rectificador	64
6.18. Corriente del dispositivo de conmutación en el rectificador con falla trifásica de 5 ciclos en el sistema AC en el lado del rectificador	64
6.19. Corriente DC con falla en la línea DC	65
6.20. Tensión DC con falla en la línea DC	65
6.21. Tensión en la válvula del rectificador con falla en la línea DC	65
6.22. Corriente en válvula del rectificador con falla en la línea DC	66
6.23. Sistema de potencia con enlace HVDC	67
6.24. Tensión DC en rectificador e inversor en ATP	67
6.25. Tensión DC en rectificador e inversor en HAGP	67
6.26. Corriente DC en ATP	68
6.27. Corriente DC en HAGP	68
6.28. Potencia enviada y recibida del enlace DC en ATP	68
6.29. Potencia enviada y recibida del enlace DC en HAGP	69
6.30. Sistema de potencia con un enlace HVDC-VSC	69
6.31. Sistema HVDC-VSC para simular en ATP con su respectivo sistema de control	70
6.32. Tensiones DC del enlace	71
6.33. Corriente DC del enlace	71

6.34. Potencias activas	71
6.35. Potencias reactivas	72
6.36. Índices de modulación	72
6.37. Ángulos del rectificador e inversor	72
6.38. Tensiones DC	74
6.39. Corriente DC	74
6.40. Potencias activas	74
6.41. Potencias reactivas	75
6.42. Índices de modulación	75
6.43. Tensión en válvula	75
6.44. Corriente en válvula	76
6.45. Onda de tensión-línea de salida en el convertidor	77
6.46. Magnitud RMS (kV) de las componentes armónicas de la tensión de línea del convertidor	77
6.47. Tensiones DC ante una falla trifásica en el lado del inversor	78
6.48. Corriente DC ante falla trifásica en el inversor	78
6.49. Tensión que aparece en una válvula ante falla trifásica en el inversor	78
6.50. Corriente que aparece una válvula ante falla trifásica en el inversor	79
6.51. Tensiones DC cuando ocurre una falla en la línea DC en el rectificador	79
6.52. Corriente DC cuando ocurre una falla en la línea DC en el rectificador	80
6.53. Tensión en una válvula cuando ocurre una falla en la línea DC en el rectificador	80
6.54. Corriente en en una válvula cuando ocurre una falla en la línea DC en el rectificador	80
6.55. Tensiones DC cuando ocurre una falla en la línea DC en el inversor	81
6.56. Corriente DC cuando ocurre una falla en la línea DC en el inversor	81
6.57. Tensión en una válvula cuando ocurre una falla en la línea DC en el inversor . .	82
6.58. Corriente en en una válvula cuando ocurre una falla en la línea DC en el inversor	82
6.59. Corriente AC de línea cuando ocurre una falla en la línea DC en el inversor . .	82
B.1. Sistema HVDC_CSC modelado en ATPDRAW	99
B.3. Unidad de disparo de puerta	99

B.2. Puente conversor de seis pulsos modelado en ATPDRAW a) bloque comprimido equivalente b) circuito unidad conversora	100
B.4. Controlador PI	102
B.5. Bloque limitador	103
B.6. Medidor del ángulo α	104
B.7. Unidad generadora de pulsos	106
B.8. Unidad desplazamiento de pulsos	107
B.9. Selector de señal mínima	108
B.10. Sistema de potencia con enlace HVDC modelado en ATPDRAW	110
B.11. Sistema HVDC-VSC modelado en ATPDRAW (Parte 1)	111
B.12. Sistema HVDC-VSC modelado en ATPDRAW (Parte 2)	112
B.13. Convertidores de seis pulsos, a) y b) grupo comprimido equivalente, c) circuito de los convertidores	113
B.14. Sistema de control con tensión DC constante	113
B.15. Sistema de control con corriente DC constante	117
B.16. Medidor de potencia activa y reactiva trifásico a) grupo comprimido, b) circuito del medidor	121
B.17. Generador de secuencia de pulsos PWM	124
B.18. PLL (Phase Locked Loop) que sincroniza el PWM	125

Lista de símbolos

α	Ángulo de ignición
β	Ángulo de ignición del inversor
δ	Ángulo de extinción del rectificador
ϕ	Ángulo de desfase entre la tensión y la corriente de línea
π	pi
γ	Ángulo de extinción del inversor
μ	Ángulo de conmutación
ω	Frecuencia angular
ATP	Alternative Transients Program
ATPDRAW	Entorno gráfico de ATP
\mathbf{A}_D	Partición del jacobiano correspondiente a derivadas de ecuaciones dinámicas con respecto variables de estado
A_μ	Área de la caída de tensión debida al efecto de conmutación
\mathbf{B}_D	Partición del jacobiano correspondiente a derivadas de ecuaciones dinámicas con respecto a tensiones
\mathbf{C}_D	Partición del jacobiano correspondiente a derivadas de ecuaciones de red con respecto a variables de estado
CSC	Convertidor de fuente de corriente (Current Source Converter)
\mathbf{F}	Vector de ecuaciones dinámicas

G	Vector de ecuaciones de red
HVDC	Corriente directa en alta tensión (High Voltage Direct Current)
HAGP	Herramienta software para el modelado y simulación de sistemas de eléctricos de potencia ante grandes perturbaciones
I_d	Corriente directa
I_L	Corriente RMS de línea
K_p, K_i	Constante del controlador PI
L_C	Inductancia de las fuentes AC
L_d	Indutancia en lado DC
I_{ref}	Corriente DC de referencia
I_{med}	Corriente DC medida
i_1, i_2, \dots, i_6	Corrientes a través de las válvulas
M	Índice de modulación
PWM	Modulación de ancho de pulso (Pulse Width Modulation)
PLL	(Phase Locked Loop)
$r, i(\text{subíndice})$	Denota cantidades de rectificador e inversor respectivamente
R_C	Resistencia equivalente de conmutación
U_s	Tensión de barra AC
U_c	Tensión AC del convertidor
U_{dc}	Tensión enlace DC
v_α, v_β	Tensiones de los ejes DQ
v_a, v_b, v_c	Tensiones de fases del sistema trifásico
v_{ab}, v_{bc}, v_{ca}	Tensiones de línea del sistema trifásico
VCO	Oscilador controlado por tensión (Voltage Controlled Oscillators)
V_d	Tensión DC
V_{d0}	Tensión DC ideal sin carga
V_f	Tensión RMS de fase
V_p	Tensión pico del sistema AC

VSC

Convertidor de fuente de tensión (Voltage Source Converter)

Y_D

Partición del jacobiano correspondiente a derivadas de ecuaciones de red con respecto a tensiones

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

El diseño de un sistema de transmisión busca transmitir la mayor cantidad de potencia con las menores pérdidas, la menor caída de tensión y los menores costos asociados con los equipos y el mantenimiento. En este sentido se han desarrollado nuevas tecnologías que han mejorado sustancialmente estos aspectos tales como los sistemas de transmisión en corriente directa, los FACTS, transformadores de mayor eficiencia, mejores aislamientos y utilización de superconductores entre otras. Hay otros factores que influyen en el diseño como lo son el incremento de los costos de los terrenos de servidumbre para la construcción de líneas de transmisión, la imposibilidad de construir nuevas líneas aéreas en las grandes ciudades y las consideraciones medioambientales. Además de esto, se busca obtener beneficios adicionales como el mejoramiento de la estabilidad del sistema de potencia y la reducción de armónicos.

Los sistemas de transmisión en corriente directa se presentan como una solución a muchos de estos aspectos, como la reducción de pérdidas en la línea DC porque utiliza todo el área del conductor al no presentarse el efecto piel, al utilizar todo el área del conductor puede transmitirse mayor cantidad de potencia en comparación con un sistema AC. La caída de tensión que se presenta en la línea DC es de tipo resistiva de menor magnitud que la caída de tensión de tipo inductiva y resistiva que se presenta en AC. Los costos de los equipos es viable a medida que aumenta la longitud del enlace y el costo de mantenimiento es menor que en los sistema AC. Los terrenos de servidumbre son menores al utilizar menos conductores que un sistema trifásico y torres mas sencillas, reduciendo el impacto ambiental y visual. Se pueden construir líneas submarinas y subterráneas de gran longitud. Por su rapidez y flexibilidad para controlar la potencia activa y reactiva se mejora la estabilidad del sistema. Estos sistemas generan armónicos que se

eliminan por medio de filtros para que no lleguen al sistema AC.

Para mostrar algunas de las características mencionadas anteriormente, en el presente trabajo se analizarán los sistemas de transmisión en corriente directa describiendo los elementos que los conforman, las diferentes configuraciones y tecnologías; explicando su funcionamiento y se harán simulaciones de estos sistemas en ATP (Alternative Transients Program) y HAGP (Herramienta software para el modelado y simulación de sistemas de eléctricos de potencia ante grandes perturbaciones).

1.2. Historia de los sistemas de transmisión en corriente directa

La transmisión de energía eléctrica fue desarrollada originalmente en corriente directa. Las primeras redes de distribución instaladas en Europa y USA funcionaron en DC y baja tensión, pero gran parte de la energía generada se perdía en los cables. El cambio de corriente directa a alterna en la distribución de energía eléctrica se debe principalmente al perfeccionamiento del generador en AC y el invento del transformador que permitía variar de forma sencilla y eficiente el nivel de tensión, lo que permitió el transporte de energía eléctrica a grandes distancias con menores pérdidas [Frau,2005].

El desarrollo de la distribución en DC continuó en paralelo con la distribución AC. En 1929 se inició el desarrollo de las válvulas de mercurio en los procesos de transmisión y conversión de energía eléctrica para altas tensiones y potencias. A partir de la Segunda Guerra Mundial, con el incremento de las necesidades energéticas, aumentó el interés en enlaces a larga distancia, principalmente en Rusia y Suecia. Así en 1950 se construyó un enlace experimental de 116 km entre Moscú y Kasira a una tensión de 200 kV. El primer sistema comercial se construyó en 1954 y unió mediante un cable submarino de 98 km la isla de Gotland con Suecia. Este sistema funcionaba a una tensión de 100 kV y transportaba hasta 200 A (200 MW).

En 1967 se empezaron a utilizar válvulas de estado sólido (tiristores) en la transmisión HVDC, siendo Gotland el primer enlace en utilizar esta tecnología. Se utilizaron 180 tiristores en serie. Un año más tarde, en la interconexión Cahora Bassa-Apollo se conectaron 280 tiristores en serie con una tensión de 533 kV, una potencia de 1920 MW y una longitud de 1420 km.

Los mayores proyectos realizados hasta la fecha son:

- Mayor enlace construido (Itaipu, Brasil): 6.300 MW, ± 600 kV. Año 1985.
- El mayor convertidor (Gorges-Changzhou, China): 1.500 MW, 500 kV. Año 2002.
- El cable subterráneo de mayor longitud con tecnología VSC (Murraylink, Australia): 180 km, 200 MW. Año 2002.
- El mayor sistema VSC (Cross Sound, USA): 330 MW. Año 2002.
- Primera carga en alta mar (plataforma petrolífera Troll, Noruega): 2x42 MW. Año 2002.
- Primer sistema multiterminal (Québec-Nueva Inglaterra, Canadá): 2000 MW. Año 1992. [Frau,2005]

1.3. Motivación del trabajo

Actualmente existen dos sistemas de transmisión de energía eléctrica la HVAC (High Voltage Alternating Current) la cual domina este sector, seguida de la HVDC (High Voltage Direct Current) que posee pocas instalaciones a nivel mundial, esto como consecuencia del alto costo que implicaba la construcción de estos sistemas. En los últimos años los sistemas de transmisión en corriente directa se están convirtiendo en una alternativa frente a los sistemas de transmisión en corriente alterna por las ventajas que ofrece, como la flexibilidad en el manejo de la potencia entregada, la interconexión de sistemas de diferentes frecuencias de operación sin necesidad de sincronismo, la transmisión de potencia a través de grandes distancias con pocas pérdidas y sin problemas de estabilidad. Una desventaja que tienen es el costo elevado para pequeñas distancias en comparación con la transmisión en CA. A medida que la electrónica de potencia mejora los dispositivos de estado sólido, la transmisión en corriente directa se hace más viable y menos costosa y es tomada en cuenta en más proyectos en el mundo. En América del Sur ya hay proyectos consolidados. Estos cambios plantean la necesidad de entender y estar en capacidad de desarrollar proyectos utilizando tecnologías HVDC.

1.4. Objetivos

El objetivo principal de esta tesis es modelar y simular sistemas de transmisión en corriente directa y tiene como objetivos específicos:

- Modelar en ATP los elementos que conforman el sistema HVDC como son los rectificadores, inversores y cables.
- Hacer un modelo de un sistema HVDC en ATP teniendo en cuenta las exigencias de los dispositivos que lo conforman, ante cortocircuito y operación normal.
- Hacer un modelo reducido de un sistema HVDC para integrarlo a la herramienta HAGP.
- Simular un sistema de potencia que contenga un enlace en corriente directa en ATP y HAGP y comparar los resultados.

1.5. Organización del documento

El documento está conformado por siete capítulos y dos apéndices.

En el capítulo 2 se abordan las configuraciones de los enlaces de transmisión en corriente directa y se describen los elementos que los conforman.

En el capítulo 3 se da una descripción de las unidades convertoras CSC y VSC. Explicando su funcionamiento.

En el capítulo 4 se modelan los sistemas HVDC con su respectivo sistema de control.

En el capítulo 5 se plantea un modelo reducido del sistema HVDC-VSC para ser incluido en la herramienta HAGP.

En el capítulo 6 se muestran resultados numéricos de ejemplos de simulación de los sistema HVDC analizados.

En el capítulo 7 se dan las conclusiones y observaciones del trabajo realizado.

En el apéndice A se da una guía del usuario de HAGP y se incluyen los archivos de simulación.

En el apéndice B se describen los modelos de simulación que se crearon en ATP.

Capítulo 2

Generalidades de los sistemas HVDC

En el presente capítulo se dará una breve introducción a los dispositivos y enlaces DC, esto permitirá conocer las diferencias entre los enlaces DC y cada una de sus ventajas y condiciones para su utilización.

2.1. Configuraciones de los sistemas HVDC

Para la construcción de enlaces en corriente directa, existen diferentes tipos de configuraciones, que van desde de enlaces monopolares a bipolares de acuerdo con la potencia que se desee transmitir o al soporte o especificaciones de los elementos. Estas configuraciones están constituidas por unidades convertoras, estando integradas por las válvulas e interconectadas por el cable de transmisión DC.

2.1.1. Sistema HVDC monopolar con retorno por tierra

Este sistema utiliza un único conductor para transmitir energía eléctrica, realizando su retorno por tierra o por mar mediante electrodos conectados a las unidades convertoras.

Esta configuración se da a partir de las consideraciones de costos, sobretodo, del cable de transmisión. Asimismo, dicha configuración es la primera etapa para el desarrollo de un sistema bipolar. Los arreglos monopolares varían de unidades convertoras de 6-pulsos hasta unidades de 12-pulsos, conectadas en serie o paralelo en los terminales del sistema de transmisión HVDC. La utilización de más unidades convertoras se pueden dar por las siguientes razones [Std-1030, 1987] :

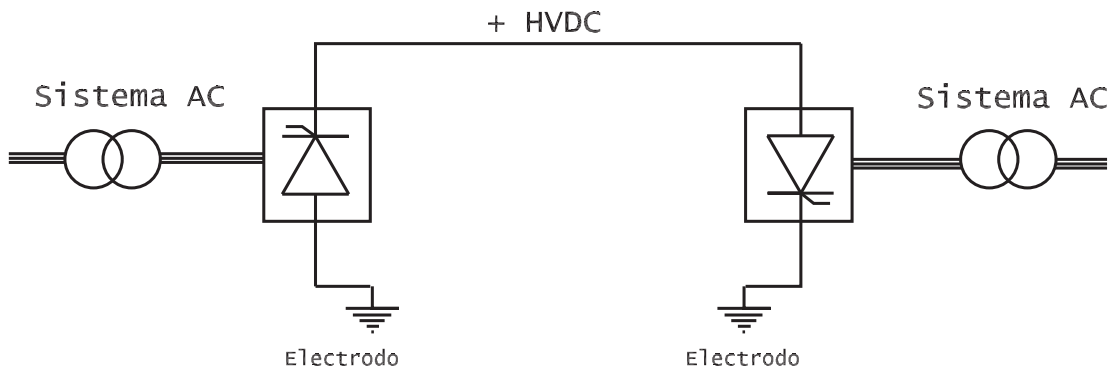


Figura 2.1: Sistema HVDC monopolar con retorno por tierra

- Asegurar parcialmente la capacidad de transmisión durante la salida de servicio de una unidad convertidora.
- Completar el proyecto en etapas.
- Obtener una mayor capacidad de transmisión.
- Por limitaciones físicas de los transformadores.

2.1.2. Sistema HVDC monopolar con retorno metálico

Este sistema monopolar con retorno metálico de la figura 2.2 utiliza dos conductores, uno en alta tensión para la transmisión de energía eléctrica y el otro conductor por el cual se realiza el retorno con tensión reducida. El neutro del sistema monopolar en la subestación se conecta a la red de tierra de la estación o a un electrodo.

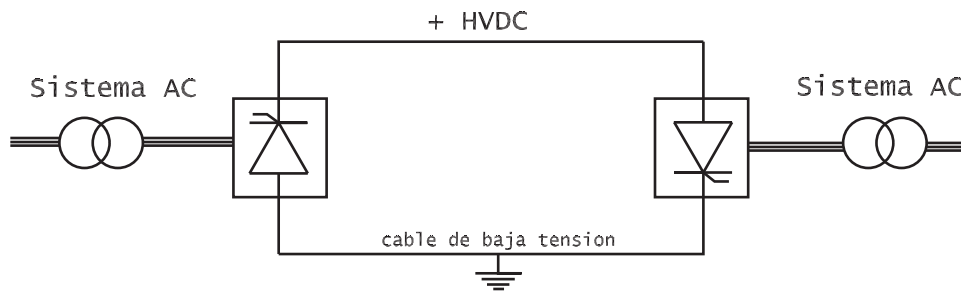


Figura 2.2: Sistema monopolar HVDC con retorno metálico

Esta configuración generalmente se emplea [Std-1030, 1987] :

- Durante la primera etapa de construcción de un sistema bipolar y si el flujo de corriente por tierra no es deseable.
- Si la transmisión se realiza a cortas distancias, por lo cual, la construcción de electrodos de línea y tierra no es viable.
- Si la resistividad de la tierra es lo suficientemente alta, como para construir una puesta a tierra eficiente y económicamente viable.

2.1.3. Sistema HVDC bipolar con retorno por tierra

El sistema bipolar es la combinación de dos polos monopolares, empleado cuando se supera la capacidad de transmisión de un enlace monopolar. El flujo de potencia se realiza en una sola dirección. En esta configuración, un polo tendrá polaridad positiva con respecto a tierra y el otro tendrá polaridad negativa con respecto a tierra. Por lo tanto, para invertir el flujo de corriente en este sistema es necesario invertir la polaridad de los polos, de la misma forma es importante resaltar que cuando ambos polos están en operación, el desequilibrio de corrientes fluye por el camino a tierra y este valor de corriente es normalmente bajo.

Esta configuración proporciona un alto grado de flexibilidad en su operación, ya que puede trabajar a una capacidad reducida de potencia en caso de fallas o mantenimiento de uno de sus polos, debido a que la corriente del polo en avería o mantenimiento será conducida a través del retorno de tierra, y en caso de falla, la corriente será aislada.

En el caso de que se pierda una línea de transmisión de algún polo, las unidades convertoras pueden ser conectadas en paralelo, utilizando maniobras adecuadas para cambiar la polaridad de uno de los polos de la estación, permitiendo a ambos polos operar en la configuración monopolar con retorno por tierra.

2.1.4. Sistema HVDC bipolar con neutro metálico

La configuración bipolar con retorno metálico se utiliza cuando las corrientes de tierra son muy altas y la distancia entre los terminales del sistema HVDC es corta, o cuando no es posible colocar un electrodo por alguna razón, por ejemplo, alta resistividad de la tierra. En presencia de estas condiciones es necesario construir el sistema con un neutro metálico, para que este conductor pueda transportar las corrientes de desequilibrio durante la operación bipolar. De

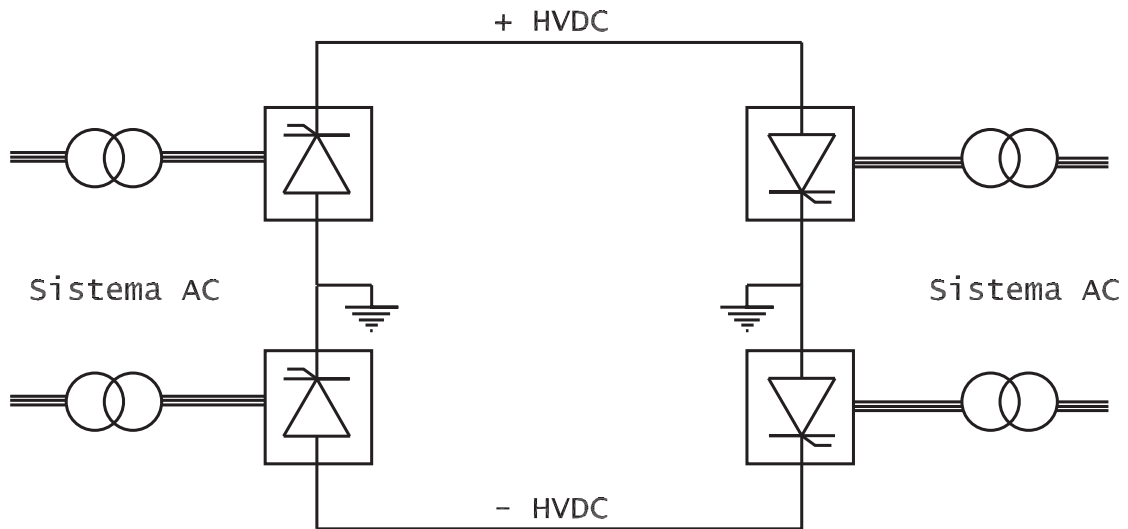


Figura 2.3: Sistema HVDC bipolar con retorno por tierra

igual forma, también se utiliza como camino de retorno cuando la línea de transmisión de un polo está fuera de servicio. Este conductor neutro solo requiere aislamiento para baja tensión, pero puede ser completamente aislado, sirviendo como conductor de respaldo si alguno de los conductores de los polos no estuviese disponible [Std-1030, 1987].

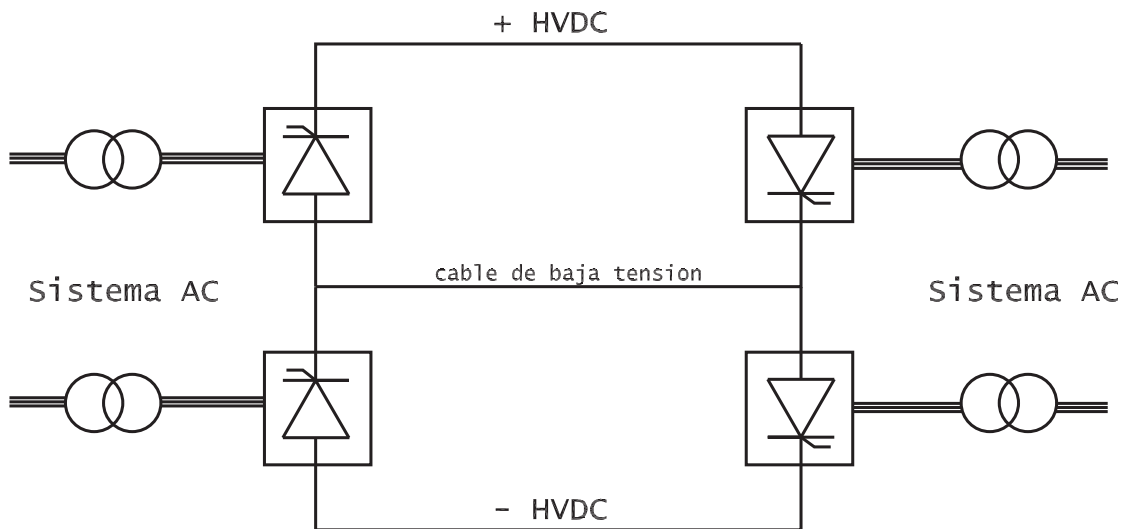


Figura 2.4: Sistema HVDC bipolar con neutro metálico

2.1.5. Sistema HVDC Back-to-Back

En este arreglo no hay línea de transmisión DC y ambas unidades convertoras están localizadas en la misma subestación. Los tipos de configuración de este sistema pueden variar desde conexiones monopolares a conexiones bipolares. En estas configuraciones los filtros DC no son necesarios.

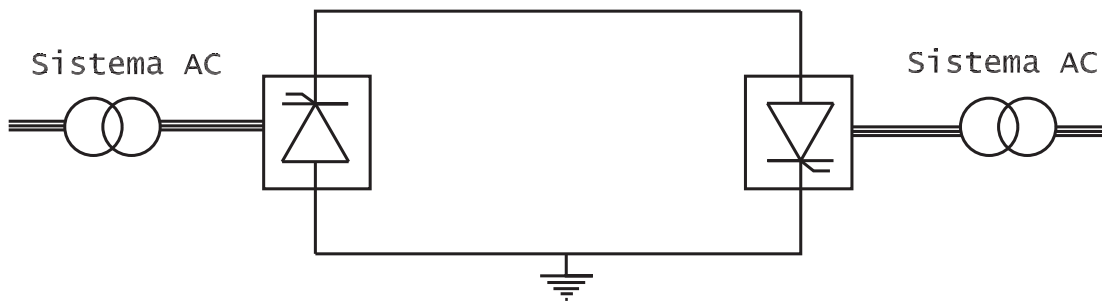


Figura 2.5: Sistema HVDC Back-to-Back

Los sistemas back-to-back son principalmente empleados para la transmisión de potencia entre sistemas AC de diferentes frecuencias o sistemas que no puedan ser sincronizados. Este sistema presenta una diferencia con los demás sistemas HVDC, porque además de no tener línea de transmisión DC, pueden manejar tensiones bajas con corrientes elevadas.

2.2. Componentes del sistema HVDC

Los principales componentes son las válvulas, los filtros AC y DC, transformadores, líneas de transmisión y cables, que de acuerdo a sus características permiten adaptar los sistemas HVDC para resolver diferentes problemas, como mejoras en el control, en la capacidad de transmisión, reducción de armónicos entre otras.

2.2.1. Tipos de válvulas

Existen diferentes tipos de válvulas como lo son las de conmutación natural, las de conmutación forzada y las autoconmutadas.

Para trabajar en altas tensiones y corrientes las válvulas están formadas por varios dispositivos conectados en serie o en paralelo, protegidos con circuitos que reducen los esfuerzos producidos por los cambios de corriente di/dt y tensión dv/dt que ocurren en los procesos de conmutación.

Válvulas de conmutación natural

Estas válvulas están formadas por tiristores de tipo SCR (Silicon Controlled Rectifiers), estos dispositivos son semicontrolados porque se puede seleccionar el momento (ángulo) de disparo o encendido durante la polarización directa del dispositivo, pero no es posible controlar el apagado. El apagado ocurre cuando la corriente que fluye por éste sea cero. Estas válvulas tiene la capacidad de soportar grandes tensiones y corrientes y por esta razón son empleadas en la conversión de grandes cantidades de potencia.

Válvulas de conmutación forzada

Estas válvulas están formadas por tiristores acompañados de circuitos auxiliares que hacen posible el apagado en cualquier instante.

La conmutación forzada tiene la desventaja de aumentar el costo de los convertidores y las pérdidas de potencia.

Válvulas autoconmutadas

Este tipo de válvulas están formadas por dispositivos que pueden ser encendidos y apagados en cualquier momento. Las principales características de estos dispositivos es el proceso de conmutación que se consigue con una señal de control en la compuerta, además, se obtienen altas frecuencias de conmutación y no se requieren circuitos externos para la conmutación.

Entre los principales dispositivos autoconmutados que se emplean en HVDC están los de de tipo IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), IGCT(Integrated Gate-Commutated Thyristor), GTO (Gate Turn-Off Thyristor), GCT (Gate-Commutated Thyristor) entre otros. Algunas desventajas de estos son las altas pérdidas de potencia en la conmutación, los niveles de tensión y corriente que manejan son bajos comparados con los que se consiguen con SCR's. Pero es una tecnología que avanza rápidamente en la mejora de las características de operación y en la reducción de los costos de los dispositivos.

2.2.2. Filtros

Para un sistema HVDC hay dos tipos de filtros: los filtros AC y los filtros DC. Los filtros en el lado AC se encargan de eliminar los armónicos generados por la unidad convertidora y de

proporcionar una parte de la potencia reactiva necesaria para el funcionamiento de la misma. Los filtros instalados en el lado DC son para reducir la componente AC de la señal continua que se desea obtener (reducción del rizado). Estos filtros pueden ser de tipo pasivo o activo [Frau,2005].

Los armónicos generados en los convertidores de los sistemas de transmisión en corriente directa, normalmente, no interfieren en el funcionamiento del convertidor, pero se pueden transmitir por las líneas de AC y DC produciendo:

- Corrientes de armónicos excesivos en máquinas sincronas, transformadores, condensadores de factor de potencia u otros equipos.
- Sobretensiones en puntos de las redes.
- Interferencias en los elementos de protección.
- Interferencias en los equipos de comunicación adyacentes

Criterios de diseño

El criterio de diseño de un filtro es reducir el nivel de armónicos a un nivel aceptable en los terminales del convertidor para que no se presente interferencia con sistemas telefónicos.

Estos filtros deben cumplir los siguientes requisitos:

- Distorsión armónica individual

$$D_h = \frac{U_h}{U_1} \leq 1\%$$

- Distorsión armónica total

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{U_h}{U_1}\right)^2} \leq 1\%$$

- Factor de influencia telefónica:

$$TID = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{U_h TIF_h}{U_1}\right)^2} \leq 40$$

donde

U_h = Tensión fase-tierra del h armónico.

U_1 = Tensión nominal fase-tierra a la frecuencia fundamental.

TIF_h = Factor ponderante de cada armónico según documento EEI 6068 (1960).

Tipos de filtros

Para sistemas HVDC se utilizan normalmente filtros shunt, porque:

- Son capacitivos a la frecuencia fundamental y producen potencia reactiva en adelanto.
- No aumentan apreciablemente la regulación del sistema AC.
- La reactancia de conmutación del convertidor es tan baja como sea factible, ya que el filtro es aproximadamente un cortocircuito de las corrientes armónicas.

El filtro shunt normal, sintonizado a una sola frecuencia (pasabanda), presenta una baja impedancia (resistiva) a la frecuencia resonante, estando definida la agudeza de la resonancia por

$$Q = \frac{\omega_n L}{R}$$

Donde $\omega_n = 2\pi * \text{Frecuencia resonante}$.

Los filtros de sintonía doble o triple tienen dos o tres frecuencias resonantes, comportándose de forma similar a dos o tres filtros simples en paralelo. Los filtros pasabajos presentan una baja impedancia resistiva sólo a frecuencias elevadas.

En la figura 2.6 se muestran las principales configuraciones de filtros empleadas en HVDC.

2.2.3. Líneas de transmisión

El 88 % de la capacidad instalada en HVDC corresponde a líneas aéreas y el 12 % a cables subterráneos y submarinos [Frau,2005].

Las líneas aéreas de un sistema HVDC presentan ventajas respecto a las líneas en HVAC. Una de ellas es el tamaño de las torres que son mas pequeñas porque el número de cables es menor que en los sistemas AC, lo cual hace que el terreno de servidumbre sea menor. El diseño mecánico y eléctrico de las torres es similar al de las torres de AC, con las diferencias de la configuración de los conductores, los requerimientos de campo eléctrico y el diseño de aisladores.

Para líneas subterráneas y submarinas existen diferentes tecnologías de cables DC, algunas de ellas comunes a los existentes en AC, entre estos tipos de cables están [Frau,2005] :

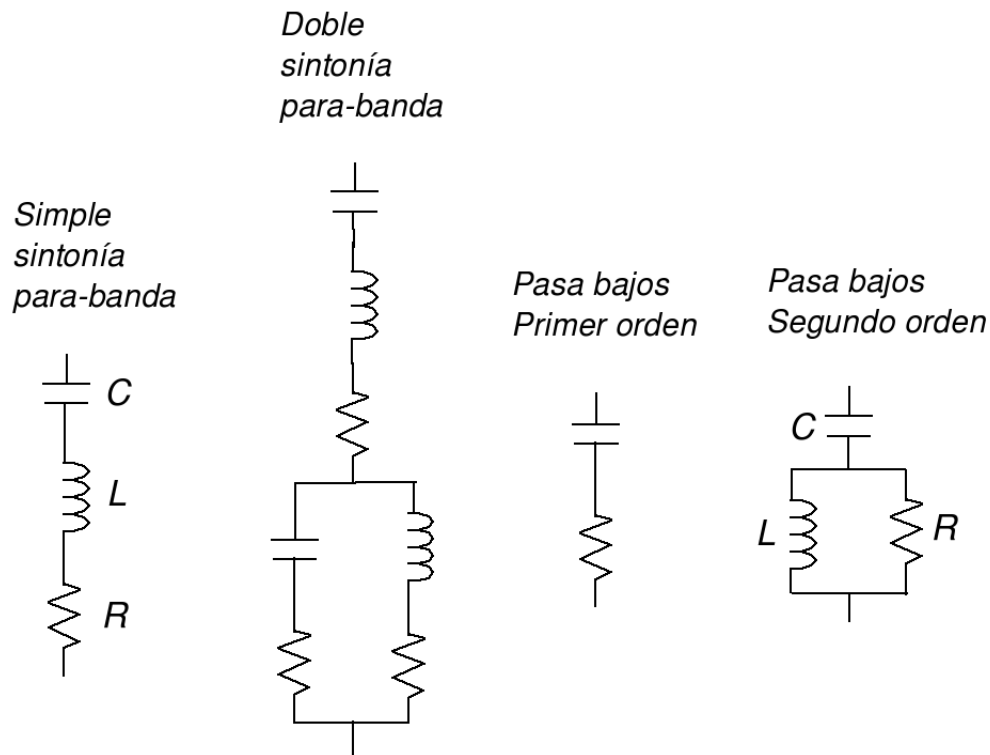


Figura 2.6: Principales configuraciones de filtros shunt

- **Cable de Papel Impregnado (MI Mass Impregnated):** Está formado por un conductor central de cobre laminado cubierto por capas de papel impregnado en aceite y resinas. Luego tiene capas de polietileno extruido y acero galvanizado que lo protege de la corrosión y contra las deformaciones mecánicas durante su funcionamiento. También suele reforzarse con una capa de acero y/o plomo.
- **Cable de aceite (OF Oil Filled):** Este tipo de cable es similar al MI, pero utiliza un papel impregnado de menor densidad y un conducto longitudinal en el eje del conductor, para el aceite refrigerante de circulación forzada. Su longitud está limitada a 100 km debido a la necesidad de hacer circular el líquido refrigerante a lo largo del cable. Además el riesgo de fugas hacen cuestionar el uso de este tipo de cables por razones ambientales.
- **Cable XLPE (Cross-Linked polyethylene):** Este cable utiliza como aislante un polímero extruido, lo que lo hace un cable con aislamiento seco. Este material permite una temperatura de trabajo de 90°C y una temperatura de cortocircuito hasta 250°C . Este cable también es utilizado en transmisión y distribución en AC.

- Cable PPLP (Polypropylene Laminated Paper): Utiliza un aislamiento formado por capas de papel y polipropileno laminado con el objetivo de reducir las pérdidas dieléctricas. Se utiliza en HVDC debido a su comportamiento térmico y a su aislamiento, superiores a los de papel impregnado, lo que aumenta la capacidad de transporte de potencia. Actualmente se encuentra en pruebas.
- Extruido para VSC: Esta tecnología aparece con el objetivo de superar las limitaciones de los cables extruidos existentes en HVDC convencional. Estos nuevos cables plásticos combinan gran capacidad para trabajar a altas tensiones en DC (100 kV) con el bajo peso (1 kg/m) y potencias elevadas (mayor de 30 MW).

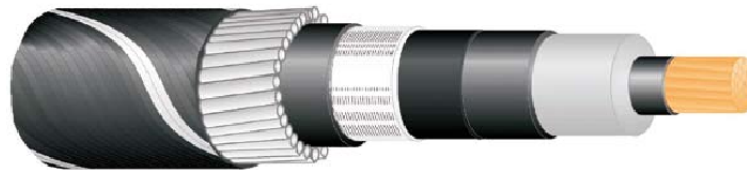


Figura 2.7: Cable extruido VSC (Figura tomada de ABB)

2.2.4. Transformadores de conversión

Este elemento es parte esencial del sistema HVDC, puesto que permite:

- Un desfase de 30° entre las tensiones que se suministran a los polos cuando la configuración es de 12 pulsos, para la reducción de armónicos, especialmente 5^{th} y 7^{th} armónicos [Carlson, 1996].
- Aisla los sistemas AC y DC para evitar que una tensión DC entre al sistema AC.
- Reduce las corrientes de cortocircuito y el rizado de las corrientes de conmutación.
- Entrega un nivel de tensión adecuado al convertidor.

Capítulo 3

Circuitos de las unidades conversoras

Los sistemas de transmisión de corriente directa en alta tensión requieren unidades conversoras que tengan la capacidad de convertir la energía eléctrica alterna a directa y viceversa. Para este proceso se cuenta con dos unidades conversoras básicas de configuración trifásica, las cuales son:

- Unidad conversora de fuente de corriente (CSC)
- Unidad conversora de fuente de tensión (VSC)

La unidad CSC de sus siglas en inglés Current Source Converter es la más utilizada para transmitir grandes potencias debido a que utilizan válvulas de tiristores que soportan altas tensiones, sin embargo, en los años 90 se desarrolló una nueva tecnología llamada VSC (Voltage Source Converter), la cual es una alternativa económicamente viable debido al desarrollo de elementos de electrónica de potencia, que permiten utilizar técnicas PWM para obtener mayor control de potencia activa y reactiva, y la reducción de armónicos.

3.1. Unidad conversora con fuente de corriente constante

La unidad básica conversora de la figura 3.1 consta de seis elementos semiconductores de potencia, los cuales pueden constar según se desee, de válvulas tipo SCR hasta tipo IGBT, conectados en tres ramas paralelas con dos dispositivos en serie por cada rama, obteniendo el circuito conocido como el puente de Graetz de onda completa.

Su nombre de fuente de corriente es debido a que su funcionamiento se basa en mantener la corriente directa constante por medio de una gran inductancia L_d en el lado DC. Este flujo de

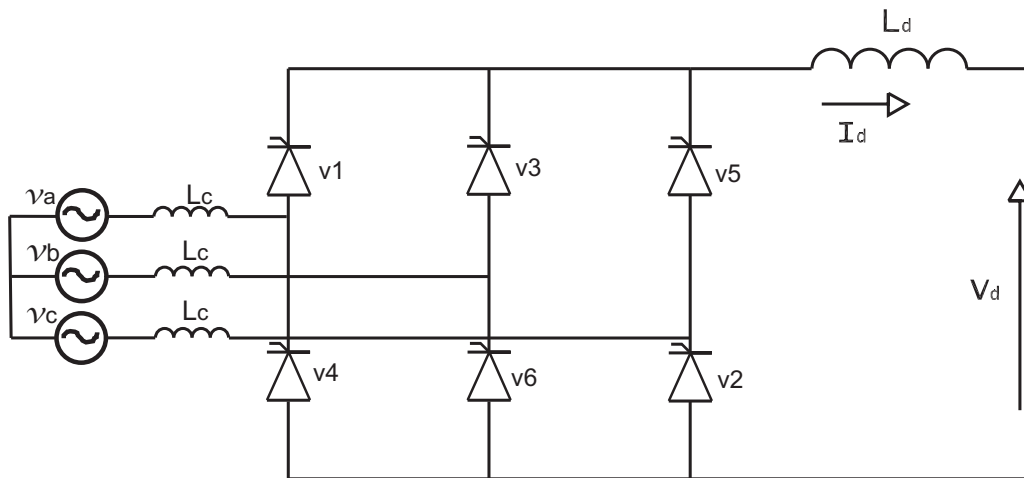


Figura 3.1: Unidad convertora CSC

corriente es unidireccional por lo cual si se quiere cambiar la dirección de potencia debe invertirse la polaridad de la tensión DC.

3.1.1. Análisis de la unidad CSC

El análisis de la unidad convertora CSC se lleva a cabo con la técnica de conmutación natural o de línea. Esta técnica cuenta con una inversión natural de la tensión senoidal de línea a través de las válvulas del puente convertidor. Al iniciar el proceso de conmutación se da pulso en una de las válvulas, luego el pulso se elimina para dar paso a la válvula entrante de la misma fila para conducir la corriente DC. La separación de los pulsos dependerá de la frecuencia del sistema y del control de corriente deseado.

Para el análisis se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones [Kimbark E, 1971]:

- El sistema AC se representará por una fuente ideal de tensión y frecuencia constante, en serie con una inductancia sin pérdidas.
- La corriente directa I_d es constante y libre de rizado, por el efecto de la inductancia L_d que está presente en el lado DC y que funciona como un filtro de corriente pasabajos.
- Las válvulas son interruptores ideales con resistencia igual a cero cuando conducen y resistencia infinita cuando no conducen.

La Figura 3.1 muestra el circuito con la notación adoptada. Las tensiones instantáneas de fase se asumen como:

$$\begin{aligned}v_a &= V_p \cos(\omega t + 60^\circ) \\v_b &= V_p \cos(\omega t - 60^\circ) \\v_c &= V_p \cos(\omega t - 180^\circ)\end{aligned}\tag{3.1}$$

Por lo cual las tensiones de línea a línea son:

$$\begin{aligned}v_{ac} &= \sqrt{3}V_p \cos(\omega t + 30^\circ) \\v_{ba} &= \sqrt{3}V_p \cos(\omega t - 90^\circ) \\v_{cb} &= \sqrt{3}V_p \cos(\omega t + 150^\circ)\end{aligned}\tag{3.2}$$

3.1.1.1. Análisis de la conmutación sin traslape

La conmutación es el proceso por el cual se hace la transferencia de corriente de una válvula a otra, en la misma fila del conversor. Durante este proceso se crea un traslape, que para este análisis no se tendrá en cuenta. Esto quiere decir que el proceso de conmutación ocurre instantáneamente.

La figura 3.2 muestra las formas de onda típicas del conversor, despreciando las inductancias L_C de las fuentes alternas, con un ángulo de ignición α diferente de cero, que determina el tiempo en que la válvula comienza a conducir y es medido a partir del cruce por cero de la tensión de conmutación.

Como se aprecia en la figura 3.1 los cátodos de las válvulas v1, v3 y v5 de la fila superior del conversor son conectados al mismo nodo, consiguiendo que cuando la tensión de la fase A sea más positiva que las tensiones de las fases B y C, solamente la válvula v1 conduzca. Por consiguiente, el potencial común de los cátodos de las válvulas v3 y v5 son iguales al ánodo de la válvula v1, obligando a que las válvulas v3 y v5 no conduzcan.

En la fila inferior del conversor, los ánodos de las válvulas v2, v4 y v6 se conectan al mismo nodo, por consiguiente, la válvula v2 conduce cuando la tensión de fase C sea más negativa que

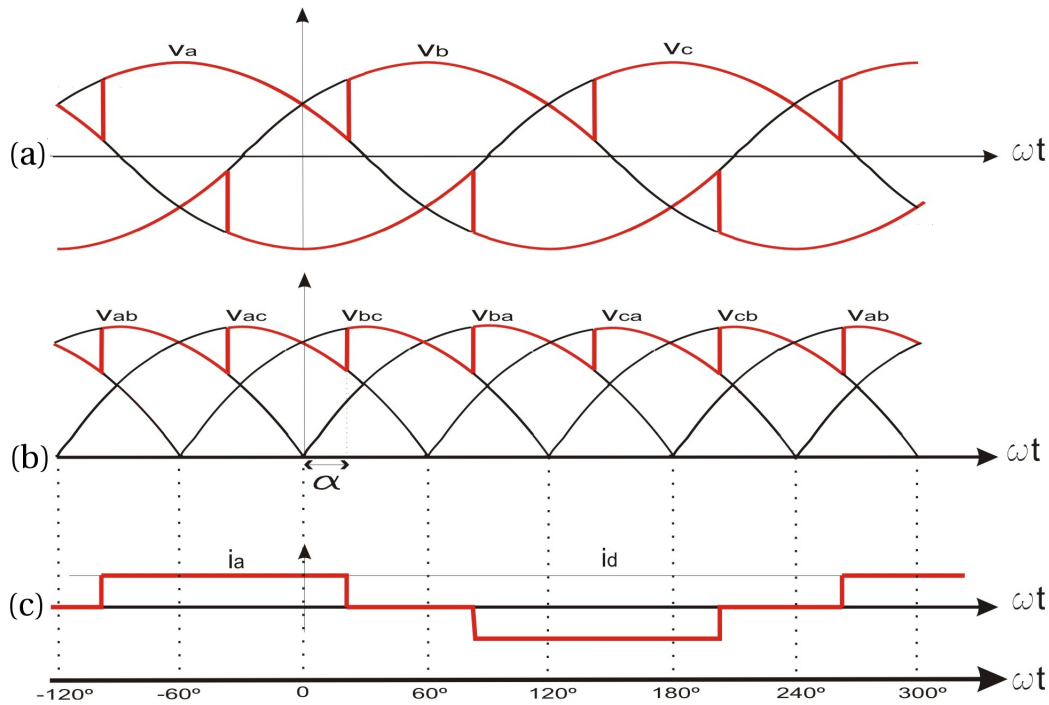


Figura 3.2: Operación del rectificador. (a) Tensión directa positiva y negativa con respecto al neutro del transformador. (b) Tensión DC del puente rectificador V_{dr} . (c) Corriente de línea AC

las fases A y B.

De esta manera, cada válvula conduce por un periodo de 120° eléctricos. Cuando la válvula conduce, la magnitud de la corriente de la válvula es I_d , invirtiéndose la polaridad de la corriente en las válvulas de retorno a $-I_d$ y desfasándose 180° eléctricos.

Tensión promedio La tensión DC del puente rectificador está compuesta por segmentos de 60° de la tensión de línea a línea, de esta forma, la tensión DC promedio se puede encontrar integrando las tensiones instantáneas en un periodo de 60° :

$$V_{do} = \frac{3}{\pi} \int_{-60^\circ}^0 v_{ac} d(\omega t) = \frac{3}{\pi} \int_{-60^\circ}^0 \sqrt{3}V_p \cos(\omega t + 30^\circ) d(\omega t) \quad (3.3)$$

$$V_{do} = \frac{3}{\pi} \sqrt{3}V_p \quad (3.4)$$

Donde V_{do} se llama la tensión DC ideal sin carga con $\alpha = 0$.

Cuando se da un retraso en la ignición de la válvula la tensión DC es:

$$V_d = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha-60^\circ}^{\alpha} v_{ac} d(\omega t) = \frac{3}{\pi} \int \sqrt{3} V_p \cos(\omega t + 30^\circ) d(\omega t) \quad (3.5)$$

$$V_d = V_{do} \int_{\alpha-60^\circ}^{\alpha} \cos(\omega t + 30^\circ) d(\omega t) \quad (3.6)$$

$$V_d = V_{do} \cos \alpha \quad (3.7)$$

Así, el efecto del ángulo de ignición es reducir el promedio de la tensión V_d en un factor de $\cos \alpha$. Dicho ángulo tiene un rango que varía desde 0° hasta 180° , haciendo que V_d este en un rango de V_{do} a $-V_{do}$.

Relación entre las corrientes DC y AC Despreciando las pérdidas en la unidad conversora, la potencia AC debe ser igual a la potencia DC, es decir:

$$P = 3V_f I_L \cos \phi = V_d I_d = I_d V_{do} \cos \alpha \quad (3.8)$$

Donde I_L es el valor RMS de la componente fundamental de la corriente de línea del sistema AC y ϕ es el ángulo de desfase entre la tensión y la corriente de línea. En figura 3.3 se muestra la forma de onda de la corriente de línea con la tensión, la corriente consiste de una señal rectangular con amplitud I_d positiva y negativa con un ancho de 120° . La forma de la onda de corriente es independiente de α mientras que no se presente traslape.

Por el análisis de Fourier, el valor pico de la componente fundamental de la corriente AC del sistema es:

$$\sqrt{2} I_L = \frac{2}{\pi} \int_{-60}^{60} I_d \cos \theta d\theta = \frac{2}{\pi} I_d (2 \sin 60^\circ) \quad (3.9)$$

$$\sqrt{2} I_L = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \quad (3.10)$$

El valor RMS de la componente fundamental de la corriente es:

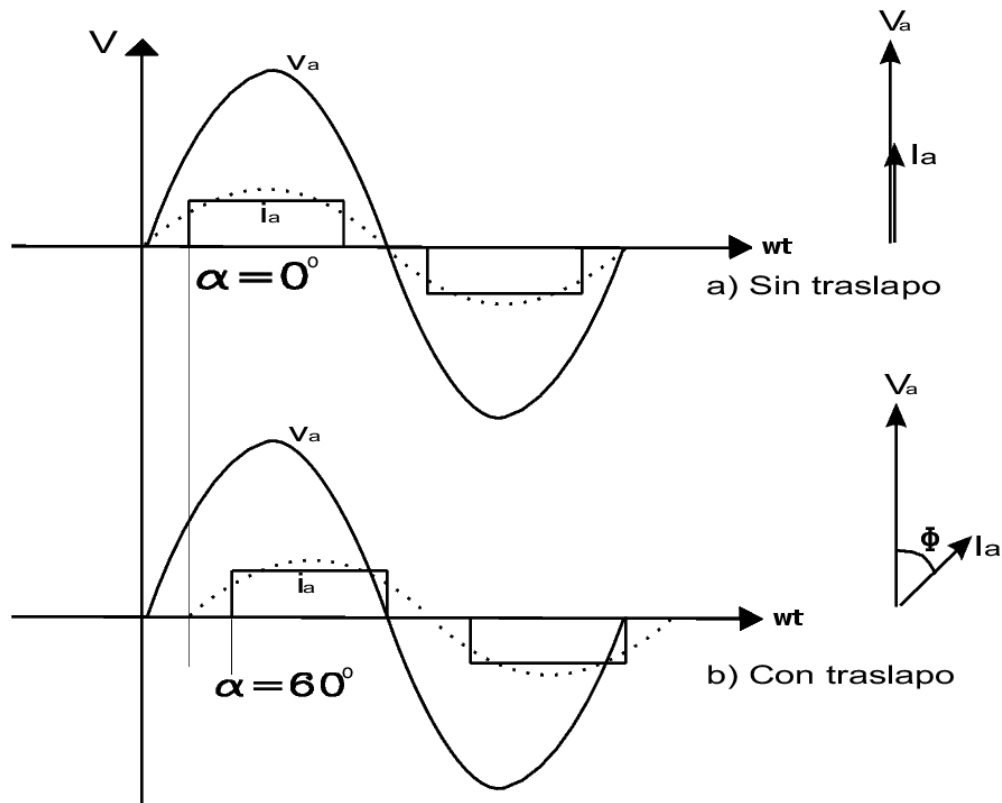


Figura 3.3: Relación entre las corrientes AC y DC con y sin traslape

$$I_L = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \quad (3.11)$$

Reemplazando las ecuaciones (3.11) y (3.4) en la ecuación (3.8) se obtiene:

$$\cos\phi = \cos\alpha \quad (3.12)$$

Con lo cual el ángulo de ignición α desplaza la onda de corriente y su componente fundamental por un ángulo $\phi = \alpha$ como se muestra en la figura 3.3.

3.1.1.2. Análisis incluyendo el traslape en la conmutación

Debido a la inductancia L_c en el sistema AC, las corrientes de línea no pueden variar instantáneamente, por consiguiente, la transferencia de corriente de una fase a otra requiere un tiempo finito llamado tiempo de conmutación o tiempo de traslape, representado como μ/ω , donde μ representa el ángulo de conmutación.

En operación normal, el ángulo de conmutación μ está entre 0° a 60° y conducen alternadamente de dos a tres válvulas. En el circuito la figura 3.4, conducen las válvulas v1, v2 y v3. Durante este intervalo, la corriente va de la válvula v1 a la v3.

Ahora analizando el efecto del traslape:

empezando con $\omega t = \alpha$: $i_1 = I_d$ y $i_3 = 0$

y terminado en $\omega t = \alpha + \mu = \delta$: $i_1 = 0$ y $i_3 = I_d$

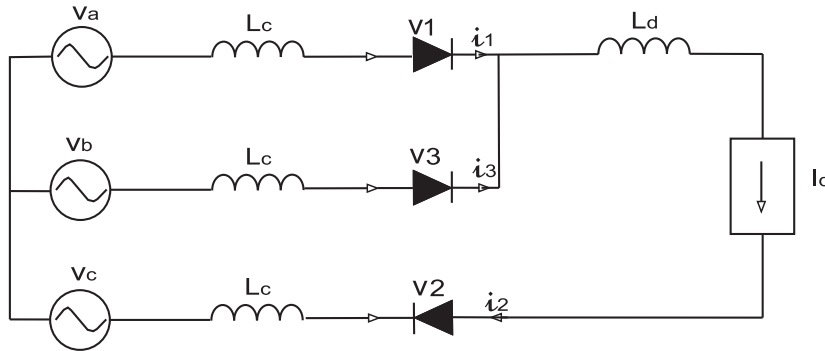


Figura 3.4: Conducción válvulas v1, v2 y v3

Siguiendo el lazo de conmutación, la ecuación de malla que lo describe es:

$$v_b - v_a = L_c \frac{di_3}{dt} - L_c \frac{di_1}{dt} \tag{3.13}$$

Durante la conmutación:

$$i_1 + i_3 = I_d \tag{3.14}$$

entonces:

$$\frac{di_1}{dt} = -\frac{di_3}{dt} \tag{3.15}$$

Con lo cual la ecuación (3.13) llega a ser:

$$2L_c \frac{di_3}{dt} = \sqrt{3}V_p \sin(\omega t) \tag{3.16}$$

Ahora se divide por $2L_c$ y se define la integral con respecto a t , con el límite inferior correspondiente al comienzo de la conmutación $t = \alpha/\omega$ y el límite superior correspondiente al final de la conmutación en función del tiempo, es decir:

$$\int_0^{i_3} di_3 = \frac{\sqrt{3}V_p}{2L_c} \int_{\alpha/\omega}^t \sin(\omega t) dt \quad (3.17)$$

$$i_3 = I_{S2}(\cos\alpha - \cos(\omega t)) \quad (3.18)$$

Donde:

$$I_{S2} = \frac{\sqrt{3}V_p}{2\omega L_c} \quad (3.19)$$

La ecuación (3.18) muestra que la corriente i_3 entrante a la válvula durante la conmutación, está compuesta por una constante $I_{S2}\cos\alpha$ y una senoidal $-I_{S2}\cos(\omega t)$. Esta última retrasa la tensión de conmutación en 90° , debido a que es un circuito puramente inductivo y tiene un valor de cresta de I_{S2} correspondiente a la corriente de cortocircuito de línea a línea en la fuente AC.

Corriente y tensión DC promedio Al reemplazar la condición final de la conmutación $t = \delta/\omega$ en la ecuación (3.18) se obtiene la corriente directa en términos del ángulo de ignición y de extinción.

$$I_d = I_{S2}(\cos\alpha - \cos\delta) \quad (3.20)$$

Una ecuación similar se obtendrá para la caída de tensión directa debido a la conmutación. En la figura 3.5 se observa el efecto de la conmutación en el área A_μ .

La cual corresponde a:

$$A_\mu = \int_{\alpha}^{\delta} v_b - \frac{v_a + v_b}{2} d(\omega t) = \int_{\alpha}^{\delta} \frac{v_b - v_a}{2} d(\omega t) \quad (3.21)$$

$$A_\mu = \frac{\sqrt{3}V_p}{2} \int_{\alpha}^{\delta} \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{\sqrt{3}V_p}{2} [-\cos(\omega t)]_{\alpha}^{\delta} \quad (3.22)$$

$$A_\mu = \frac{\sqrt{3}V_p}{2} (\cos\alpha - \cos\delta) \quad (3.23)$$

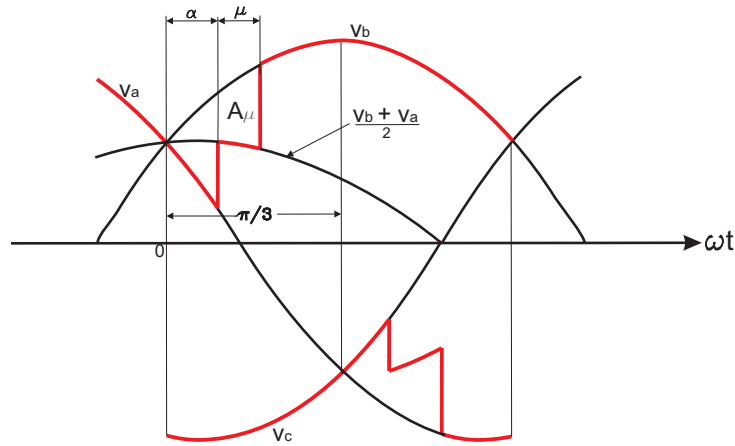


Figura 3.5: Caída de tensión directa debido al traslape

$$\Delta V_d = \frac{3}{\pi} A_\mu = \frac{3\sqrt{3}V_p}{2\pi} (\cos\alpha - \cos\delta) \quad (3.24)$$

$$\Delta V_d = \frac{V_{d0}}{2} (\cos\alpha - \cos\delta) \quad (3.25)$$

Donde ΔV_d es la tensión DC promedio durante la conmutación. Ahora, como ya se obtuvo la tensión de DC sin traslape, que es $V_{d0}\cos\alpha$, la tensión DC total con el efecto del traslape es:

$$V_d = V_{d0}\cos\alpha - \Delta V_d = \frac{V_{d0}(\cos\alpha + \cos\delta)}{2} \quad (3.26)$$

De las ecuaciones (3.20) y (3.25) se deduce que la tensión de caída es directamente proporcional a la corriente:

$$\frac{\Delta V_d}{V_{d0}} = \frac{I_d}{2I_{S2}} \quad (3.27)$$

Por consiguiente:

$$V_d = V_{d0} \left(\cos\alpha - \frac{I_d}{2I_{S2}} \right) \quad (3.28)$$

$$V_d = V_{d0}\cos\alpha - R_C I_d \quad (3.29)$$

Donde R_C se llama la resistencia equivalente de conmutación.

$$R_C = \frac{3}{\pi} \omega L_C = 6fL_C \quad (3.30)$$

Relación entre las cantidades AC y DC De las ecuaciones (3.4) y (3.26), se obtiene la relación entre la tensión DC y la tensión alterna, válida si el ángulo de traslape μ es menor a 60° :

$$V_d = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_p \left(\frac{\cos\alpha + \cos\delta}{2} \right) \quad (3.31)$$

Despreciando las pérdidas, la potencia activa AC es igual a la potencia DC:

$$V_d I_d = 3V_f I_L \cos\phi \quad (3.32)$$

Sustituyendo la ecuación (3.31) en (3.32) se obtiene:

$$I_L \cos\phi = \left(\frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \right) \left(\frac{\cos\alpha + \cos\delta}{2} \right) \quad (3.33)$$

Aproximando:

$$I_L \approx \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \quad (3.34)$$

Esta aproximación cuenta con un error máximo de 4.3 % con $\mu = 60^\circ$ y un 1.1 % para $\mu \leq 30^\circ$ [Kimbark E, 1971].

Siguiendo con estas aproximaciones se tiene que:

$$\cos\phi \approx \frac{\cos\alpha + \cos\delta}{2} \quad (3.35)$$

De la ecuación (3.26) se puede obtener otra expresión para el factor de potencia $\cos\phi$:

$$\cos\phi \approx \frac{V_d}{V_{d0}} = \cos\alpha - \frac{R_C I_d}{V_{d0}} \quad (3.36)$$

La ecuación (3.36) muestra que con el incremento de la carga el factor de potencia decrece y en consecuencia el ángulo de desfase entre la corriente y la tensión AC incrementa.

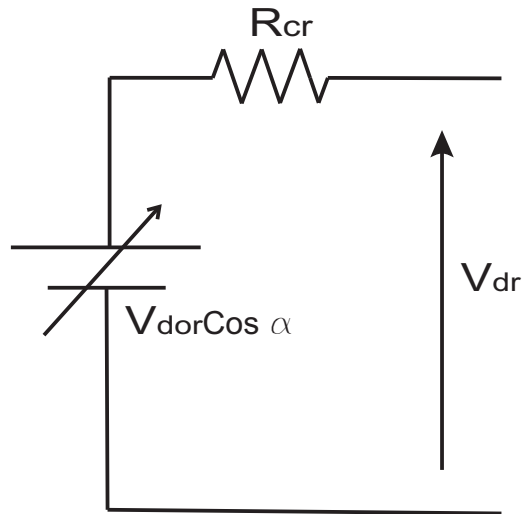


Figura 3.6: Circuito equivalente del rectificador

3.1.2. Funcionamiento como Rectificador

Del análisis anterior, el circuito equivalente para el puente rectificador de la figura 3.6 se puede extraer de la ecuación (3.29), es decir:

$$V_{dr} = V_{dor} \cos \alpha - R_{cr} I_d \quad (3.37)$$

Donde $V_{dor} \cos \alpha$ representa una fuente de tensión directa que varía con el ángulo de ignición α ; R_C es la resistencia debida a la conmutación, aunque R_C es la relación de la caída de tensión y corriente directa no consume potencia [Kimbark E, 1971], y el término $R_{cr} I_d$ representa la caída de tensión debida a la conmutación.

3.1.3. Funcionamiento como Inversor

El funcionamiento del inversor de la unidad convertora de 6 pulsos se presenta en la figura 3.7 y operará como tal si α es mayor a 90° , con lo cual la tensión $V_d = V_{do} \cos \alpha$ se hace negativa. En la práctica, la tensión es cero, ya que la corriente no puede pasar a través de la válvulas desde el cátodo hacia el ánodo. Para que la unidad convertora trabaje como inversor debe tener una fuente de tensión DC mayor que la tensión negativa teórica del convertor y de tal polaridad que produzca la circulación de corriente desde el ánodo hacia el cátodo. De esta manera la corriente DC circula en contra de la tensión del inversor y se transfiere potencia del sistema DC al sistema

AC.

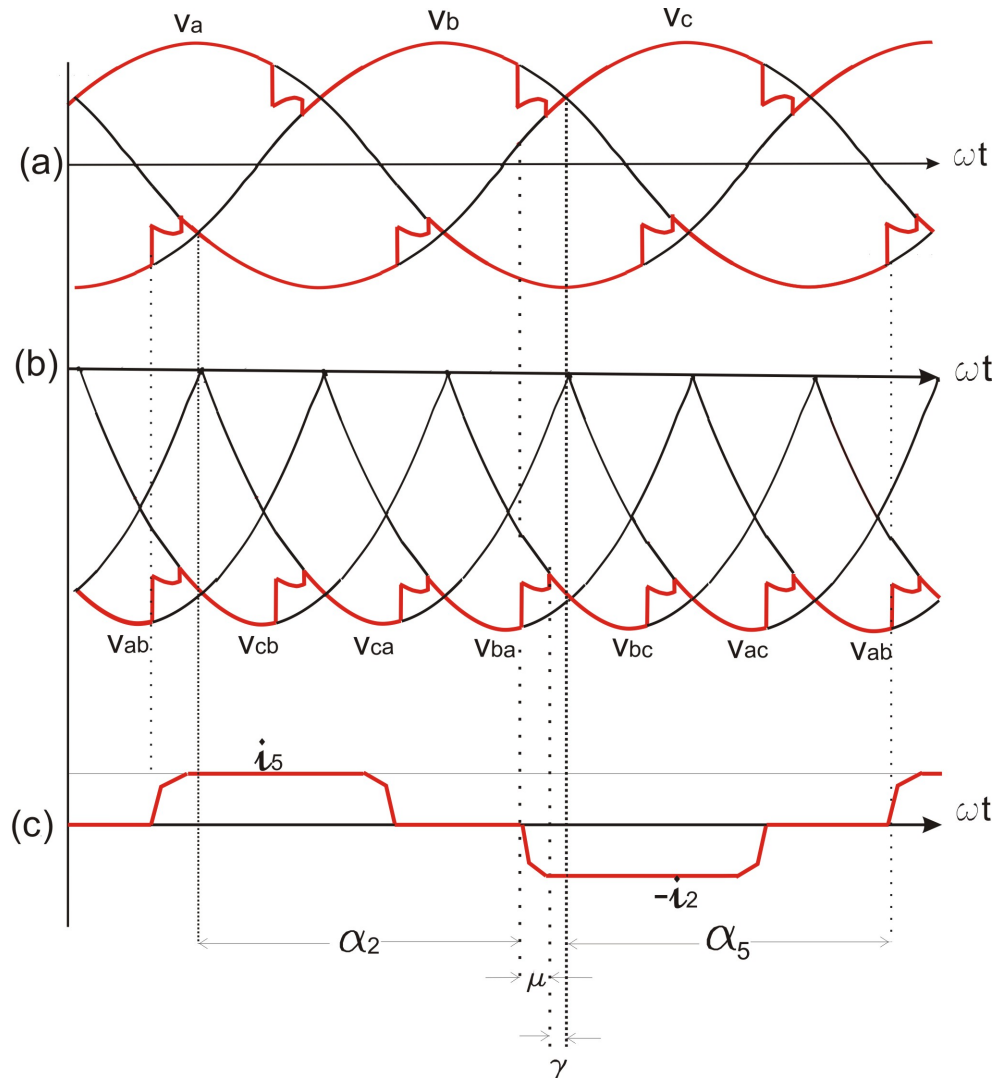


Figura 3.7: Operación del inversor. (a) Tensión directa positiva y negativa con respecto al neutro del transformador. (b) Tensión DC del puente inversor V_{di} . (c) Corriente de línea AC

Ya que el análisis de operación del inversor no es diferente a la operación del rectificador, se obtendrán las mismas ecuaciones para el inversor [Kimbark E, 1971]. Para las ecuaciones del inversor es conveniente usar el ángulo $\beta = 180^\circ - \alpha$ o $\beta = \mu + \gamma$, donde γ es el ángulo de extinción que representa el tiempo de tensión inversa creado en tiristor después de haber caído la corriente a cero, mientras que β es el ángulo de ignición, por lo tanto, a partir de la ecuación (3.26) tenemos que:

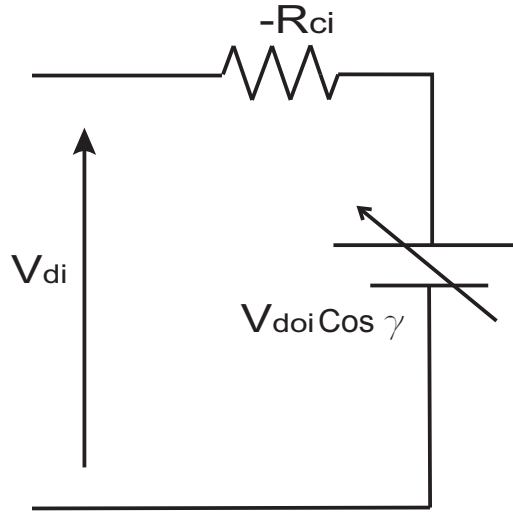


Figura 3.8: Circuito Equivalente del inversor

$$V_{di} = V_{doi} (\cos \gamma + \cos \beta) \quad (3.38)$$

o

$$V_{di} = V_{doi} \cos \gamma - R_{ci} I_d \quad (3.39)$$

Y la expresión para la corriente directa es:

$$I_d = \frac{V_{di}}{\sqrt{2} X_{ci}} (\cos \gamma - \cos \beta) \quad (3.40)$$

Entonces, a partir de la ecuación (3.39) se obtiene el circuito equivalente para el inversor que se muestra en la figura 3.8.

3.2. Unidad convertora de fuente de tensión (VSC)

En la figura 3.9 se muestra un VSC trifásico formado por seis válvulas que pueden ser de tipo IGBT, GTO, SCR con conmutación forzada u otro dispositivo semiconductor, con un diodo en antiparalelo en cada una, estas válvulas reciben una señal de control de tipo PWM que se genera a partir del error que se obtiene entre la señal de referencia V_{REF} y la señal medida V_D [Dixon, 2000].

La señal PWM se obtiene al comparar una señal senoidal proporcional al error con una onda

triangular de alta frecuencia como se muestra en la figura 3.10. La señal PWM se aplica a la válvula de la fase correspondiente.

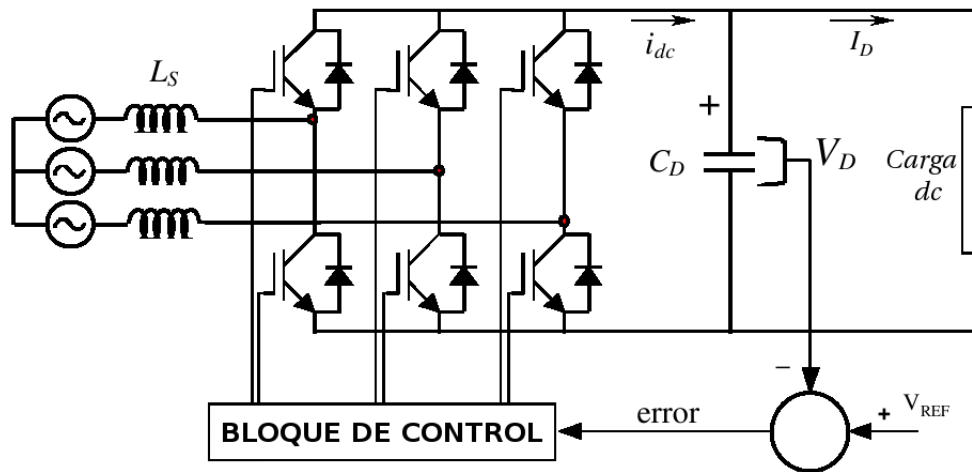


Figura 3.9: VSC trifásico con esquema de control de tensión

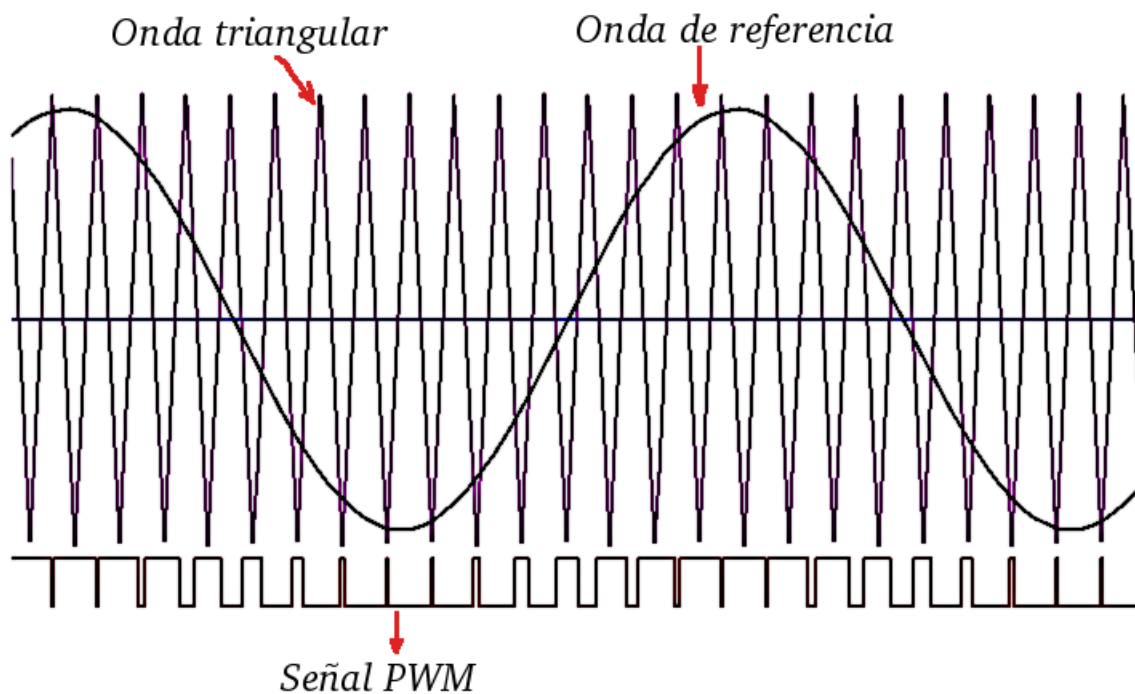


Figura 3.10: Generación de una señal PWM

3.2.1. Funcionamiento del VSC

El principio de operación del VSC se muestra en la figura 3.11. Su función es convertir la tensión DC del capacitor en corriente AC. La polaridad del convertidor se define por la polaridad del puente de diodos, los cuales hacen que el convertidor sea unidireccional en tensión y bidireccional en corriente. Las válvulas se activan por una tensión adecuada en la compuerta. Esta tensión de control puede seguir un patrón de señales PWM. Sin embargo, si una válvula se activa, la válvula complementaria se debe apagar previamente para evitar un cortocircuito en el capacitor. Cuando se activan la válvulas alternadamente se obtiene una tensión AC cuadrada que toma dos valores $+U_{dc}/2$ y $-U_{dc}/2$, en este caso se dice que el VSC es de dos niveles .

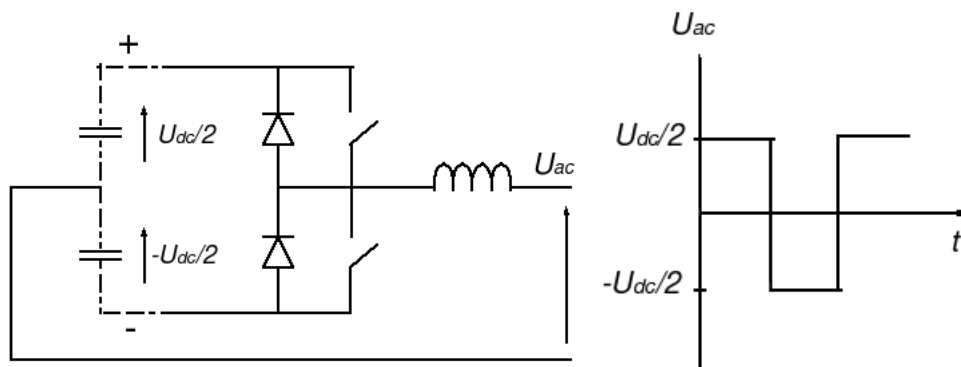


Figura 3.11: Principio de funcionamiento del VSC

En la figura 3.12 se muestra el funcionamiento de un VSC de tres niveles. Este tipo de convertidor cuenta con cuatro válvulas en una rama. La regla de conmutación es que solo dos válvulas que están directamente conectadas pueden ser activadas en cualquier momento, así por ejemplo, S1 y S2 o S2 y S3 o S3 y S4. Activando S1 y S2 el terminal AC se conecta al terminal positivo, cuando S2 y S3 son activadas el terminal AC es conectado al punto medio (MP) a través de los diodos. Activando S3 y S4 se conecta el terminal AC al polo negativo. Así se consigue una señal AC con tres niveles de tensión $U_{dc}/2$, $-U_{dc}/2$ y 0 [Sood V, 2004].

La ventaja de los convertidores multinivel es que a medida que se incrementan los niveles se mejora la señal AC, disminuyendo la cantidad de armónicos generados, facilitando su filtrado, pero esto a su vez incrementa el costo del convertidor porque se requiere mayor número de válvulas y diodos.

Con técnicas PWM como PWM senoidal o PWM vectorial se puede controlar la amplitud y el desfase de la señal AC, así se puede obtener un control de la potencia activa variando el

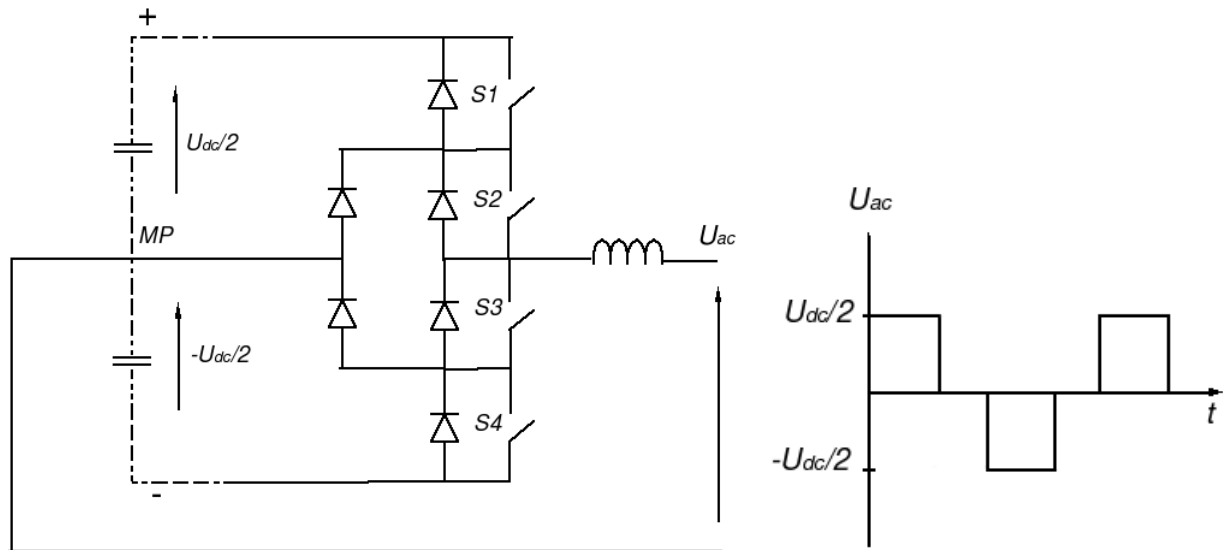


Figura 3.12: Funcionamiento del VSC de tres niveles

desfasaje y controlar la potencia reactiva variando la amplitud. Un VSC se modela como una fuente de tensión variable en amplitud, desfasaje y frecuencia.

Capítulo 4

Modelado del sistema HVDC

En este capítulo se presenta el modelo matemático de los sistemas HVDC, a partir de los circuitos equivalentes obtenidos en el capítulo tres, y del cual, se obtendrá el sistema de control.

4.1. Principios del control del sistema HVDC

La idea principal del sistema de control para las unidades convertoras HVDC está basada en los siguiente parámetros [Arrillaga J, 1998]:

- Control del flujo de potencia entre los terminales.
- Un encendido de las válvulas simétrico bajo condiciones de estado estable.
- La característica del control de corriente con suficiente velocidad y estabilidad para cubrir el cambio de referencia y posibles fallas.
- La sensibilidad a variaciones normales en la frecuencia y tensión de la red AC de alimentación.
- Consumo mínimo de potencia reactiva en las unidades convertoras, sujeta a lograr una condición de mínimo riesgo de falla en la conmutación.
- Limitación de la corriente máxima para evitar daño en los tiristores o algún otro dispositivo del sistema.

Como se aprecia el objetivo principal del control de las unidades convertoras es mantener el enlace DC en un correcto funcionamiento protegiendo los equipos o elementos que lo integran, evitando así las posibles fallas que se presentan en el sistema AC y el enlace DC.

4.2. Modelo del convertor CSC

El sistema de transmisión en corriente directa en alta tensión presentado en la figura 4.1 se puede simbolizar convenientemente por el circuito equivalente de la figura 4.2.

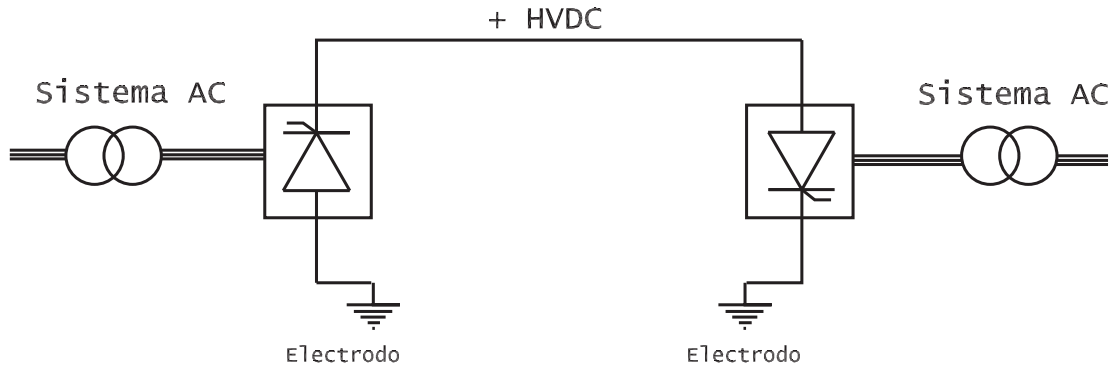


Figura 4.1: Enlace DC

Esta representación sirve para el estudio en estado estable de la transferencia de potencia. El sistema está representado por una inductancia L_d que comprende el reactor en continua y la inductancia de la línea DC, mientras que R comprende la resistencia de la línea DC y la resistencia del reactor.

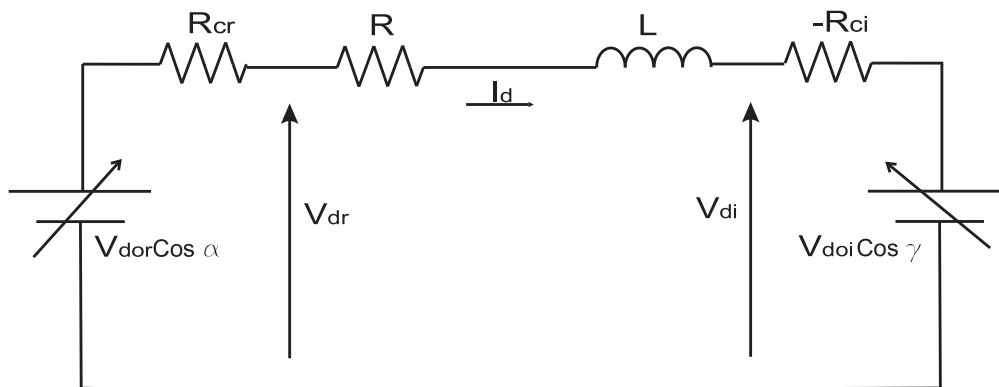


Figura 4.2: Circuito equivalente del sistema DC

La corriente en la línea DC, operando en estado estable está dada por la ley de Ohm, como la diferencia entre las tensiones de los terminales dividida por la resistencia de esta, entonces:

$$I_d = \frac{V_{dr} - V_{di}}{R} \quad (4.1)$$

Donde V_{dr} es la tensión DC en el rectificador y V_{di} es la tensión DC en el inversor.

Sustituyendo V_{dr} y V_{di} por las relaciones obtenidas del estudio de la unidad convertora se obtiene:

$$I_d = \frac{V_{d0r} \cos \alpha - V_{d0i} \cos \gamma}{R} \quad (4.2)$$

La potencia en el terminal del rectificador es:

$$P_{dr} = V_{dr} I_d \quad (4.3)$$

Mientras en el terminal del inversor es:

$$P_{di} = V_{di} I_d = P_{dr} - R_L I_d^2 \quad (4.4)$$

4.2.1. Características de control del Rectificador e Inversor

En la figura 4.3, se muestra la característica del rectificador e inversor, donde el rectificador cuenta con dos segmentos, el primero una línea AC que es la característica del control del ángulo de ignición (CAI), y el segundo la línea AB que es la característica de control de corriente constante (CC), si el regulador de corriente directa es ideal la línea AB será totalmente vertical * [Kimbark E, 1971].

El rectificador mantiene la corriente constante variando el ángulo de ignición, pero para asegurar que el rectificador no falle el ángulo de ignición tendrá un α_{min} , con el cual se tendrá una tensión DC máxima de acuerdo a la ecuación (3.29) y el rectificador operara con el ángulo de ignición constante (CAI).

Como se aprecia en la figura 4.3, la característica del inversor al igual que el rectificador cuenta con dos segmentos, uno de ellos es el control del ángulo de extinción (CAE), línea DG, dado como:

$$V_d = V_{d0i} \cos \gamma + (R - R_{Ci}) I_d \quad (4.5)$$

Donde su inclinación de CAE se debe a que la resistencia de conmutación R_{Ci} es mas grande que la resistencia R de la línea.

*Pero en la práctica esta línea AB no es totalmente vertical ya que tendrá una pendiente negativa alta

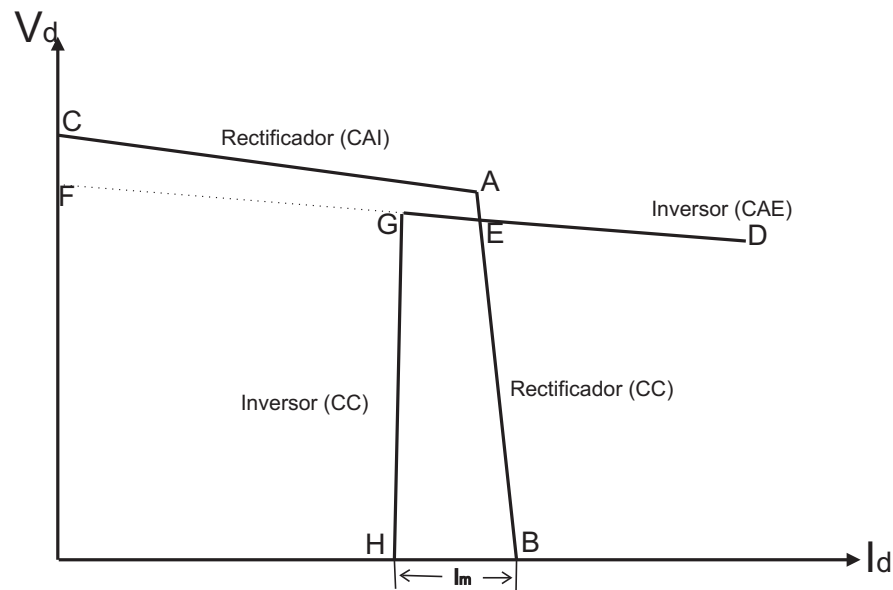


Figura 4.3: Características de los convertidores en estado estable

La otra característica del inversor es el controlador de la corriente constante directa, línea GH, que en sistemas reales tiene una pendiente positiva alta. Esta característica está separada del controlador de corriente constante del rectificador por la corriente marginal I_m . Esta corriente se fija en un 10% o 15% de la corriente del rectificador para asegurar que las dos características de corriente no se crucen entre sí, debido a errores en medición u otras causas [Kundur P, 1994].

En estado estable el punto de operación de las unidades convertidoras es la intersección de las dos características, la cual se puede apreciar en la figura 4.3, manteniendo la corriente directa constante en el enlace DC, con un ángulo de ignición constante, al igual que el ángulo de extinción constante.

4.2.2. Controlador de corriente

El método de control de corriente es una realimentación negativa, normalmente se emplea en el lado del rectificador tal como se muestra en la figura 4.4. Midiendo la corriente DC del sistema y comparando con la corriente de referencia se obtiene el error, el cual alimentará el controlador PI con ganancia proporcional e integral K_p y K_i respectivamente. La salida del controlador PI es una señal proporcional al ángulo de ignición, la cual se compara con la salida de la unidad de disparo de puerta para dar el respectivo pulso a la válvula correspondiente.

La señal de salida del controlador PI está limitada para asegurar que no se presente algún fallo

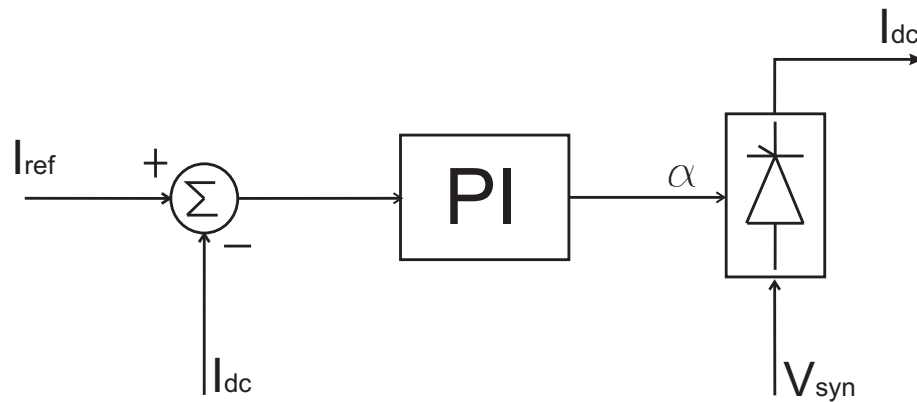


Figura 4.4: Controlador de corriente en el rectificador

en el rectificador, estos límites por lo general están dados para un $\alpha_{min} = 5^\circ$ y $\alpha_{max} = 150^\circ$. Con estos valores limitantes se presenta el control para el ángulo de ignición constante.

4.2.3. Control del ángulo de Extinción en el inversor

Para el control del ángulo de extinción γ se aplica una técnica similar a la del controlador de corriente empleada en el rectificador, midiendo el ángulo de extinción de las válvulas del inversor a partir de la caída de corriente de la válvula a cero hasta que la tensión negativa creada en ese instante cruce por cero tal como se observa en la figura 4.5. Esto quiere decir, que gamma es el periodo de tiempo en el cual la tensión de la válvula es negativa. El control de γ es deseable realizarlo para un $\gamma = 0^\circ$ o $\alpha = 180^\circ$ en la medida que reduce la potencia reactiva del sistema AC. En la práctica alfa se limita de $\alpha = 140^\circ$ a $\alpha = 170^\circ$, tal que el ángulo de extinción γ sea adecuado para asegurar que la unidad convertora no falle [Ainsworth,1968].

4.2.4. Sistema de control de disparo para el convertor

El principal objetivo del control de disparo es proporcionar los pulsos de encendido de los tiristores de la unidad convertora, en relación exacta a su tensión de conmutación. Para lograrlo existen dos técnicas de control:

- Control de fase individual (CFI)
- Control de pulsos equidistantes (CPE)

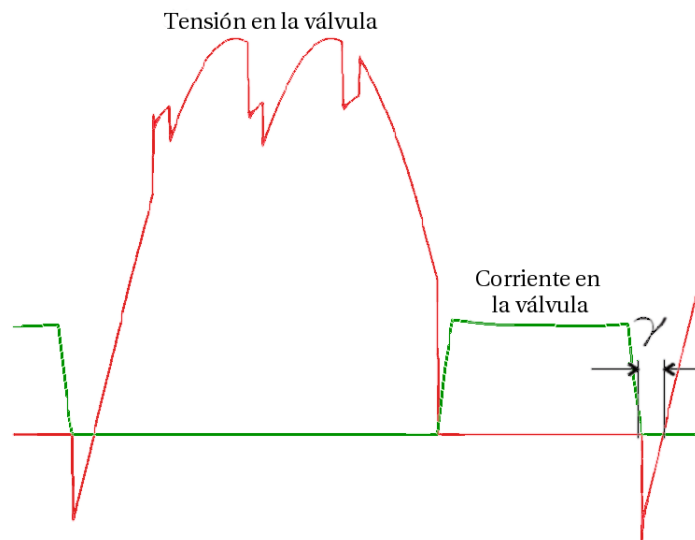


Figura 4.5: Medición del ángulo de extinción γ

Estas técnicas han evolucionado a través de los años, por lo cual, existen versiones diferentes, así que a continuación se dará una breve explicación de su funcionamiento básico.

4.2.4.1. Sistema de control de fase individual

Este sistema fue ampliamente utilizado en los inicios de la tecnología HVDC [Kundur P, 1994] y como su nombre lo indica los pulsos de encendido de las válvulas son generados individualmente a partir del cruce por cero de la tensión de conmutación, los cuales eran vulnerables a la contaminación de armónicos en la forma de onda. Para solucionarlo se implementaron técnicas de filtrado, pero no fueron totalmente exitosas, su gran desventaja fue la generación de armónicos no característicos, las cuales causaban problemas de inestabilidad armónica [Sood V, 2004].

4.2.4.2. Sistema de control de pulso equidistante

En el sistema de CPE, las válvulas son encendidas en igual intervalo de tiempo, esto quiere decir con el mismo ángulo de ignición α , con lo cual este ángulo es adelantado o atrasado igualmente para obtener el modo de control deseado.

La sincronización se realiza a través de un Phase-Locked Oscillator o unidades de disparo de puerta, uno de los cuales esta basado en un oscilador controlado por tensión (VCO) en conjunto con un PLL, llamado la unidad de disparo de puerta convencional, figura 4.6 [Khatri], la señal

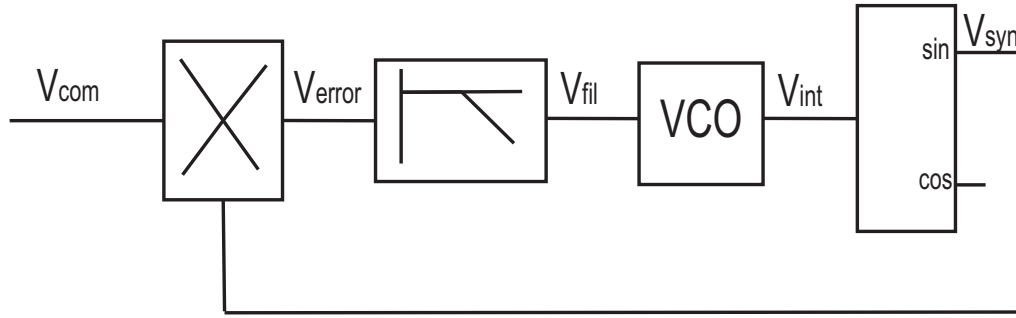


Figura 4.6: Unidad de disparo de puerta convencional

de tensión de conmutación $V_{com} = \text{sen}(\omega t + \theta)$ del sistema AC es multiplicada por la señal de retroalimentación $V_{syn} = \text{cos}(\omega_2 t + \theta_2)$ que es la tensión de sincronización. Dando como señal de error $V_{error} = \text{sen}(\omega t + \theta) * \text{cos}(\omega_2 t + \theta_2)$, luego esta señal de error pasa por un filtro pasa bajos con función de transferencia $\frac{\omega_c}{s + \omega_c}$, donde ω_c es la frecuencia de corte, y la cual se debe diseñar para lograr la sincronización entre V_{syn} y V_{com} en el tiempo mas corto posible al igual que el tiempo de integración en el VCO, la señal V_{int} es usada para modular la fase y la frecuencia del oscilador sen-cos para generar la señal de salida.

El otro tipo de unidad de disparo de puerta es el DQ, figura 4.7 [Sood, 1994], el cual cuenta con una etapa de transformación de las tensiones trifásicas de conmutación V_a , V_b y V_c , a las tensiones en los ejes DQ V_α y V_β , usando las siguientes ecuaciones:

$$V_\alpha = \frac{2}{3}V_a - \frac{1}{3}V_b - \frac{1}{3}V_c \quad (4.6)$$

$$V_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}(V_b - V_c) \quad (4.7)$$

Las cuales se multiplican por las señales de retroalimentación de la salida del oscilador sen-cos, y luego se suman para obtener la señal de error dada como:

$$V_{error} = -V_\alpha V \text{sen} \theta + V_\beta V \text{cos} \theta \quad (4.8)$$

Esta señal de error alimenta al controlador PI para generar una señal de referencia al VCO, la salida del VCO es una rampa periódica proporcional al ángulo θ . Esta onda se utiliza para alimentar al oscilador sen-cos que genera la señales de retroalimentación para generar el error. En estado estable la señal de error es cero y el V_{syn} del oscilador sen-cos estará en sincronismo

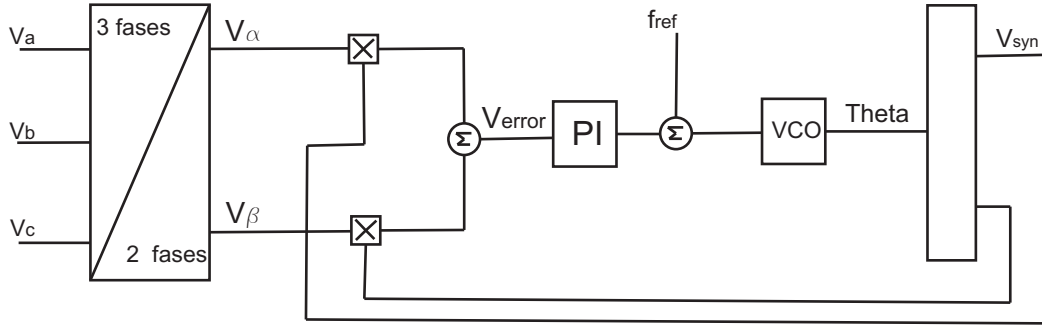


Figura 4.7: Unidad de disparo de puerta DQ

con las tensiones de conmutación.

4.3. Modelo del convertor VSC

En la figura 4.8 se observa el modelo simplificado de un convertor VSC [Zhao,2006], se considera U_s la componente fundamental de la tensión AC de barra, U_c es la componente fundamental de la tensión AC de barra del VSC, δ es el ángulo de desfase entre las tensiones U_s y U_c , L es la inductancia equivalente del transformador del convertor, R es la resistencia equivalente que representa las pérdidas del VSC, P_s y Q_s son la potencia activa y reactiva que salen del sistema AC respectivamente, P_c y Q_c son la potencia activa y reactiva que absorbe el convertor respectivamente.

Si se asume $X = \omega L$, $\alpha = \arctan(\frac{R}{X})$, $Y = \frac{1}{\sqrt{R^2 + X^2}}$, se pueden obtener las siguientes expresiones para las potencias trifásicas del sistema:

$$P_c = U_s U_c Y \sin(\delta + \alpha) - U_c^2 Y \sin \alpha \quad (4.9)$$

$$Q_c = U_s U_c Y \cos(\delta + \alpha) - U_c^2 Y \cos \alpha \quad (4.10)$$

$$P_s = U_s U_c Y \sin(\delta - \alpha) + U_s^2 Y \sin \alpha \quad (4.11)$$

$$Q_s = -U_s U_c Y \cos(\delta - \alpha) + U_s^2 Y \cos \alpha \quad (4.12)$$

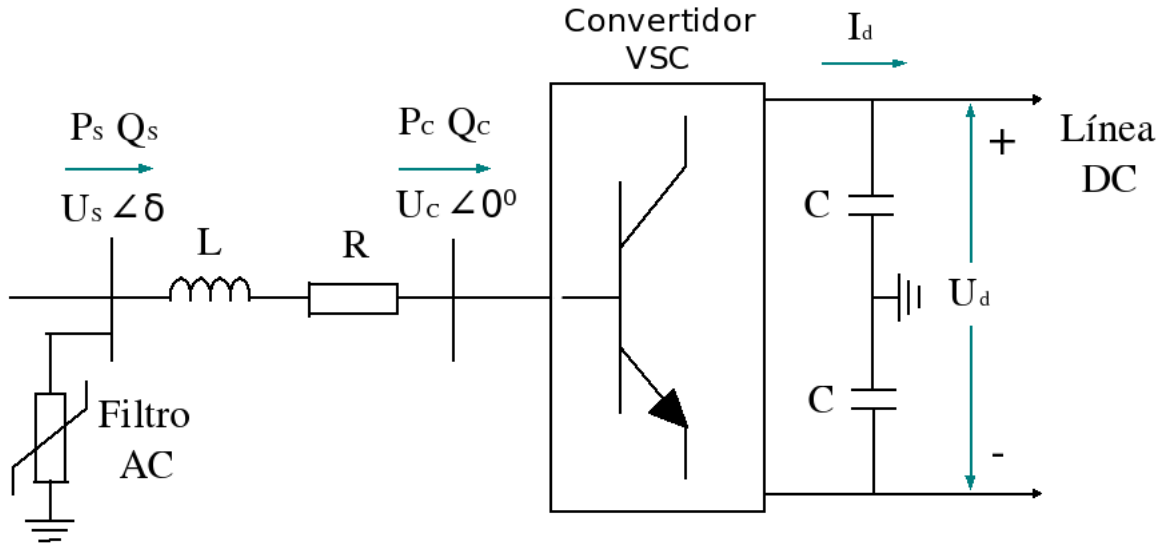


Figura 4.8: Modelo simplificado del VSC

U_c es proporcional al índice de modulación M y se obtiene de la siguiente expresión:

$$U_c = \frac{M}{\sqrt{2}} U_d \quad (4.13)$$

La potencia activa y reactiva se puede controlar independientemente variando δ y M con técnicas PWM.

Para facilitar el análisis se introducen las variables A y B que se definen de la siguiente forma:

$$\begin{cases} A = U_c \cos(\delta - \alpha) \\ B = U_c \sin(\delta - \alpha) \end{cases} \quad (4.14)$$

Sustituyendo (4.14) en (4.9) y (4.12) y simplificando se obtienen las siguientes expresiones:

$$P_c = U_s Y B \cos 2\alpha - B^2 Y \sin \alpha + D \quad (4.15)$$

$$Q_s = -U_s Y A - U_s^2 Y \cos \alpha \quad (4.16)$$

Donde, $D = U_s Y A \sin 2\alpha - A^2 Y \sin \alpha$.

Las ecuaciones (4.15) y (4.16) son la forma rectangular de la transmisión de potencia del VSC.

Los máximos y mínimos de P_c y Q_s dependen de A y B que también dependen de U_d , M y δ . Sustituyendo (4.13) en (4.14) se obtiene que los máximos de A y B son proporcionales a U_d , es decir, P_c y Q_s son afectados por U_d .

$$\begin{cases} A = \frac{M}{\sqrt{2}}U_d \cos(\delta - \alpha) \\ B = \frac{M}{\sqrt{2}}U_d \sin(\delta - \alpha) \end{cases} \quad (4.17)$$

4.3.1. Sistema de control independiente de P_c y Q_s

La ecuación (4.15) tiene dos soluciones, la mejor solución es adoptada. Y se obtienen las siguientes relaciones:

$$A = \frac{U_s^2 Y \cos \alpha - Q_s}{U_s Y} \quad (4.18)$$

$$B = \frac{-k_2 - \sqrt{k_2^2 - 4k_1(P_c - D)}}{2k_1} \quad (4.19)$$

$$\delta = \begin{cases} \arctan\left(\frac{B}{A}\right) + \alpha & A > 0 \\ \arctan\left(\frac{B}{A}\right) + \alpha + \pi & A \leq 0 \quad B \geq 0 \\ \arctan\left(\frac{B}{A}\right) + \alpha - \pi & A \leq 0 \quad B < 0 \end{cases} \quad (4.20)$$

$$M = \frac{\sqrt{2}A}{U_d \cos(\delta - \alpha)} \quad (4.21)$$

Donde, $k_1 = Y \sin \alpha$, $k_2 = -U_s Y \cos 2\alpha$.

La estructura del sistema de control es mostrada en la figura 4.9; el sistema de control puede ajustar la potencia activa y reactiva con gran flexibilidad al modificar los parámetros de los controladores PI.

4.3.2. Estrategia de control del HVDC-VSC

El control con tensión DC constante es aplicado en un lado del enlace y el control con corriente DC constante es aplicado en el otro lado, si se están conectando dos sistemas AC con generación. Cuando se va a conectar un sistema pasivo se hace control con tensión de barra AC constante.

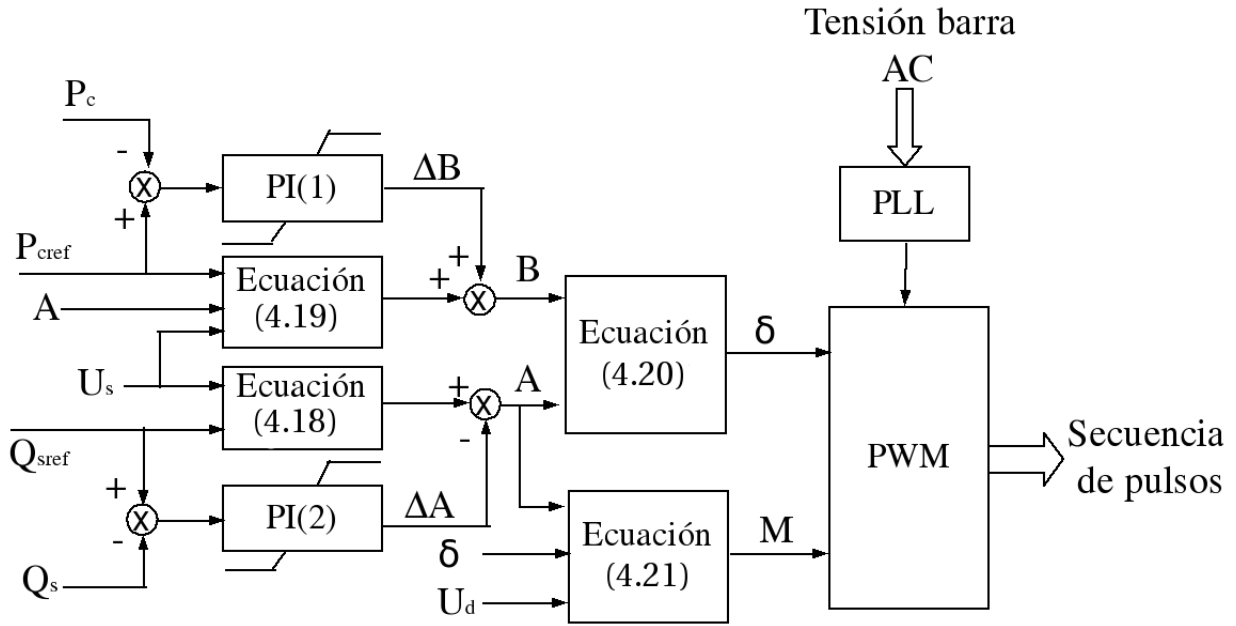


Figura 4.9: Estructura del sistema de control independiente de P_c y Q_s

Control con tensión DC constante

La tensión DC depende de la energía almacenada en el capacitor en el lado DC. Entonces para compensar las variaciones en la tensión DC es necesario ajustar la energía entregada al capacitor. Si se asume que ΔW es la cantidad de energía absorbida por el capacitor durante Δt , esta energía es proporcional a la tensión DC al cuadrado, es decir:

$$\Delta W = \frac{1}{4} C U_d^2(t + \Delta t) - \frac{1}{4} C U_d^2(t) = \frac{1}{4} C \Delta [U_d^2(t)] \quad (4.22)$$

Entonces,

$$\Delta [U_d^2(t)] = \frac{4 \Delta W}{C} = \frac{4 \Delta P_{dc} \Delta t}{C} \quad (4.23)$$

Donde ΔP_{dc} es la potencia promedio absorbida por el capacitor durante Δt .

Si la resistencia del lado DC es invariante entonces:

$$\frac{U_d(t + \Delta t)}{I_d(t + \Delta t)} = \frac{U_d(t)}{I_d(t)} \quad (4.24)$$

Como $P_d = U_d I_d$, se puede obtener la siguiente expresión después de algunas simplificaciones:

$$P_d(t + \Delta t) = \frac{U_d^2(t + \Delta t)}{U_d^2(t)} P_d(t) = \left(1 + \frac{4\Delta P_{dc}\Delta t}{CU_d^2(t)}\right) P_d(t) \quad (4.25)$$

En donde, $P_d(t + \Delta t)$ es el valor estimado de la potencia activa de la línea DC cuando la tensión DC varía.

De acuerdo con la ecuación (4.25) se puede estimar P_d . El sistema de control con tensión DC constante se muestra en al figura 4.10.

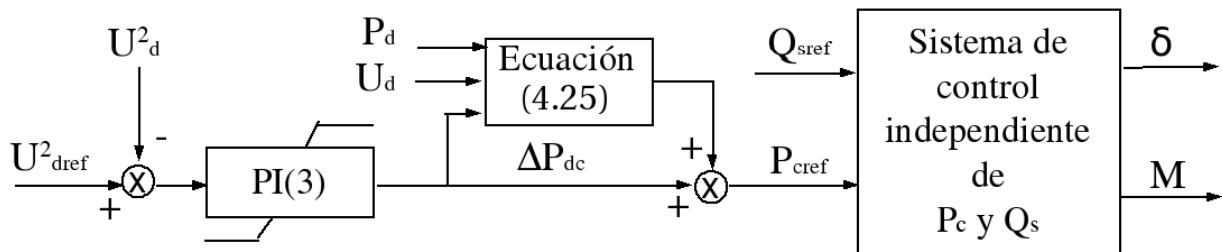


Figura 4.10: Sistema de control con tensión DC constante

Control con corriente DC constante

Bajo condiciones normales de operación, la tensión DC es constante en un lado del enlace HVDC-VSC. Entonces, la potencia activa es proporcional a la corriente DC. La potencia P_{cref} es obtenida del producto de la corriente y tensión DC. El sistema de control con corriente constante se muestra en la figura 4.11.

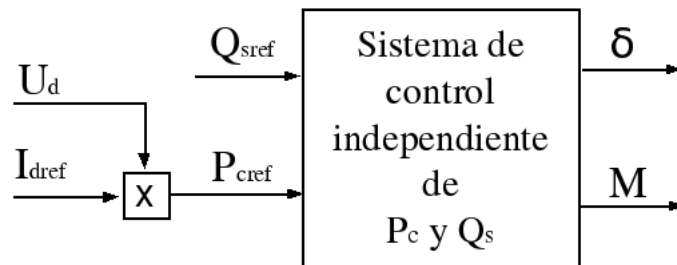


Figura 4.11: Sistema de control con corriente DC constante

Control con tensión de barra AC constante

Cuando el sistema AC que se interconecta con un enlace en corriente directa no tiene generación local o cuando las variaciones de la tensión AC son muy grandes, es necesario controlar la tensión de la barra AC. El sistema de control con tensión AC constante se muestra en la figura 4.12.

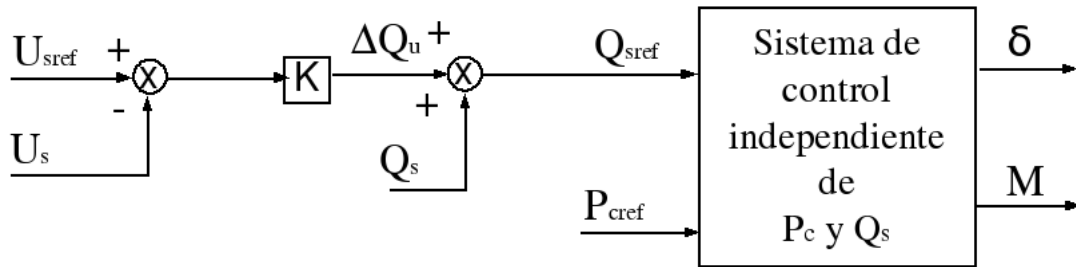


Figura 4.12: Sistema de control con tensión AC constante

Capítulo 5

Modelo reducido del sistema HVDC

En este capítulo se explicará el modelo reducido del sistema HVDC-VSC para ser incluido en el software HAGP. Se plantean las ecuaciones que lo describen y se plantea el sistema de control. El modelo para la tecnología CSC fue incluido en HAGP por Carlos Rodríguez en su tesis de maestría [Rodríguez, 2007].

5.1. Modelo reducido

Para plantear el modelo reducido del sistema HVDC-VSC en flujos de potencia y estudios de estabilidad, se requiere considerar los siguientes elementos [Kundur P, 1994]:

- Modelo del convertidor
- Modelo de la línea de transmisión DC
- Interfase entre el sistema AC y el sistema DC
- Modelo del sistema de control

Para la representación del sistema HVDC-VSC se hacen las siguientes consideraciones:

- La tensión DC U_{dc} esta libre de rizado.
- El sistema AC en el rectificador e inversor consiste de fuentes ideales de tensión, frecuencia constante y tensiones balanceadas. La razón de esta consideración está dada porque los armónicos generados son filtrados para que no se propaguen en el sistema AC.

- El transformador del convertidor es no saturable.
- Se desprecian las pérdidas de potencia en los convertidores.

Modelo equivalente

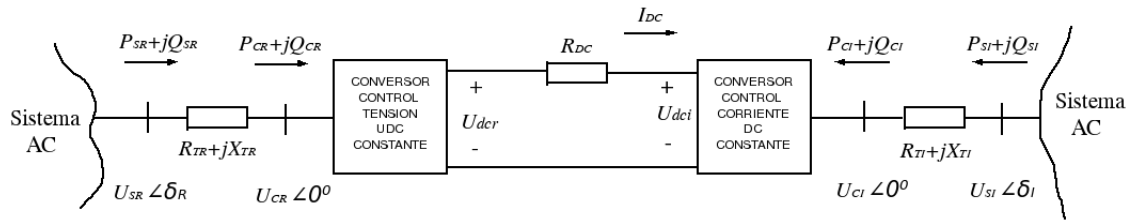


Figura 5.1: Modelo en estado estable de un sistema HVDC-VSC

Un sistema HVDC-VSC se muestra en la figura 5.1 el cual esta conectado a dos redes o sistemas AC activos, en este sistema el lado izquierdo funciona con control de tensión DC constante, el lado derecho funciona con control de corriente DC contante. Al controlar la corriente se controla la potencia activa que se envía al sistema AC.

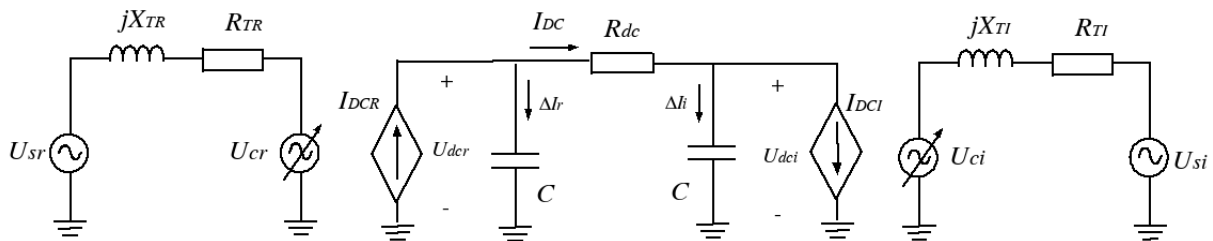


Figura 5.2: Modelo equivalente de un sistema HVDC-VSC

El sistema HVDC-VSC se puede representar como se muestra en la figura 5.2, las fuentes U_{cr} y U_{ci} son fuentes de tensión variables que relacionan la tensión DC con la tensión AC a través del índice de modulación. Las ecuaciones que describen el flujo de potencia para el lado izquierdo llamado rectificador * son:

$$P_{cr} = U_{sr} U_{cr} Y_r \sin(\delta_r + \alpha_r) - U_{cr}^2 Y_r \sin \alpha_r \tag{5.1}$$

*Por ser un enlace bidireccional puede operar como inversor, pero para el modelo se llamará rectificador

$$Q_{cr} = U_{sr}U_{cr}Y_r \cos(\delta_r + \alpha_r) - U_{cr}^2 Y_r \cos \alpha_r \quad (5.2)$$

$$P_{sr} = U_{sr}U_{cr}Y_r \sin(\delta_r - \alpha_r) + U_{sr}^2 Y_r \sin \alpha_r \quad (5.3)$$

$$Q_{sr} = -U_{sr}U_{cr}Y_r \cos(\delta_r - \alpha_r) + U_{sr}^2 Y_r \cos \alpha_r \quad (5.4)$$

$$U_{cr} = \frac{M}{\sqrt{2}} U_{dcr}$$

$$Y_r = \frac{1}{\sqrt{R_{tr}^2 + X_{tr}^2}}$$

$$\alpha_r = \arctan \frac{R_{tr}}{X_{tr}}$$

Las ecuaciones son simétricas para el lado derecho, llamado inversor las cuales son:

$$P_{ci} = U_{si}U_{ci}Y_i \sin(\delta_i + \alpha_i) - U_{ci}^2 Y_i \sin \alpha_i \quad (5.5)$$

$$Q_{ci} = U_{si}U_{ci}Y_i \cos(\delta_i + \alpha_i) - U_{ci}^2 Y_i \cos \alpha_i \quad (5.6)$$

$$P_{si} = U_{si}U_{ci}Y_i \sin(\delta_i - \alpha_i) + U_{si}^2 Y_i \sin \alpha_i \quad (5.7)$$

$$Q_{si} = -U_{si}U_{ci}Y_i \cos(\delta_i - \alpha_i) + U_{si}^2 Y_i \cos \alpha_i \quad (5.8)$$

$$U_{ci} = \frac{M}{\sqrt{2}} U_{dci}$$

$$Y_i = \frac{1}{\sqrt{R_{ti}^2 + X_{ti}^2}}$$

$$\alpha_i = \arctan \frac{R_{ti}}{X_{ti}}$$

Las ecuaciones que describen las corrientes que se modelan como fuentes de corriente del enlace DC en la figura 5.2 son:

$$I_{dcr} = \frac{P_{dcr}}{U_{dcr}} \quad (5.9)$$

$$I_{dci} = \frac{P_{dci}}{U_{dci}} \quad (5.10)$$

Las tensiones DC del rectificador y del inversor son las tensiones que aparecen en los capacitores, se asume que la condición inicial de los capacitores es la tensión DC de referencia. La tensión de los capacitores varía según la diferencia entre las corrientes que fluyen por el enlace.

$$\Delta I_r = I_{dcr} - I_{dc}$$

$$\Delta I_i = I_{dc} - I_{dci}$$

La tensión de los capacitores, con condición inicial la tensión DC de referencia, están dadas por las ecuaciones:

$$U_{dcr} = \frac{1}{C} \int^t \Delta I_r dt \quad (5.11)$$

$$U_{dci} = \frac{1}{C} \int^t \Delta I_i dt \quad (5.12)$$

Si se desprecian las pérdidas por conmutación de los convertidores se tiene que la potencia en AC es igual a la potencia DC, es decir:

$$P_{cr} = P_{dcr}$$

$$P_{ci} = P_{dci}$$

5.1.1. Sistema de control

La potencia activa se controla con la variación del ángulo δ y la potencia reactiva se controla con la variación el índice de modulación M .

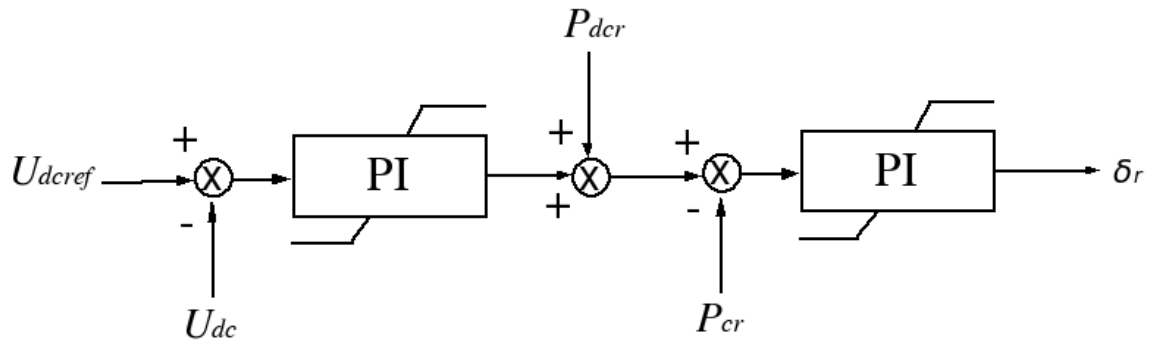


Figura 5.3: Control del ángulo del rectificador

La función del sistema de control de la figura 5.3 es mantener la tensión del capacitor constante controlando la potencia que es enviada a éste, al ajustar esta diferencia con el error que aparece entre la tensión DC de referencia U_{dcref} y la tensión DC medida U_{dcr} .

En la figura 5.4 se muestra el control para el índice de modulación que se ajusta dependiendo de la diferencia entre la potencia reactiva de referencia Q_{srref} y la potencia reactiva medida Q_{sr} .

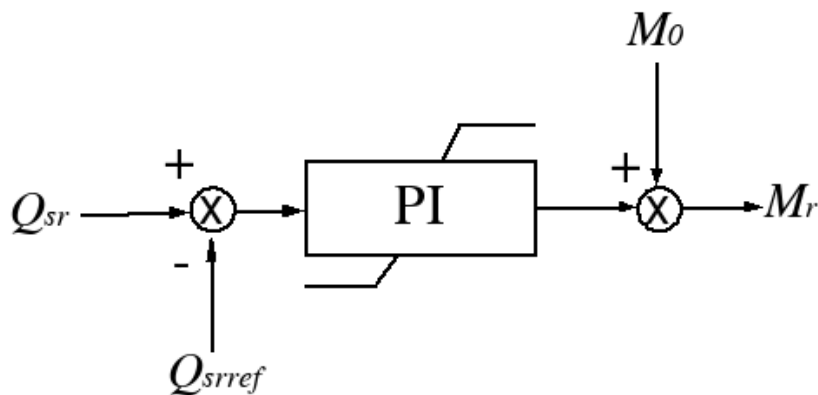


Figura 5.4: Control del índice de modulación del rectificador

La potencia de referencia para el control del ángulo del inversor se calcula como el producto de la corriente de referencia I_{dcref} y la tensión DC medida U_{dci} . Este sistema de control se muestra en la figura 5.5.

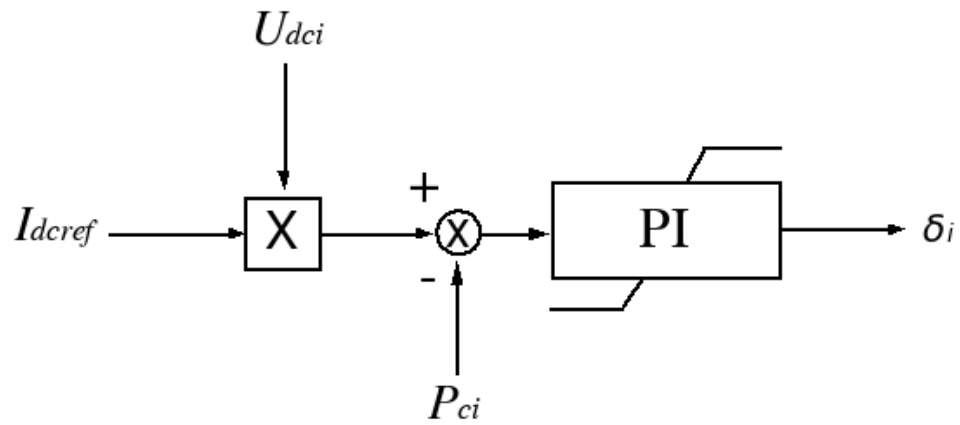


Figura 5.5: Control del ángulo del inversor

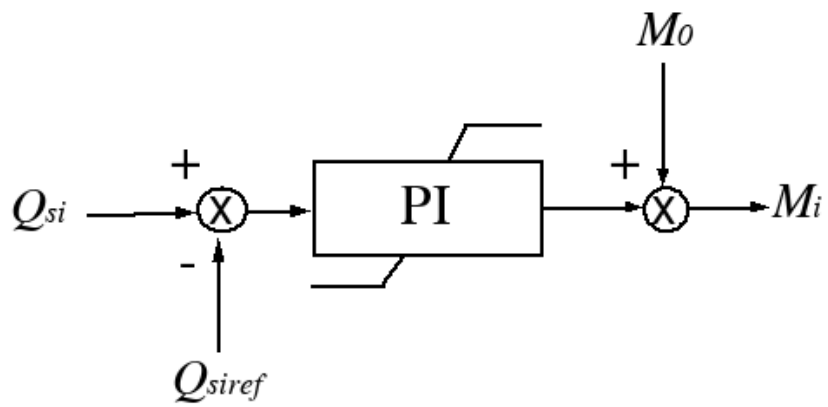


Figura 5.6: Control del índice de modulación del inversor

5.2. Ecuaciones del modelo HVDC-VSC para incluir en HAGP

Un objetivo del proyecto es modelar los enlaces en corriente directa en el software HAGP. Entonces se debe conocer como se modelan los elementos en un sistema de potencia, como se obtienen y resuelven las ecuaciones que lo describen y después se plantean las ecuaciones del sistema HVSC-VSC para HAGP.

5.2.1. Estructura de un modelo de sistema de potencia

El análisis de la estabilidad transitoria de un sistema de potencia envuelve el cálculo de su respuesta dinámica no lineal ante grandes perturbaciones, como una falla en una línea o maniobra de interruptores. El modelo usado para cada componente debe ser apropiado para el análisis de estabilidad transitoria y el sistema de ecuaciones debe ser organizado par ser resuelto con métodos numéricos [Kundur P, 1994].

Las ecuaciones para cada elemento dinámico pueden ser expresadas de la siguiente forma:

$$\dot{\mathbf{x}}_d = \mathbf{f}_d(\mathbf{x}_d, \mathbf{V}_d)$$

$$\mathbf{I}_d = \mathbf{g}_d(\mathbf{x}_d, \mathbf{V}_d)$$

Donde \mathbf{x}_d es el vector de estados para cada elemento, \mathbf{I}_d es el vector de componentes real e imaginaria de la corriente inyectada del elemento a la red y \mathbf{V}_d son las componentes real e imaginaria de la tensión de barra.

El sistema completo de ecuaciones, incluyendo las ecuaciones diferenciales y algebraicas que describen los elementos del sistema de potencia se expresan de la siguiente forma:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{V}) \quad (5.13)$$

$$\mathbf{I}(\mathbf{x}, \mathbf{V}) = \mathbf{Y}_N \mathbf{V} \quad (5.14)$$

con un conjunto de condiciones iniciales $(\mathbf{x}_0, \mathbf{V}_0)$, donde:

\mathbf{x} es el vector de estados

\mathbf{V} es el vector de tensiones de barra

\mathbf{I} es el vector de corrientes inyectadas

\mathbf{Y}_N es la matriz de admitancias de barra

5.2.2. Simulación dinámica de un sistema de potencia

Las variables de estado y las variables de la red son calculadas simultáneamente aplicando métodos numéricos, en este caso la regla trapezoidal.

Con $\mathbf{x} = \mathbf{x}_n$ y $\mathbf{V} = \mathbf{V}_n$ en $t = t_n$ la solución de \mathbf{x} en $t = t_{n+1} = t + \Delta t$ es conseguida aplicando la regla trapezoidal para resolver la ecuación (5.13) [Kundur P, 1994]:

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n + \frac{\Delta t}{2} [\mathbf{f}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{v}_{n+1}) + \mathbf{f}(\mathbf{x}_n, \mathbf{v}_n)] \quad (5.15)$$

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

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{v}_{n+1}) = \mathbf{x}_{n+1} - \mathbf{x}_n - \frac{\Delta t}{2} [\mathbf{f}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{v}_{n+1}) + \mathbf{f}(\mathbf{x}_n, \mathbf{v}_n)] \quad (5.16)$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{v}_{n+1}) = \mathbf{Y}\mathbf{v}_{n+1} - \mathbf{i}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{v}_{n+1}) \quad (5.17)$$

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

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{v}_{n+1}) = 0 \quad (5.18)$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{v}_{n+1}) = 0 \quad (5.19)$$

Las ecuaciones (5.18) y (5.19) son ecuaciones algebraicas no lineales. Aplicando el método de Newton para resolver estas ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_{n+1}^{k+1} \\ \mathbf{v}_{n+1}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{n+1}^k \\ \mathbf{v}_{n+1}^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_{n+1}^k \\ \Delta \mathbf{v}_{n+1}^k \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

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

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{F}(\mathbf{x}_{n+1}^k, \mathbf{v}_{n+1}^k) \\ -\mathbf{G}(\mathbf{x}_{n+1}^k, \mathbf{v}_{n+1}^k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{v}} \\ \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{v}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_{n+1}^k \\ \Delta \mathbf{v}_{n+1}^k \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

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:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{v}} \\ \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{v}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_D & \mathbf{B}_D \\ \mathbf{C}_D & (\mathbf{Y} + \mathbf{Y}_D) \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

Las matrices \mathbf{A}_D , \mathbf{B}_D , \mathbf{C}_D y \mathbf{Y}_D están asociadas con los elementos dinámicos del sistema y las cargas estáticas no lineales. Estas matrices tienen las siguientes estructuras para un sistema con m elementos:

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

$$\mathbf{C}_D = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{d1} & \mathbf{C}_{d2} & \cdots & \mathbf{C}_{dm} \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

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

La solución de estas ecuaciones para hallar $\Delta \mathbf{x}_{n+1}^k$ y $\Delta \mathbf{v}_{n+1}^k$ se consigue con las siguientes expresiones:

$$\Delta \mathbf{x}_{n+1}^k = -\mathbf{A}_D^{-1} \left[\mathbf{F}_{n+1}^k + \mathbf{B}_D \Delta \mathbf{v}_{n+1}^k \right] \quad (5.24)$$

$$(\mathbf{Y} + \mathbf{Y}_D - \mathbf{C}_D \mathbf{A}_D^{-1} \mathbf{B}_D) \Delta \mathbf{v}_{n+1}^k = -\mathbf{G}_{n+1}^k + \mathbf{C}_D \mathbf{A}_D^{-1} \mathbf{F}_{n+1}^k \quad (5.25)$$

Finalmente teniendo estos valores se hallan \mathbf{x}_{n+1}^{k+1} y \mathbf{v}_{n+1}^{k+1} a partir de la ecuación (5.20).

HAGP es un paquete software para la solución dinámica de un sistema de potencia, para hacerlo utiliza el procedimiento anterior.

Para modelar un elemento se determina los vectores \mathbf{F} y \mathbf{G} y a partir de estos las matrices \mathbf{A}_D , \mathbf{B}_D , \mathbf{C}_D y \mathbf{Y}_D correspondientes.

5.2.3. Ecuaciones del enlace HVDC-VSC

Las matrices \mathbf{A}_D , \mathbf{B}_D y \mathbf{C}_D se obtiene a partir de los vectores \mathbf{F} y \mathbf{G} así:

$$\mathbf{A}_D = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{x}}$$

$$\mathbf{B}_D = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{v}}$$

$$\mathbf{C}_D = \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{x}}$$

Para el modelo planteado del sistema HVDC-VSC de la figura 5.2, el vector de estados es el siguiente:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} m_r \\ \delta_r \\ U_{dcr} \\ m_i \\ \delta_i \\ P_{cr} \\ U_{dci} \end{bmatrix}$$

El vector \mathbf{F} esta conformado por los siguientes elementos:

$$\mathbf{F}_1 = m_{r1} - m_{r2} - dt \left[k_{qr}(2Q_{srref} - (Q_{sr1} - Q_{sr2})) - k_{qr} \left(\frac{dQ_{sr1}}{dt_1} + \frac{dQ_{sr2}}{dt_2} \right) \right]$$

$$\mathbf{F}_2 = \delta_{r1} - \delta_{r2} - dt \left[k_{idr}(2P_{cref} - (P_{cr1} + P_{cr2})) - k_{dr} \left(\frac{dP_{cr1}}{dt_1} + \frac{dP_{cr2}}{dt_2} \right) \right]$$

$$\mathbf{F}_3 = U_{dcr1} - U_{dcr2} - \frac{dt}{C} [(I_{dc1} + I_{dc2}) - (I_{dcr1} + I_{dcr2})]$$

$$\mathbf{F}_4 = m_{i1} - m_{i2} - dt \left[k_{qi}(2Q_{siref} - (Q_{si1} - Q_{si2})) - k_{qi} \left(\frac{dQ_{si1}}{dt_1} + \frac{dQ_{si2}}{dt_2} \right) \right]$$

$$\mathbf{F}_5 = \delta_{i1} - \delta_{i2} - dt \left[k_{idi}(2P_{cief} - (P_{ci1} + P_{ci2})) - k_{di} \left(\frac{dP_{ci1}}{dt_1} + \frac{dP_{ci2}}{dt_2} \right) \right]$$

$$\mathbf{F}_6 = P_{cr1} - P_{cr2} - dt \left[k_{iudc}(2U_{dcref} - (U_{dcr1} - U_{dcr2})) - k_{udc} \left(\frac{dU_{dcr1}}{dt_1} + \frac{dU_{dcr2}}{dt_2} \right) \right]$$

$$\mathbf{F}_7 = U_{dci1} - U_{dci2} - \frac{dt}{C} [(I_{dci1} + I_{dci2}) - (I_{dc1} + I_{dc2})]$$

Con las ecuaciones anteriores, se modela el sistema HVDC-VSC en HAGP.

Capítulo 6

Resultado de las simulaciones

Este capítulo, presenta los resultados obtenidos de dos modelos HVDC, implementados en el software ATP y en la herramienta HAGP. De estos resultados se obtendrá el comportamiento del sistema en estado estable y en presencia de fallas, posteriormente se hará un análisis de armónicos y de las exigencias a las que van ha estar sometidos los elementos de conmutación, complementando con la simulación de un sistema de potencia con un enlace DC en las herramientas ATP y HAGP.

6.1. Caso HVDC-CSC

En la figura 6.1 se presenta el sistema HVDC-CSC implementado en el software ATP. Las unidades convertoras, rectificador e inversor constan de seis tiristores, modelando así el sistema HVDC con configuraciones de 6 pulsos y tiristores modelados de acuerdo con la referencia [Sood V, 2004], tal como se muestra en la figura 6.2. Al sistema son aplicadas las típicas fallas que se presentan en el sistema DC de potencia [Arrillaga J, 1998] y [Sood V, 2004], como son:

Fallas en el sistema AC en el rectificador (monofásica y trifásica).

Fallas en el sistema AC en el Inversor (monofásica y trifásica).

Y fallas en la línea DC.

Para el análisis se mostrarán las fallas de mayor impacto en el comportamiento del sistema. Con lo cual es deseable que el tipo de control empleado en el sistema HVDC opere en estado estable y adecuadamente en fallas. El sistema utilizado para la simulación digital es descrito a continuación:

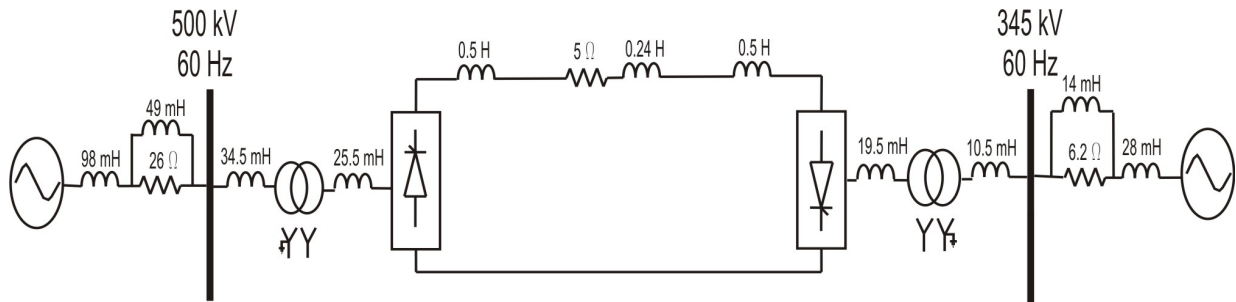


Figura 6.1: Sistema HVDC-CSC

EL enlace DC esta representado por dos unidades convertoras, un rectificador y un inversor, ambos de seis pulsos, interconectados a través de una línea de 300 km con una resistencia e inductancia por unidad de longitud de $R = 0,015 \Omega/km$ y $L = 0,792 mH/km$ respectivamente y reactores de 0,5 H en cada uno de los extremos de la línea DC, realizándose la transmisión a una tensión de 200 kV y una corriente de 2 kA. El transformador del sistema esta conectado en estrella-estrella aterrizado en el lado de alta.

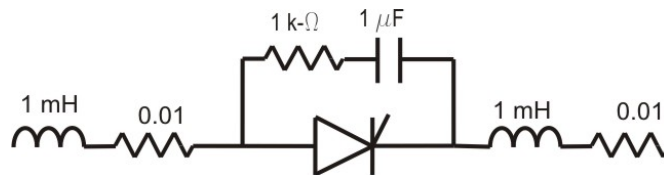


Figura 6.2: Modelo de los tiristores

El sistema AC en el lado del rectificador es de 500 kV a 60 Hz , mientras en el lado del inversor se cuenta con una tensión de 345 kV a 60 Hz, las líneas del sistema AC están representadas por sus respectivas impedancias equivalentes.

El control utilizado para mantener el correcto funcionamiento de la unidad rectificadora se observa en la figura 6.3, donde el control del rectificador parte de mantener la corriente del sistema DC I_{DC} , comparando esta con la corriente de referencia I_{ref} , el error de estas señales pasa al controlador PI con lo cual se genera una señal α que limita entre $\alpha_{min} = 5^\circ$ a $\alpha_{max} = 120^\circ$. La señal del controlador alimenta a la unida lógica de disparo que utiliza la señal θ derivada de la unidad de disparo de puerta, para generar los pulsos de encendido del rectificador.

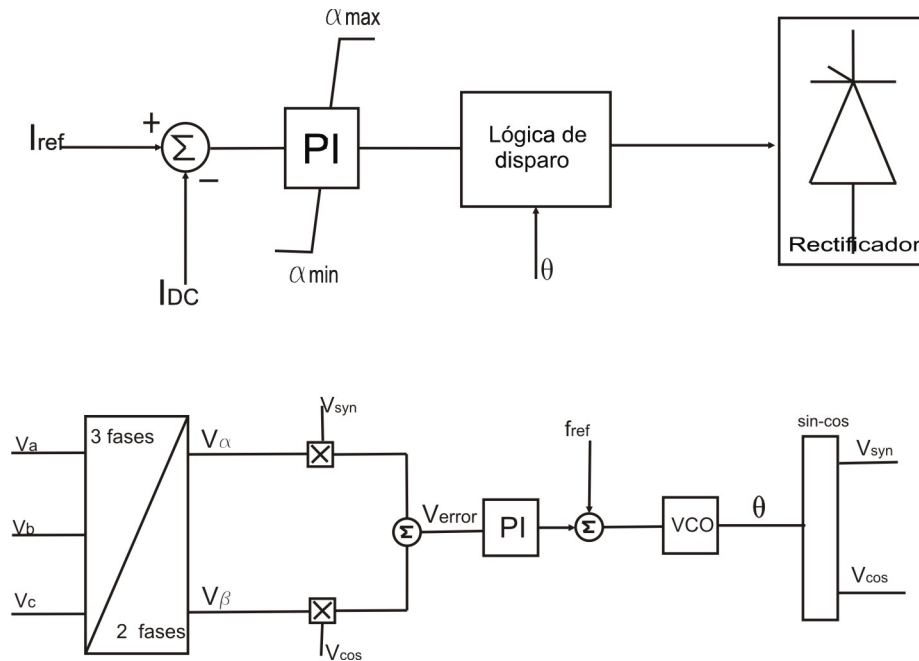


Figura 6.3: Control de la unidad rectificadora

El control de la unidad inversora figura 6.4, consta de dos controladores PI, uno es el control de corriente constante, que es similar al controlador de corriente en el rectificador, donde la señal de salida es α y limita entre $\alpha_{min} = 150^{\circ}$ a $\alpha_{max} = 170^{\circ}$ y a su vez alimenta el bloque mínimo. El otro control mantiene el ángulo de extinción constante que parte de la medición del ángulo de extinción γ_{med} , comparando este con el ángulo de extinción de referencia γ_{ref} , dando una señal de error que alimenta al controlador PI. La salida del PI genera una señal α que limita entre $\alpha_{min} = 150^{\circ}$ a $\alpha_{max} = 170^{\circ}$ y va al bloque mínimo. El bloque mínimo alimenta a la unidad lógica de disparo que utiliza la señal θ derivada de la unidad de disparo de puerta, para generar los pulsos de encendido del inversor.

6.1.1. Simulación en estado estable y cambio de referencia en la corriente

A partir del sistema descrito anteriormente los resultados en estado estable se presentan en la siguiente gráfica 6.5. Como se puede observar, la simulación inicia en $50ms$, tiempo en el cual las unidades de disparo de puerta se sincronizan con las tensiones trifásicas de la red AC, obteniendo así la sincronización de los disparos de puerta de los tiristores. El sistema alcanza la respuesta en estado estable en $100ms$ de iniciada la simulación y la corriente debe mantenerse en $2kA$ hasta $0,5s$, donde se evalúa el control con el cambio de la corriente de referencia en un 25% ,

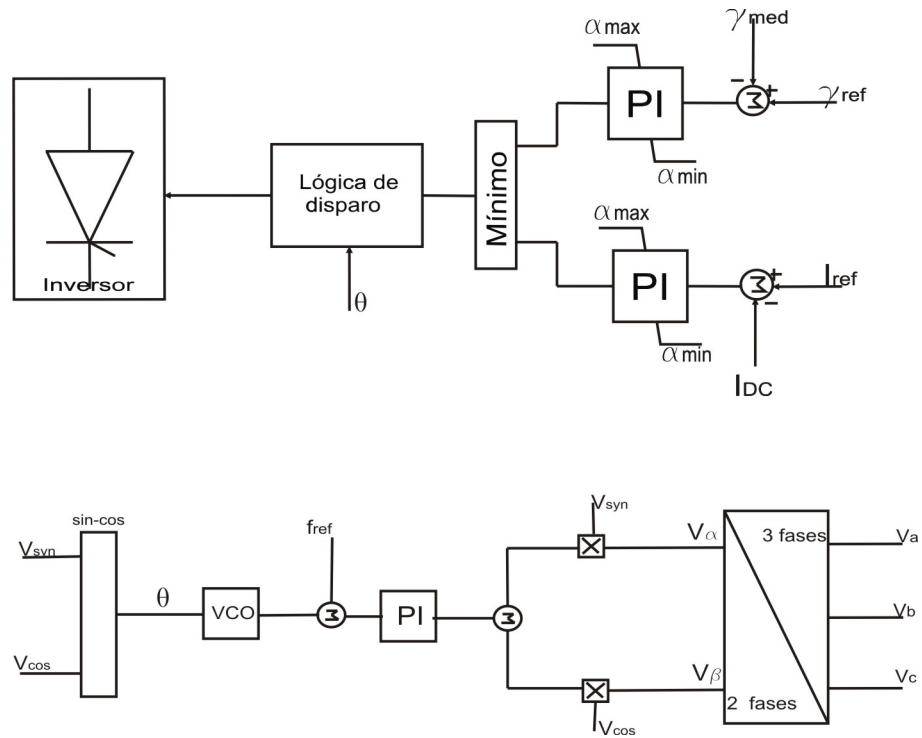


Figura 6.4: Control de la unidad inversora

la nueva referencia se mantiene por 500ms, es decir hasta 1,0s, tiempo en el cual regresa a su estado inicial.

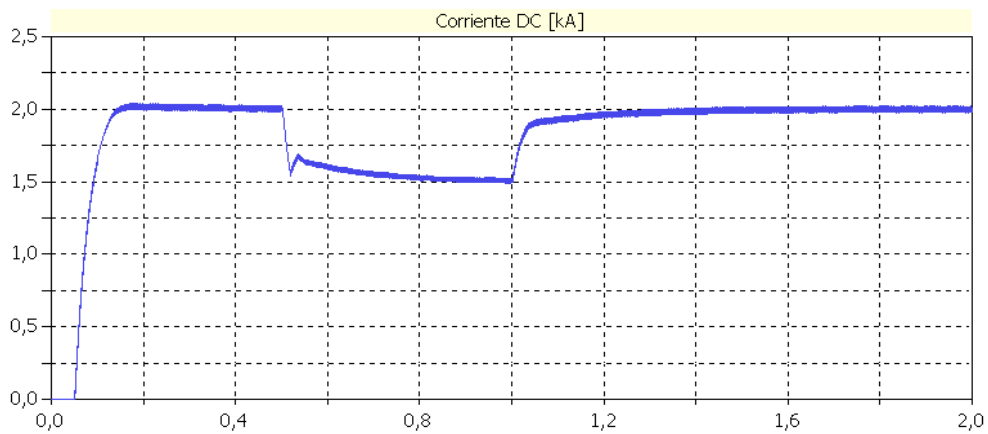


Figura 6.5: Cambio de la corriente de referencia en un 25%

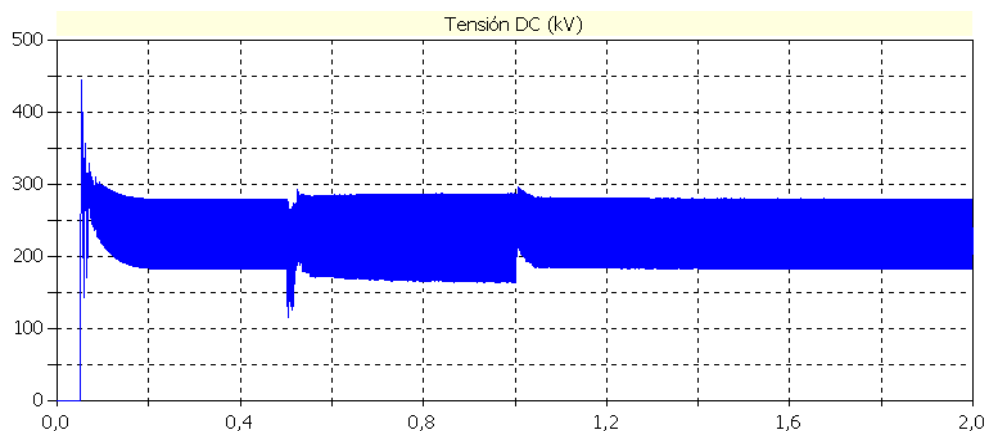


Figura 6.6: Tensión DC en estado estable con cambio de referencia

Paralelamente en las gráficas mostradas en las figuras 6.7, 6.8, 6.9 y 6.10, se observa las tensiones y corrientes que deben soportar los dispositivos de conmutación modelados en ATP en cada una de las unidades convertoras. Para el cambio de referencia no es necesario dar alguna especificación de las válvulas puesto que no presentan cambios significativos que puedan afectar el funcionamiento de los mismos.

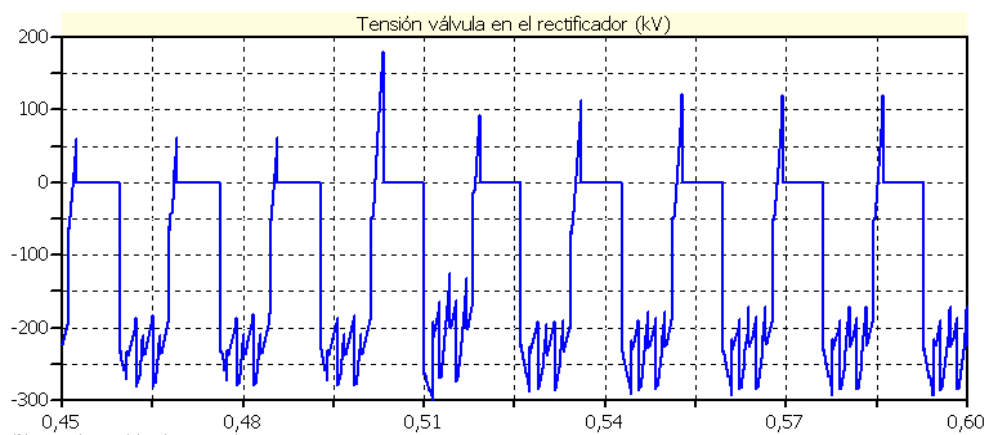


Figura 6.7: Tensión ánodo-cátodo de la válvula en el rectificador

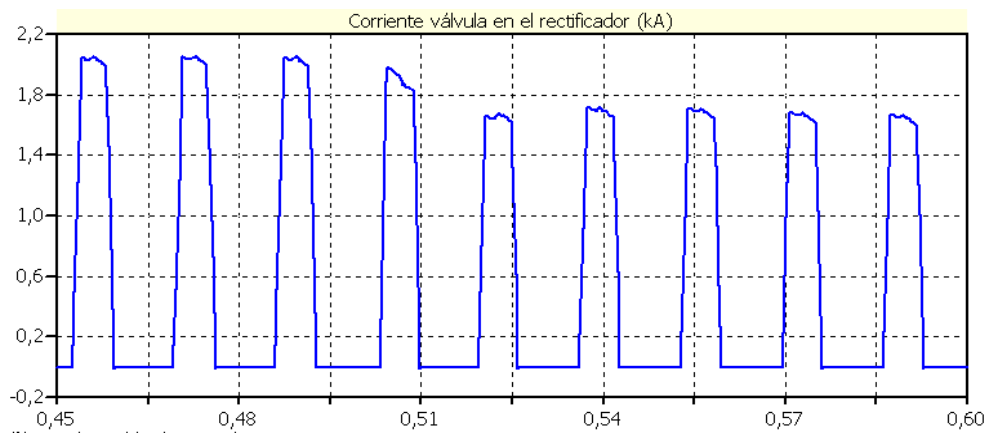


Figura 6.8: Corriente del dispositivo de conmutación en el rectificador

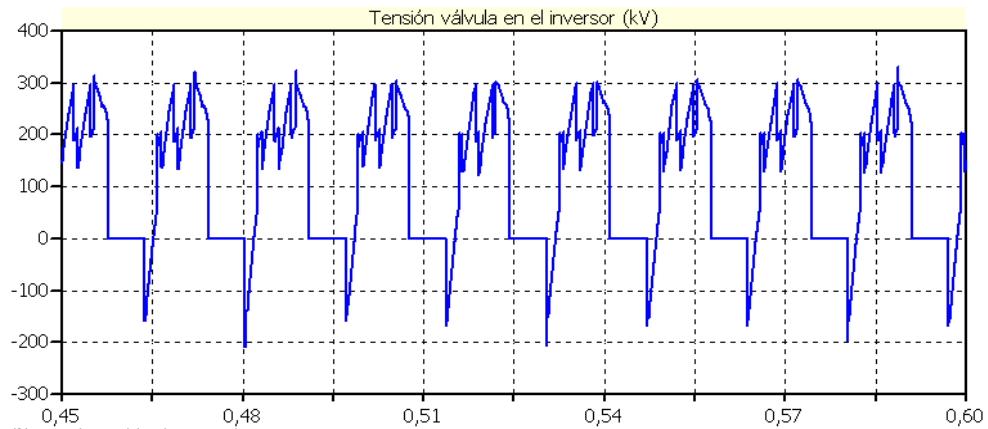


Figura 6.9: Tensión ánodo-cátodo de la válvula en el inversor

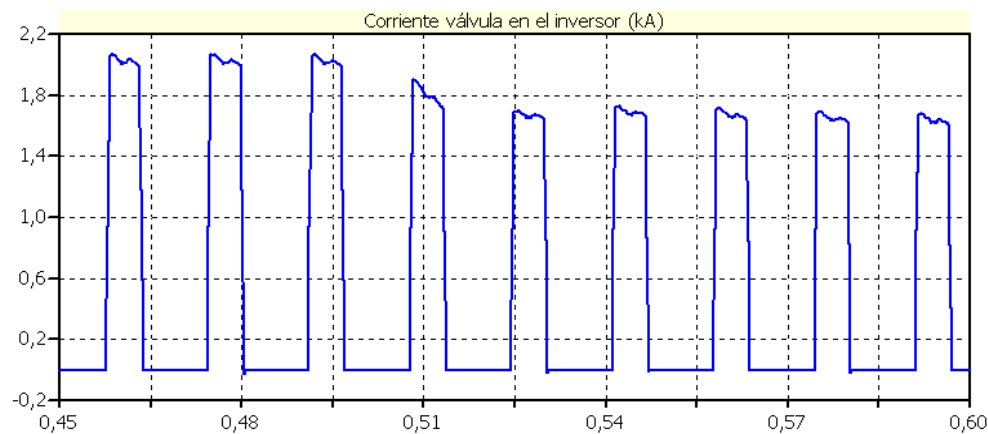


Figura 6.10: Corriente del dispositivo de conmutación en el inversor

6.1.2. Análisis de armónicos

A la entrada de la unidad convertidora se presentan la mayor cantidad de armónicos generados por la conmutación de las válvulas, es importante analizar la onda de tensión y determinar cuales armónicos son los de mayor magnitud para así diseñar los filtros más adecuados.

La señal de tensión de entrada del convertidor obtenida en la simulación, aplicando la técnica de control de pulsos equidistantes se aprecia en la figura 6.11. El análisis de armónicos, utilizando Fourier se muestra en la figura 6.12, donde los armónicos mas representativos son 5, 7, 11, 13, 17, 19 etc. Entonces se deben diseñar filtros para eliminar estos armónicos.

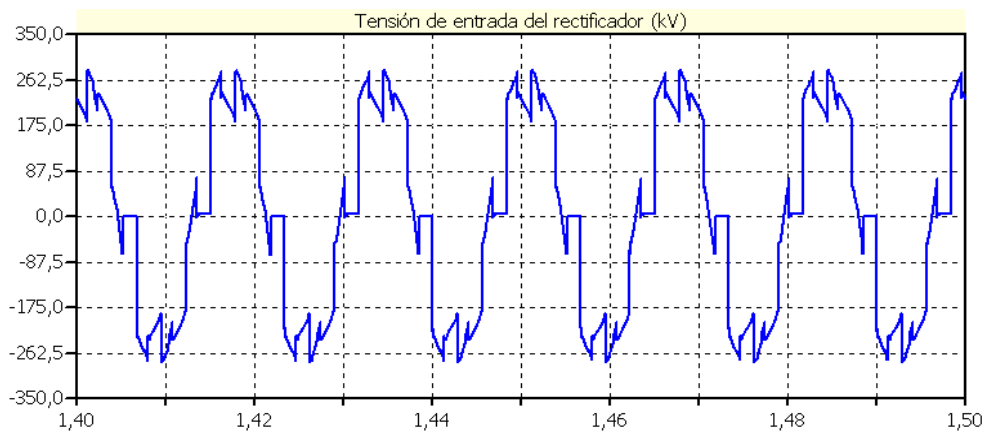


Figura 6.11: Tensión AC de línea entrada del convertidor

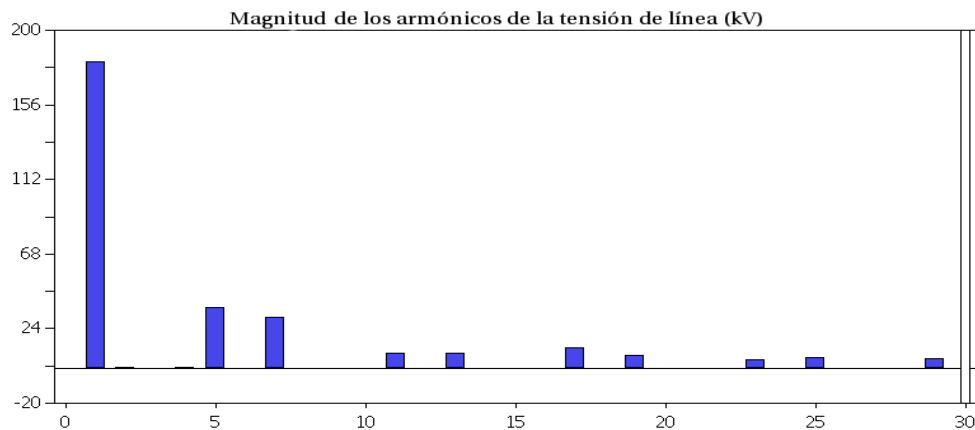


Figura 6.12: Análisis de armónicos de la tensión AC de línea

6.1.3. Falla trifásica de 5 ciclos en el rectificador

La falla trifásica se presenta en $t = 1\text{ s}$, con duración de cinco ciclos, es decir $0,08333\text{ s}$, tiempo durante el cual la corriente del enlace DC es cero, figura 6.13, sin recobrase por la ausencia de tensión en el lado AC, restableciéndose en 150 ms después de haber despejado la falla. También se observa que la tensión DC en la gráfica 6.14 cae, mientras que la falla es despejada.

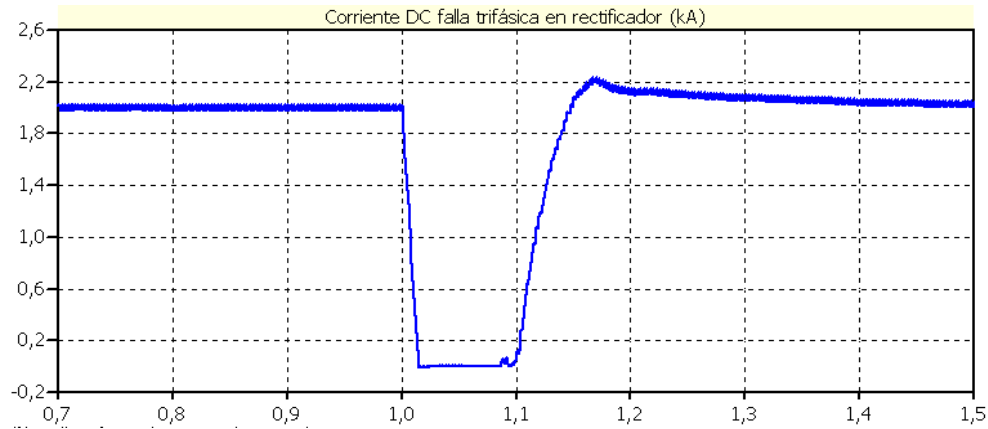


Figura 6.13: Corriente DC con falla trifásica en el sistema AC de 5 ciclos en el lado del rectificador

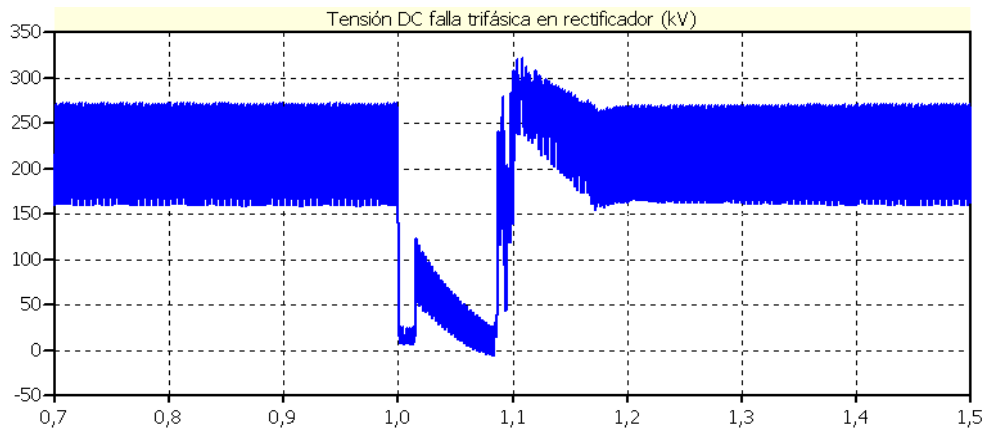


Figura 6.14: Tensión DC con falla trifásica en el sistema AC de 5 ciclos en el lado del rectificador

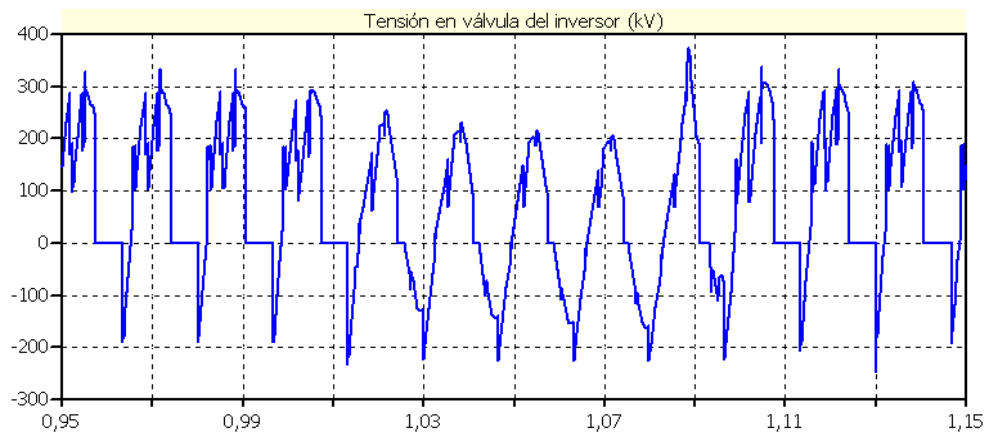


Figura 6.15: Tensión en la válvula del inversor con falla trifásica de 5 ciclos en el sistema AC en el lado del rectificador

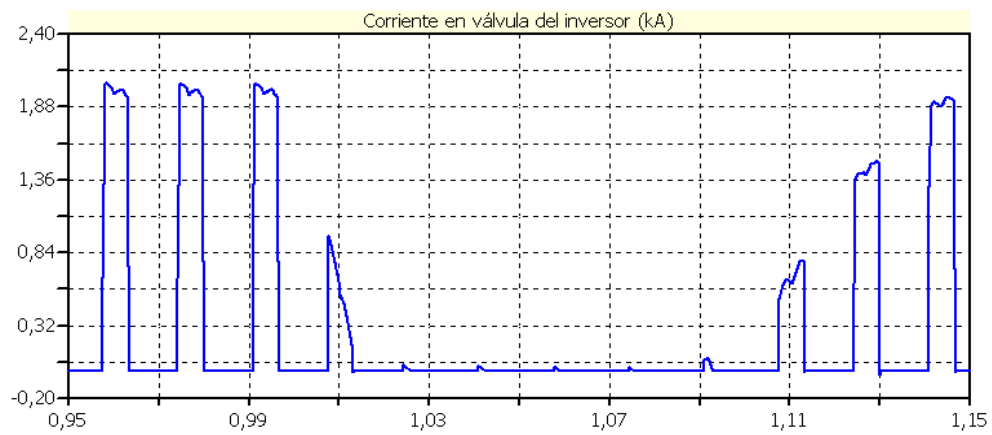


Figura 6.16: Corriente del dispositivo de conmutación en el inversor con falla trifásica de 5 ciclos en el sistema AC en el lado del rectificador

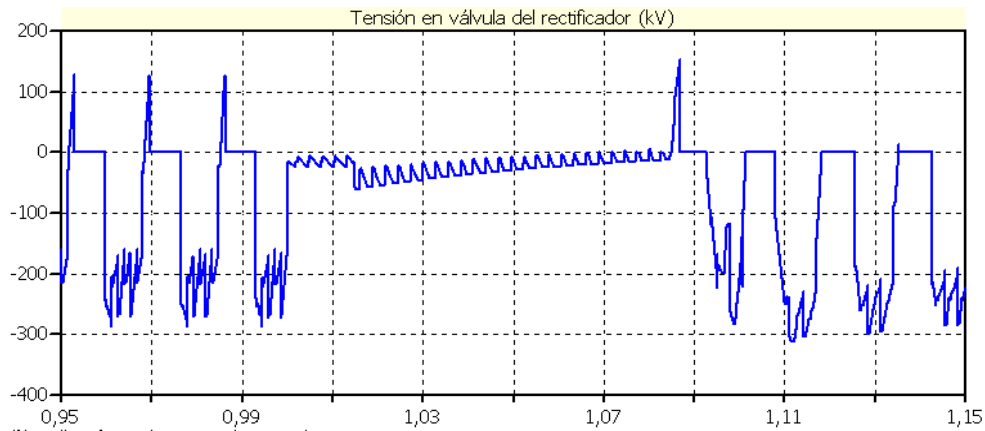


Figura 6.17: Tensión en la válvula del rectificador con falla trifásica de 5 ciclos en el sistema AC en el lado del rectificador

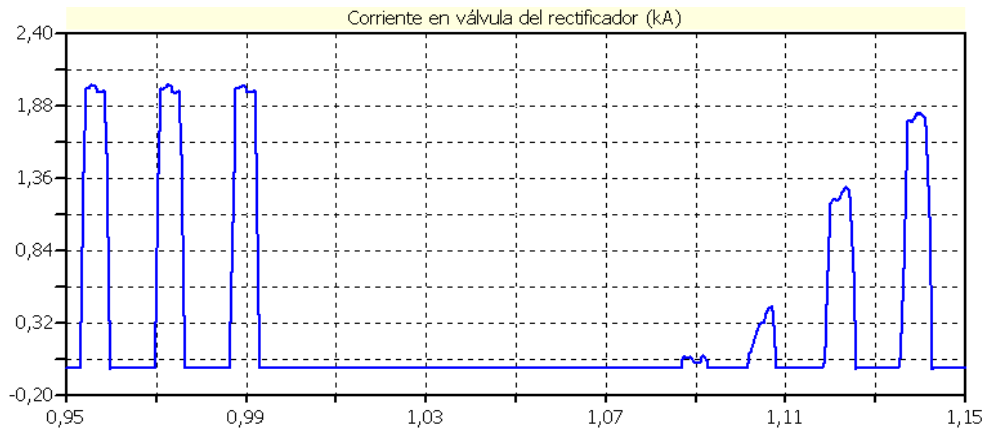


Figura 6.18: Corriente del dispositivo de conmutación en el rectificador con falla trifásica de 5 ciclos en el sistema AC en el lado del rectificador

6.1.4. Falla en la línea DC

Es la falla mas grave que se presenta en el enlace HVDC, tal como se observa en la figura 6.19, la falla inicia en $t = 1 s$ y es despejada a los $0,083333 s$ de haber iniciado, presentándose una sobrecorriente del 175 %, que es limitada por la inductancia presente en la línea hasta el lugar de la falla, teniendo luego una caída a cero exigiendo físicamente a los elementos que componen al sistema.

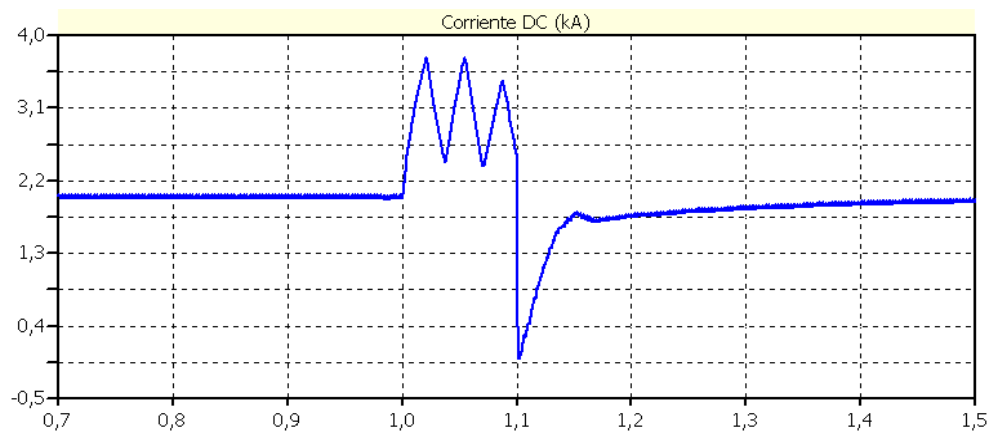


Figura 6.19: Corriente DC con falla en la línea DC

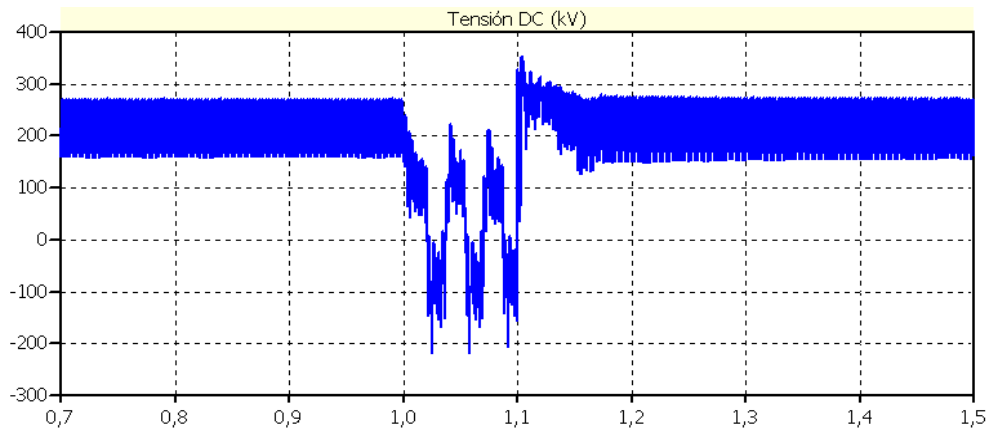


Figura 6.20: Tensión DC con falla en la línea DC

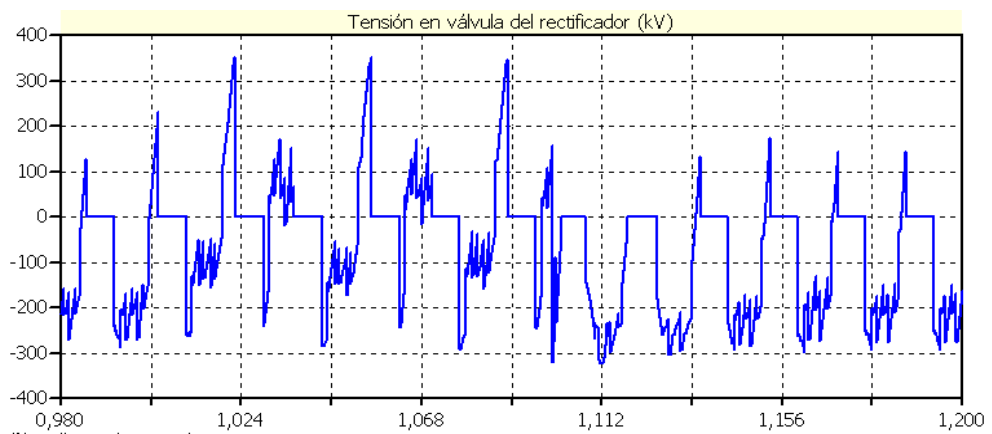


Figura 6.21: Tensión en la válvula del rectificador con falla en la línea DC

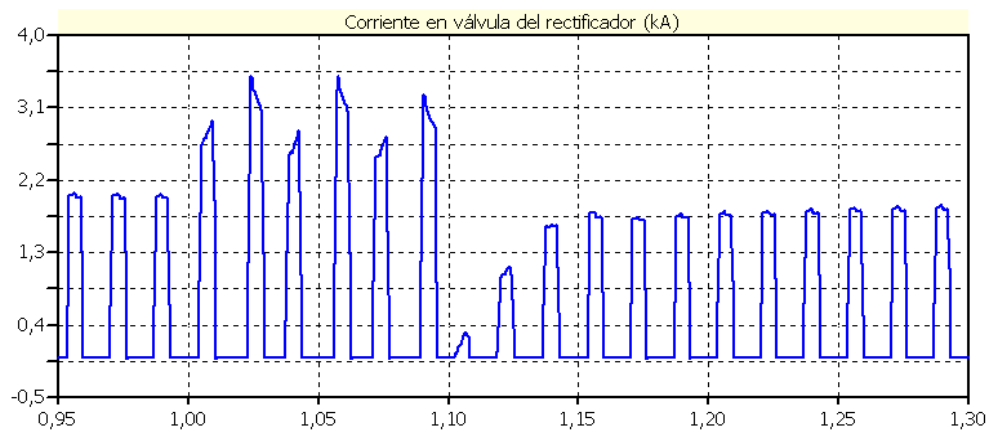


Figura 6.22: Corriente en válvula del rectificador con falla en la línea DC

6.1.5. Esfuerzos de los elementos de conmutación

En las gráficas presentadas anteriormente se observa que la máxima corriente a la que están sometidas las válvulas es 3.7 kA, la tensión inversa máxima es 320 kV y la tensión máxima directa es 370 kV, estos datos en valor pico. Entonces estos máximos son las exigencias a las que estarán sometidas las válvulas y que deben ser tenidos en cuenta para la selección de los dispositivos de conmutación y protección. Al igual que las válvulas, el cable es seleccionado para soportar los esfuerzos dieléctricos, térmicos y mecánicos causados por sobretensiones, sobrecorrientes y fallas.

6.1.6. Modelo del sistema HVDC en el software HAGP

Este caso presenta un sistema de potencia con el enlace DC, el modelo del sistema de potencia se presenta en la referencia [Kundur P, 1994], mientras el enlace DC corresponde a un enlace monopolar en corriente directa de 150 kV y 228 MW entre las barras 7 y 9. El sistema considerado en la figura 6.23, presenta el enlace DC controlado mediante el control de corriente constante a 1,5 kA y la potencia a 228 MW tal como se observa en las gráficas 6.26, 6.27 y 6.28, 6.29 respectivamente.

Como se muestra en las figuras 6.24, 6.25, 6.26, 6.27, 6.28 y 6.29, los resultados de las simulaciones son similares, excepto que los resultados de la herramienta HAGP son más ideales porque en el modelo se desprecian los efectos de conmutación así como armónicos y pérdidas en las unidades convertoras.

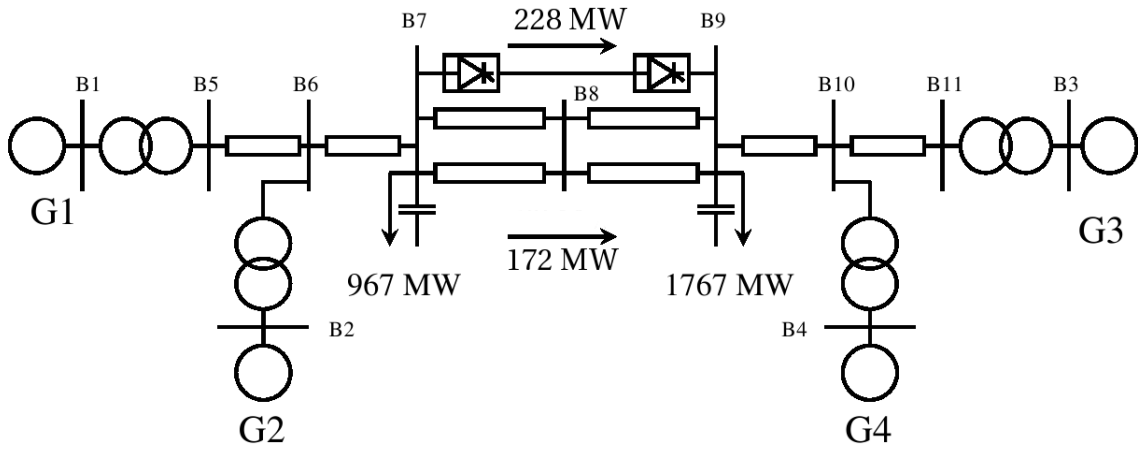


Figura 6.23: Sistema de potencia con enlace HVDC

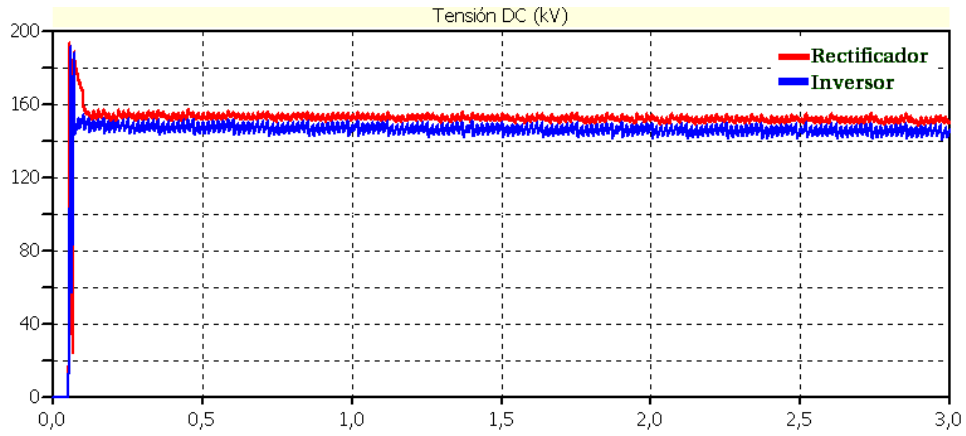


Figura 6.24: Tensión DC en rectificador e inversor en ATP

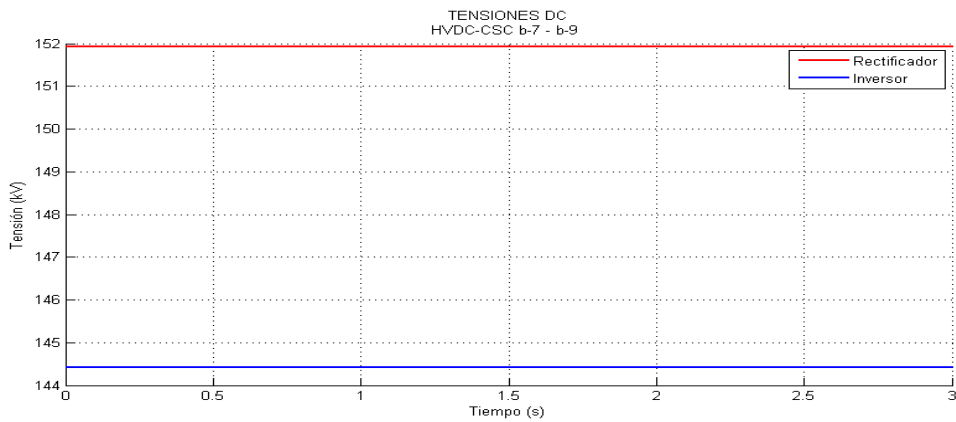


Figura 6.25: Tensión DC en rectificador e inversor en HAGP

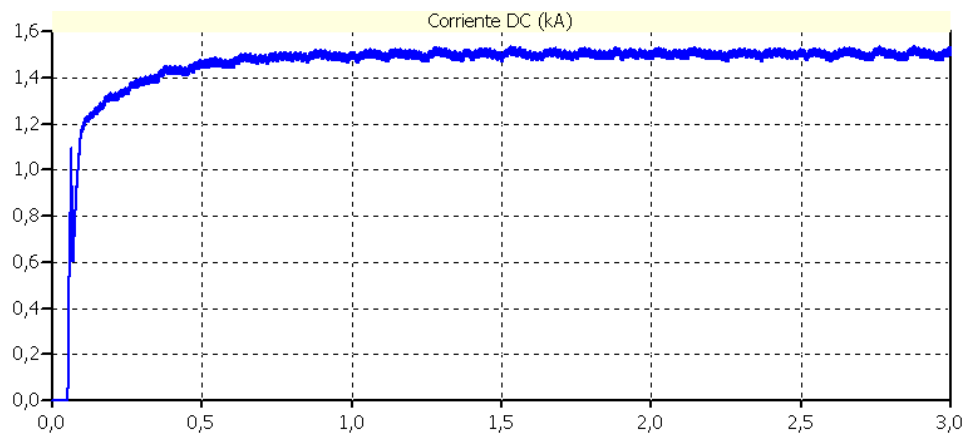


Figura 6.26: Corriente DC en ATP

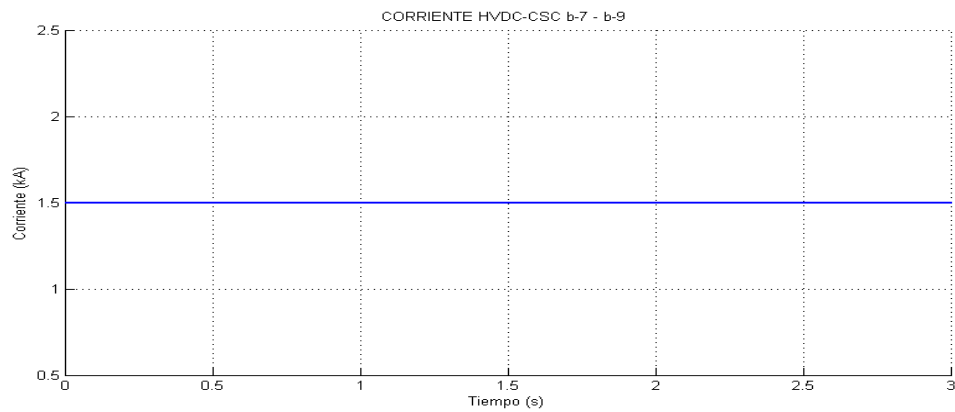


Figura 6.27: Corriente DC en HAGP

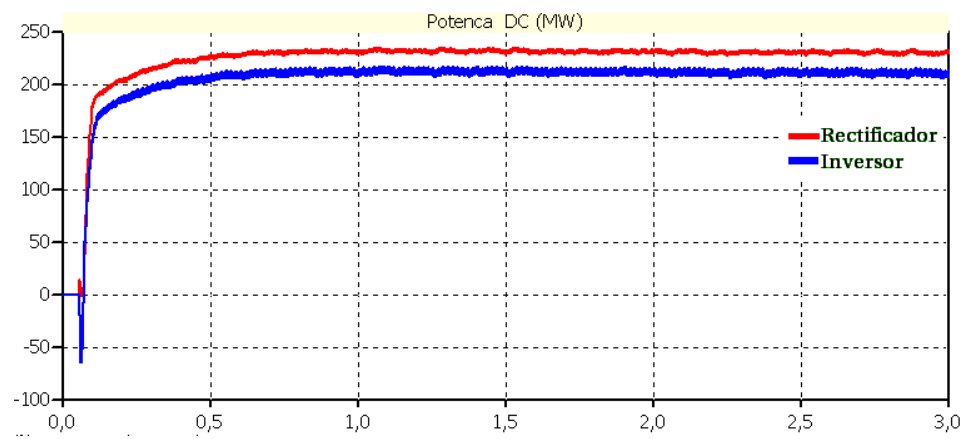


Figura 6.28: Potencia enviada y recibida del enlace DC en ATP

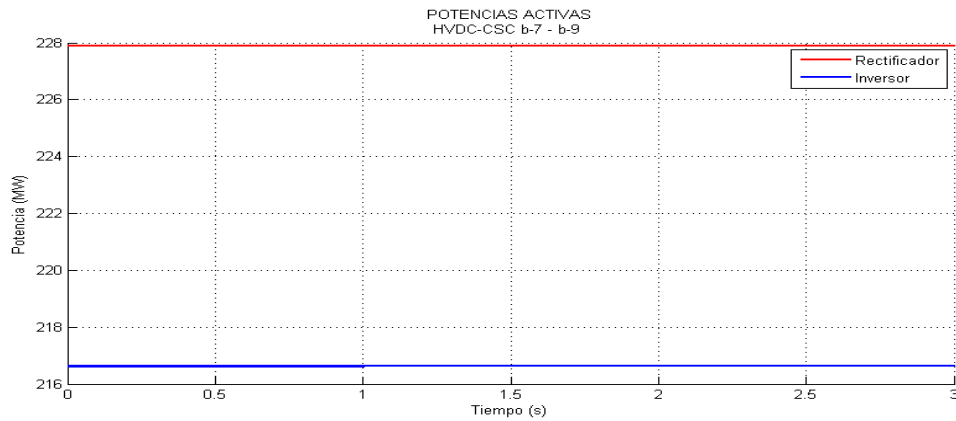


Figura 6.29: Potencia enviada y recibida del enlace DC en HAGP

6.2. Caso HVDC-VSC

Para validar los resultados se simuló en ATP y HAGP el sistema que se muestra en la figura 6.30, el enlace en corriente directa tiene los siguientes parámetros: tensiones AC $U_{sr} = U_{si} = 10\text{ kV}$, resistencia del transformador $R_{tr} = R_{ti} = 0,8\ \Omega$, reactancia del transformador $X_{tr} = X_{ti} = 3,1415\ \Omega$, resistencia del enlace $R_{dc} = 2,7\ \Omega$, inductancia del enlace $L_{dc} = 10,36\text{ mH}$, tensión del enlace $U_{dc} = \pm 10\text{ kV}$, capacitancia $C = 100\ \mu\text{F}$. La capacidad del enlace es 3 MW , la frecuencia de operación es 50 Hz . Este sistema es un equivalente del enlace Hellsjön de 10 km que fue probado en 1997 y es modelado en la referencia [Zhang, 2001].

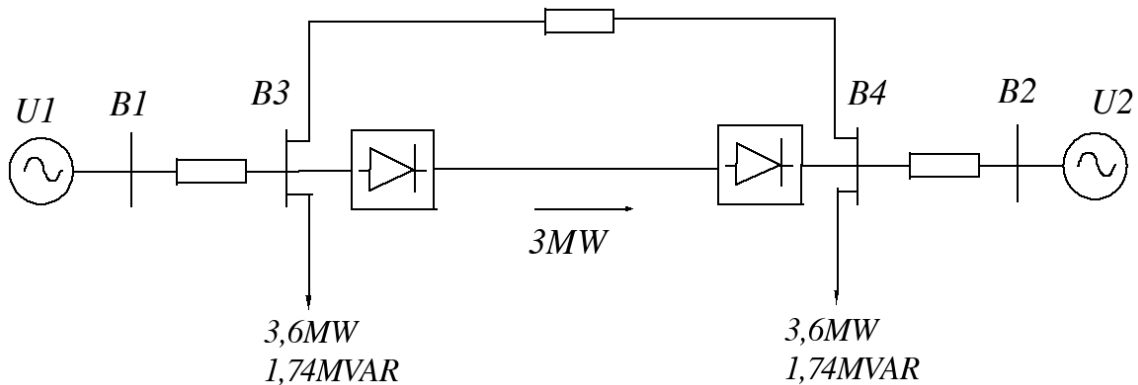


Figura 6.30: Sistema de potencia con un enlace HVDC-VSC

El esquema completo del enlace HVDC se muestra en la figura 6.31, la técnica PWM utilizada es la comparación de señales senoidales con una onda triangular de frecuencia 15 veces la fun-

damental del sistema, es decir 750 Hz, este PWM es sincronizado con la frecuencia del sistema a través de un PLL. Las unidades conversoras son de seis pulsos, el capacitor se dividió en dos capacitores en serie y se aterrizó en la mitad.

La función del sistema de control con tensión DC constante, es mantener la tensión DC del rectificador en el valor de referencia y controlar la potencia reactiva. El control con corriente DC constante es el encargado de controlar la potencia activa y la potencia reactiva que entra o sale del sistema AC. Estos sistemas de control tienen dos señales de salida, índice de modulación y ángulo, que van al bloque PWM que se encarga de generar una señal senoidal de referencia, con una amplitud y un desfase para generar la secuencia de pulsos que van a las válvulas.

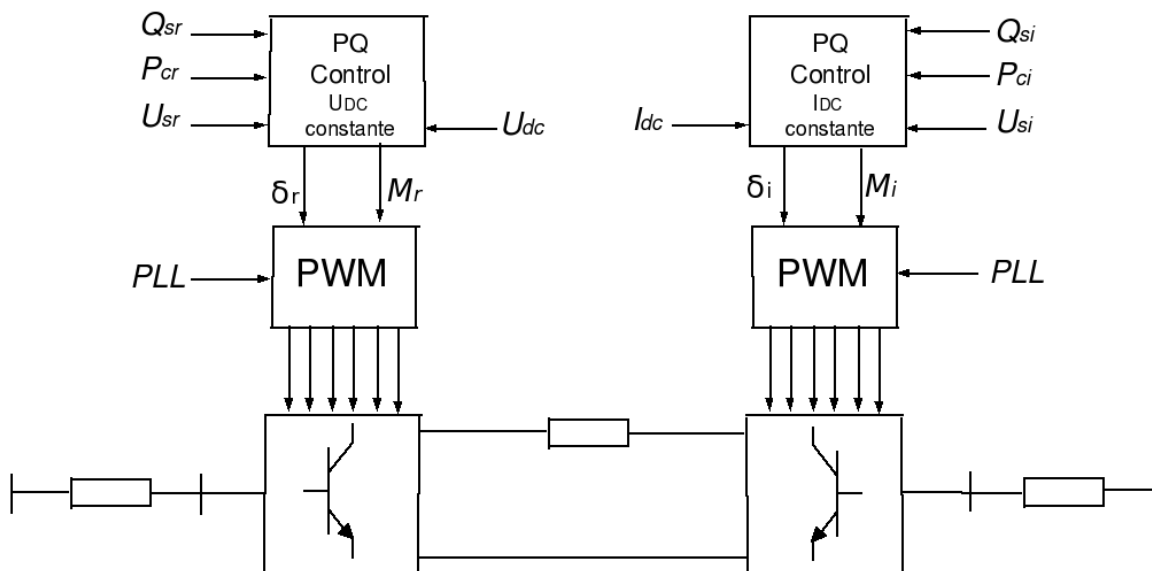


Figura 6.31: Sistema HVDC-VSC para simular en ATP con su respectivo sistema de control

Resultados obtenidos con HAGP

La simulación realizada en HAGP tiene las siguientes características:

- La corriente DC de referencia es de 0,15 kA
- La tensión DC de referencia es 20 kV (± 10 kV)
- La potencia reactiva de referencia en el rectificador es 2,4 MVA
- La potencia reactiva de referencia en el inversor es -2,4 MVA

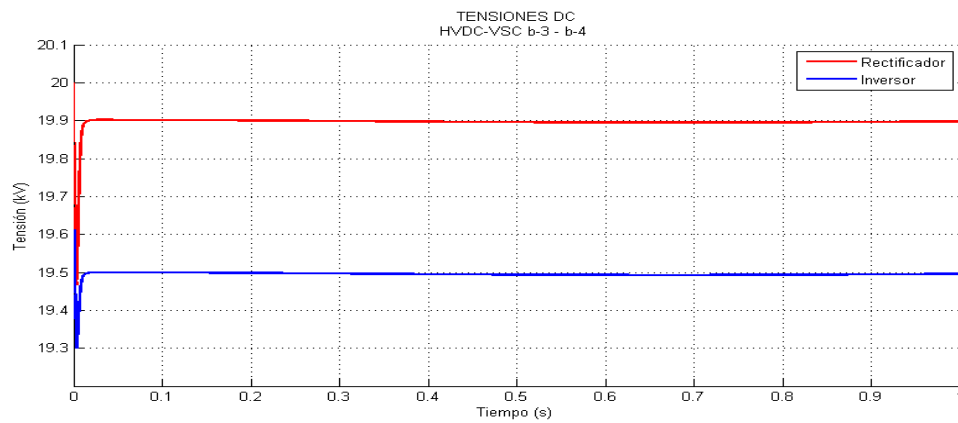


Figura 6.32: Tensiones DC del enlace

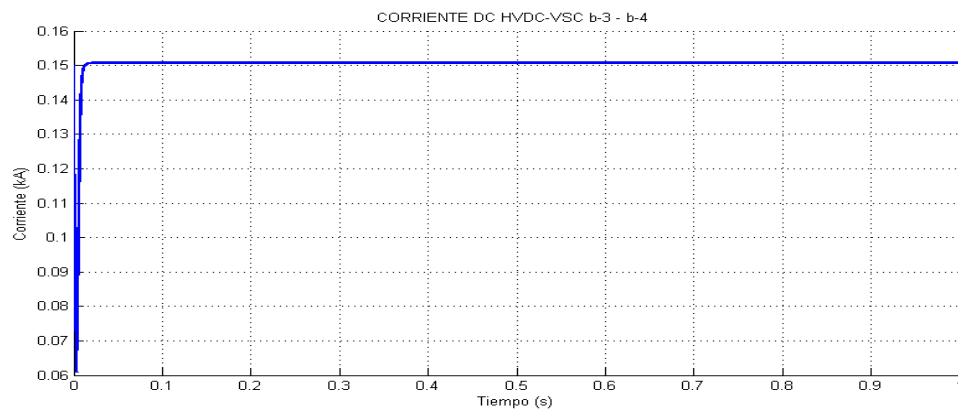


Figura 6.33: Corriente DC del enlace

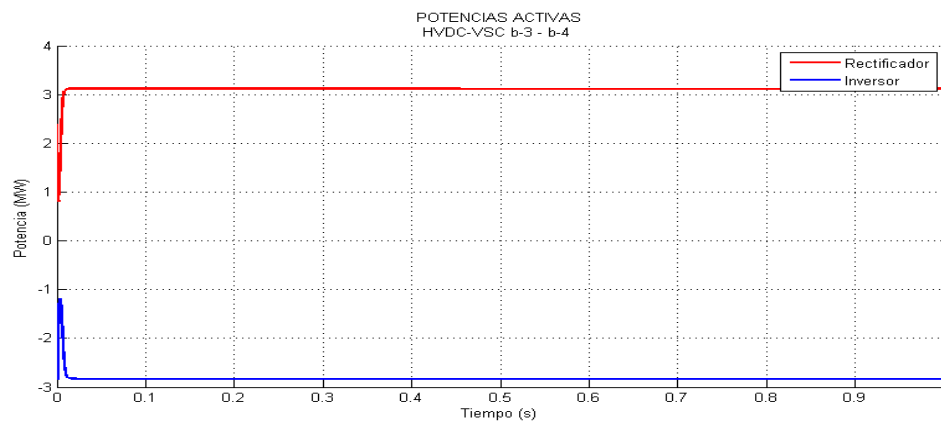


Figura 6.34: Potencias activas

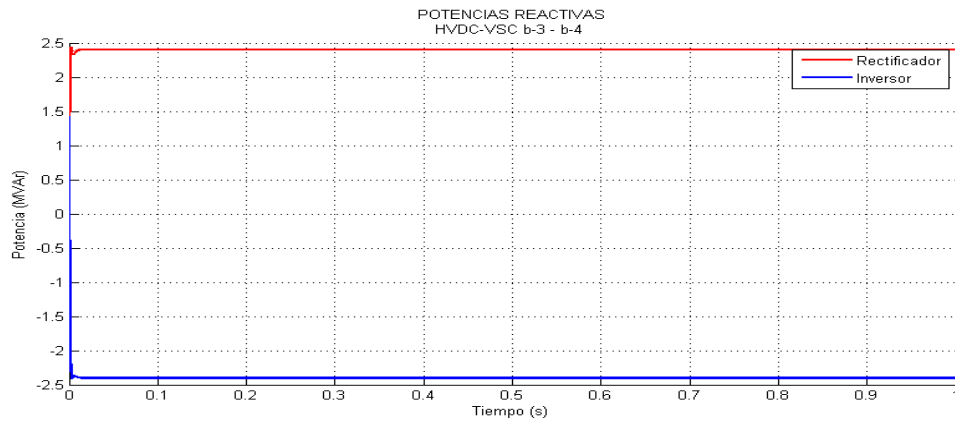


Figura 6.35: Potencias reactivas

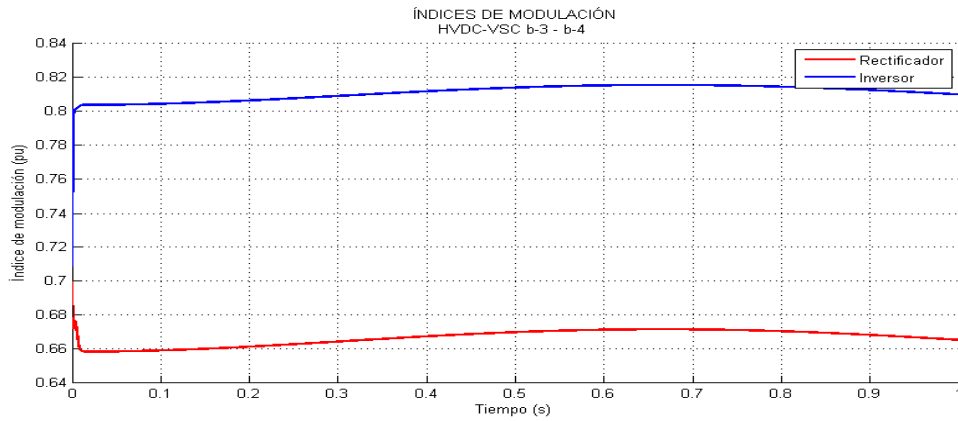


Figura 6.36: Índices de modulación

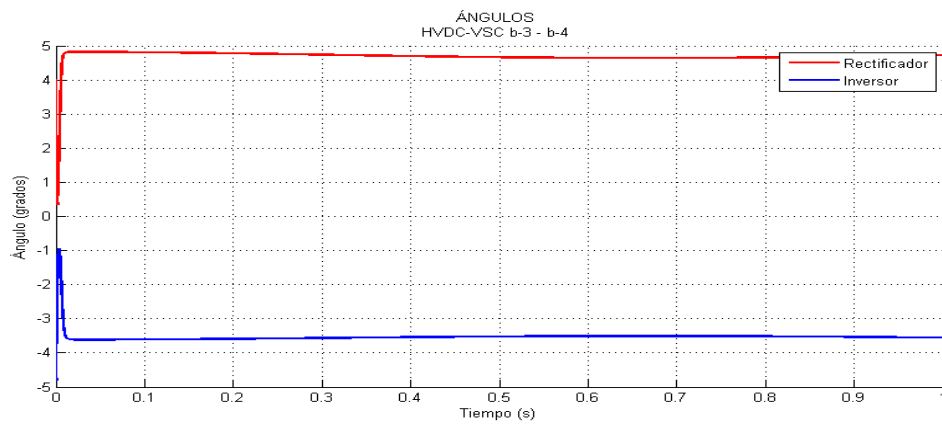


Figura 6.37: Ángulos del rectificador e inversor

Los resultados obtenidos en HAGP muestran el control de la corriente, de las potencias reactivas y de la tensión DC del capacitor.

Resultados en ATP

La simulación realizada en ATP tiene las siguientes características para $t \leq 800\text{ms}$:

- El enlace entra en servicio en $t = 20\text{ms}$ para asegurar que el PLL y el medidor de tensión rms en el lado AC tengan una señal correcta (únicamente en ATP).
- La corriente DC de referencia es de $0,15\text{kA}$
- La tensión DC de referencia es $20\text{kV} (\pm 10\text{kV})$
- La potencia reactiva de referencia en el rectificador es $2,4\text{MVA}$
- La potencia reactiva de referencia en el inversor es $-2,4\text{MVA}$

Para $t > 800\text{ms}$ tiene las siguientes características:

- La corriente DC de referencia es de $-0,15\text{kA}$
- La tensión DC de referencia es $20\text{kV} (\pm 10\text{kV})$
- La potencia reactiva de referencia en el rectificador es $-2,4\text{MVA}$
- La potencia reactiva de referencia en el inversor es $2,4\text{MVA}$

Es decir que en $t = 800\text{ms}$ se invierte el flujo de potencia activa y reactiva, con esto se quiere mostrar el funcionamiento bidireccional del enlace y el control de potencia reactiva.

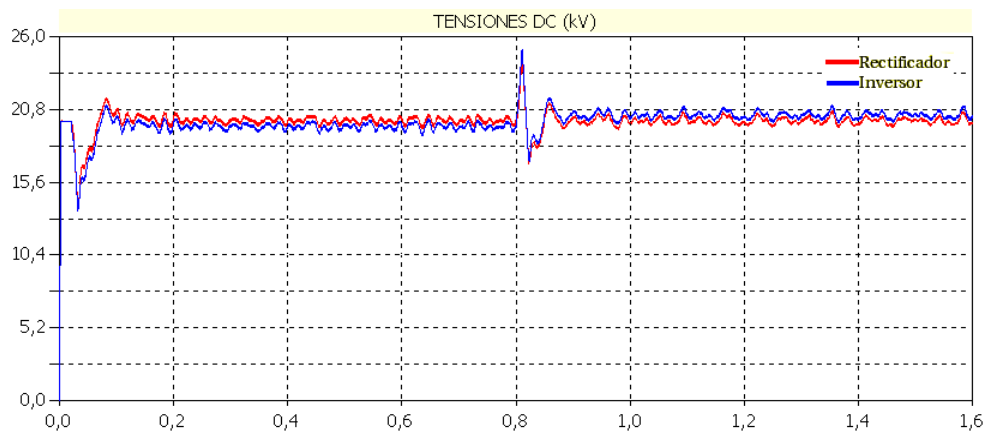


Figura 6.38: Tensões DC

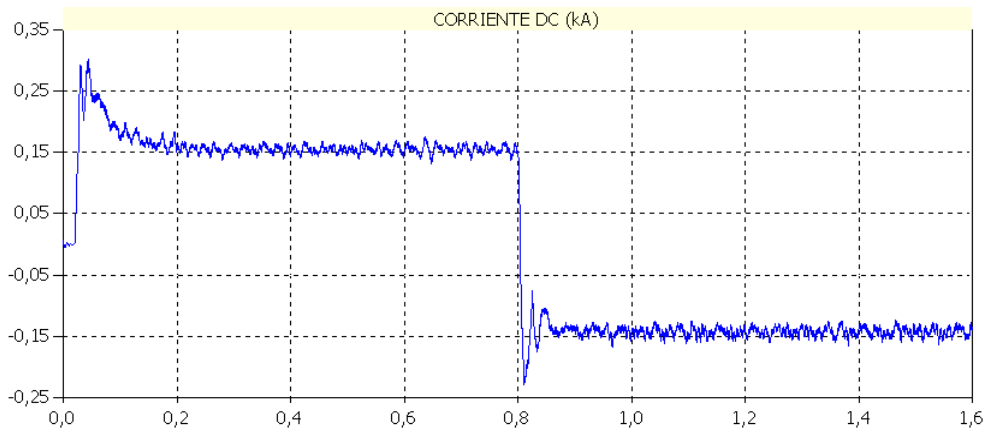


Figura 6.39: Corrente DC

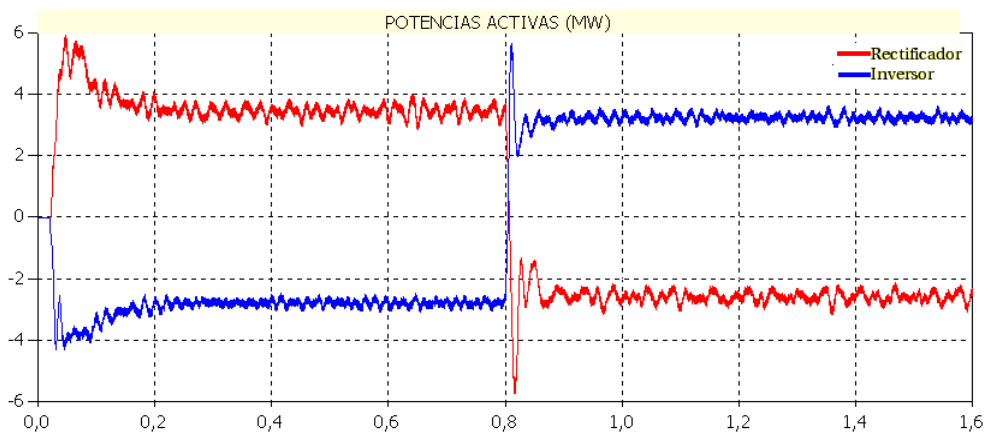


Figura 6.40: Potências ativas

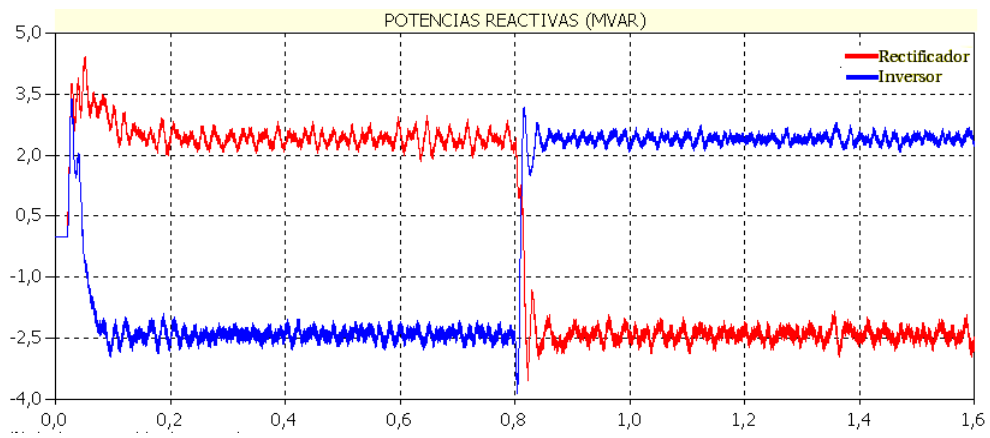


Figura 6.41: Potencias reactivas

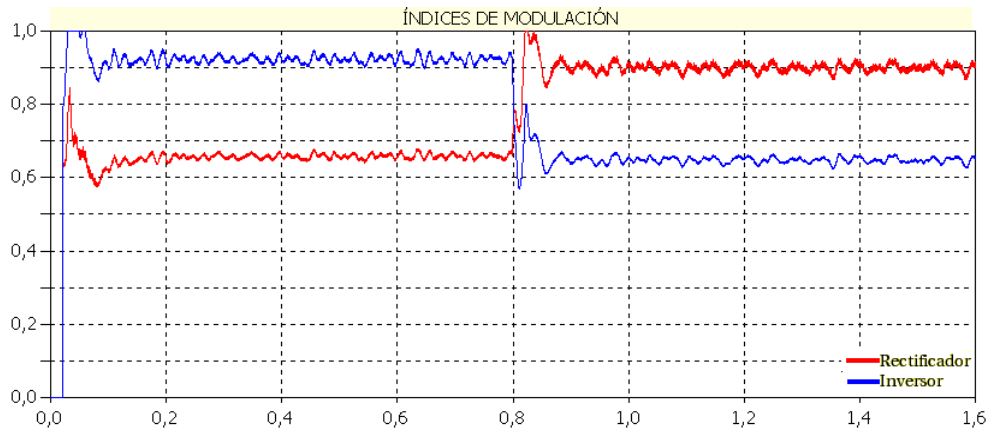


Figura 6.42: Índices de modulación

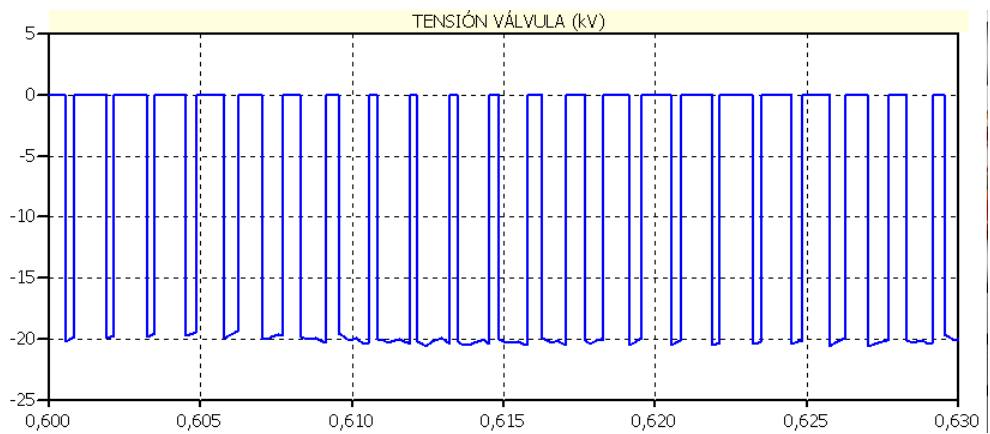


Figura 6.43: Tensión en válvula

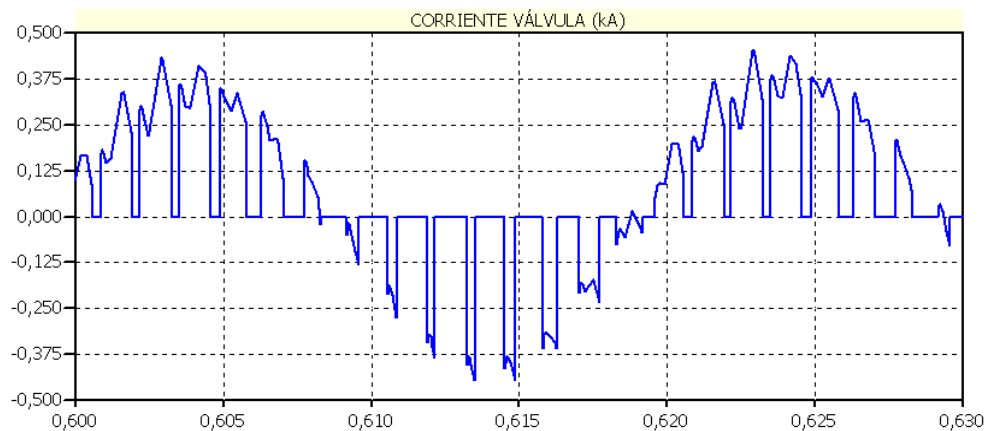


Figura 6.44: Corriente en válvula

Los resultados en ATP son satisfactorios, porque se puede observar el control de la corriente del enlace, el control de la tensión DC, el control de la potencia reactiva y las tensiones y corrientes que se presentan en las válvulas en operación normal. Resultados que comprueban el correcto funcionamiento del modelo del sistema HVDC-VSC planteado anteriormente.

Los resultados en ATP y HAGP difieren significativamente, pero se debe tener en cuenta que la simulación en ATP es más detallada porque hay presencia de armónicos, pérdidas en las unidades convertidoras y el sistema de control es diferente. Los armónicos afectan las señales de medida, lo cual afecta el correcto funcionamiento del sistema de control. Otro factor que también influye es que los elementos de medida modelados en ATP tienen un tiempo de retardo para entregar su medición.

6.2.0.1. Análisis de armónicos

A la salida del convertidor se presentan la mayor cantidad de armónicos generados por la conmutación de las válvulas, es importante analizar la onda de tensión y determinar cuales armónicos son los de mayor magnitud para así diseñar los filtros más adecuados.

La señal de tensión de salida del convertidor obtenida en la simulación aplicando una técnica PWM con una señal triangular de frecuencia 15 veces la fundamental es la mostrada en la figura 6.45. El análisis de armónicos utilizando Fourier se muestra en la figura 6.46. Los armónicos más representativos son 11, 13, 17, 19, 25, 29, 31, 41, 43, etc. En general por ser un convertidor de seis pulsos los armónicos que aparecen son los $6n \pm 1$ con $n = 1, 2, 3, 4, \dots$

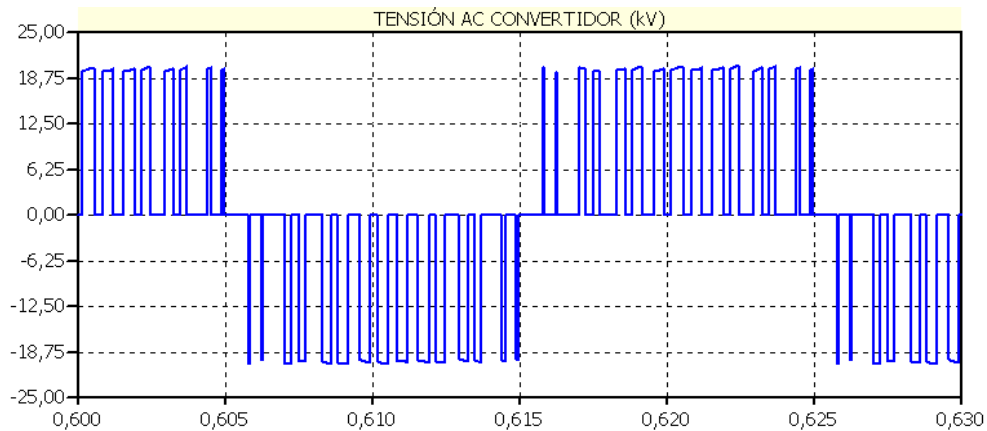


Figura 6.45: Onda de tensión-línea de salida en el convertidor

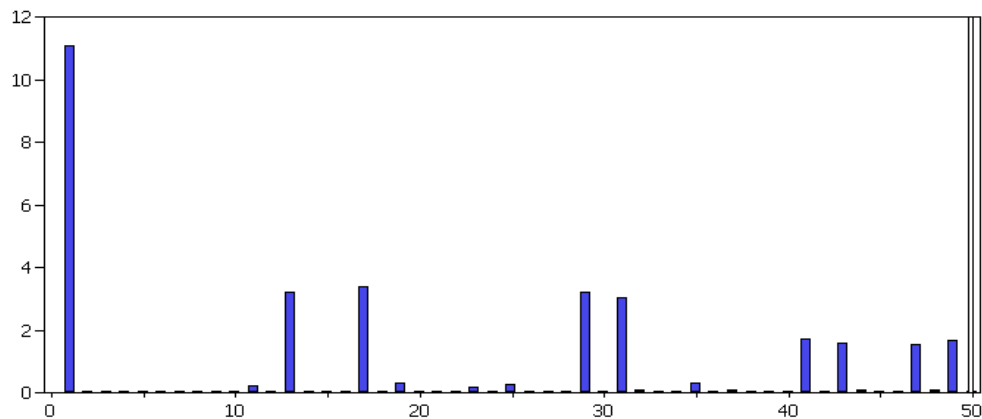


Figura 6.46: Magnitud RMS (kV) de las componentes armónicas de la tensión de línea del convertidor

6.2.1. Falla trifásica en el inversor

El segundo caso consiste en una falla trifásica que ocurre en 500ms , su duración es de 1 ciclo (20 ms), la falla ocurre en el lado del inversor.

En esta simulación es importante analizar las tensiones y corrientes que aparecen en las válvulas, porque en las fallas se presentan los mayores esfuerzos a los dispositivos semiconductores. La información obtenida es importante para la selección de las válvulas, cables, transformadores y equipos de protección.

En este tipo de falla se presenta una tensión pico de válvula $25,6\text{kV}$ y una corriente de válvula de $1,04\text{kA}$.

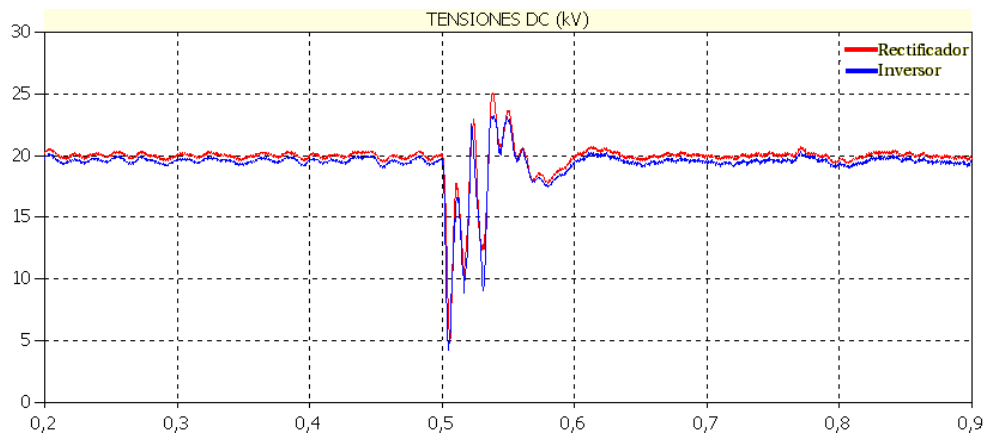


Figura 6.47: Tensiones DC ante una falla trifásica en el lado del inversor

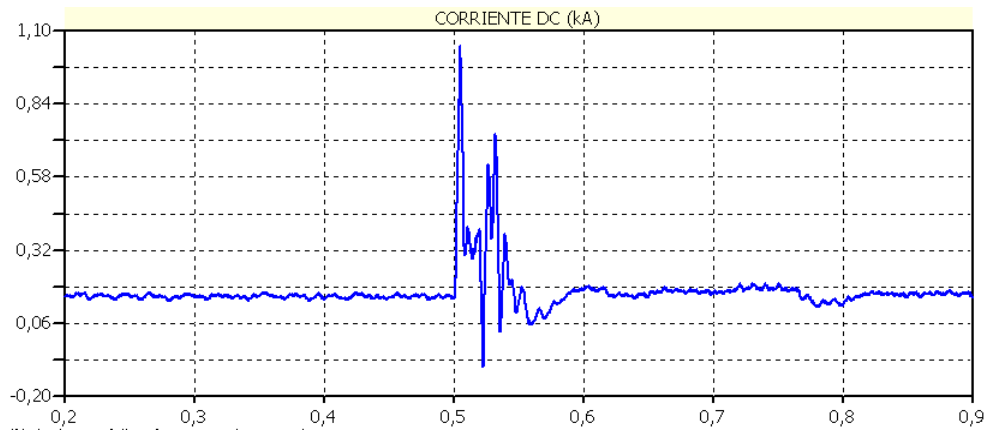


Figura 6.48: Corriente DC ante falla trifásica en el inversor

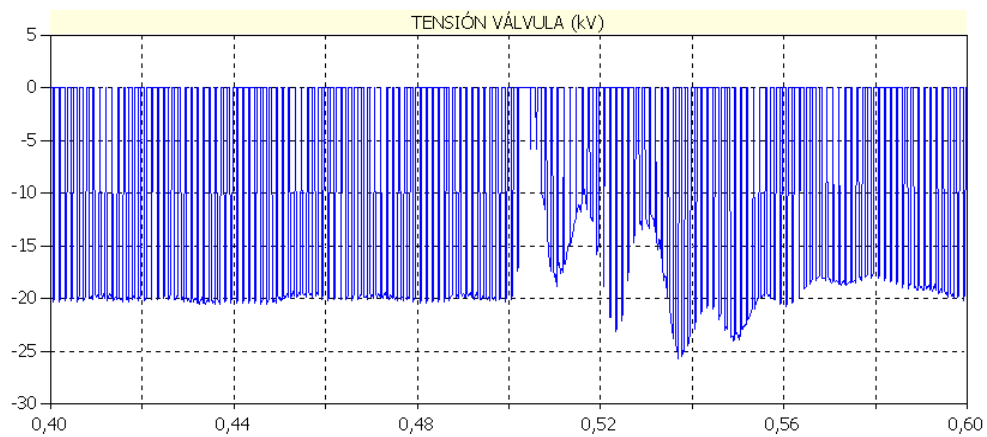


Figura 6.49: Tensión que aparece en una válvula ante falla trifásica en el inversor

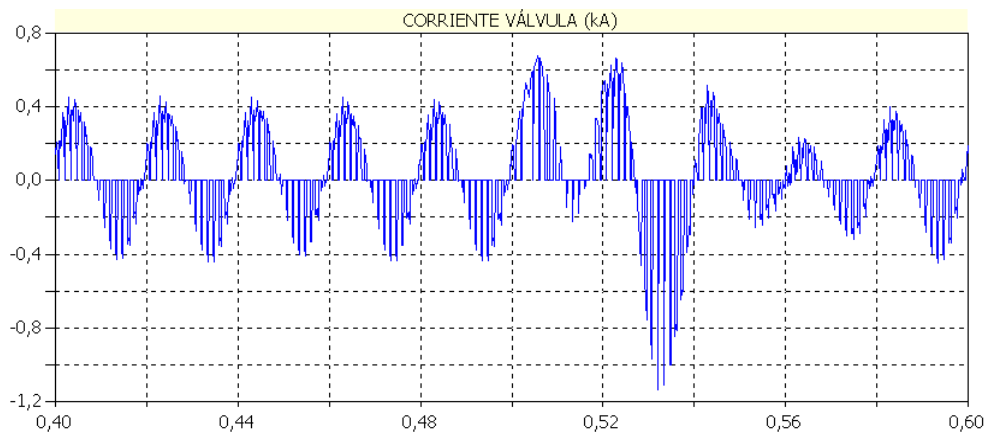


Figura 6.50: Corriente que aparece una válvula ante falla trifásica en el inversor

6.2.2. Falla en línea DC al lado del rectificador

El tercer caso consiste de una falla en la línea DC en el lado del rectificador, la falla empieza en 500ms y tiene una duración de 20ms. En esta tipo de falla se presenta la mayor corriente en la válvula 2, 13 kA.

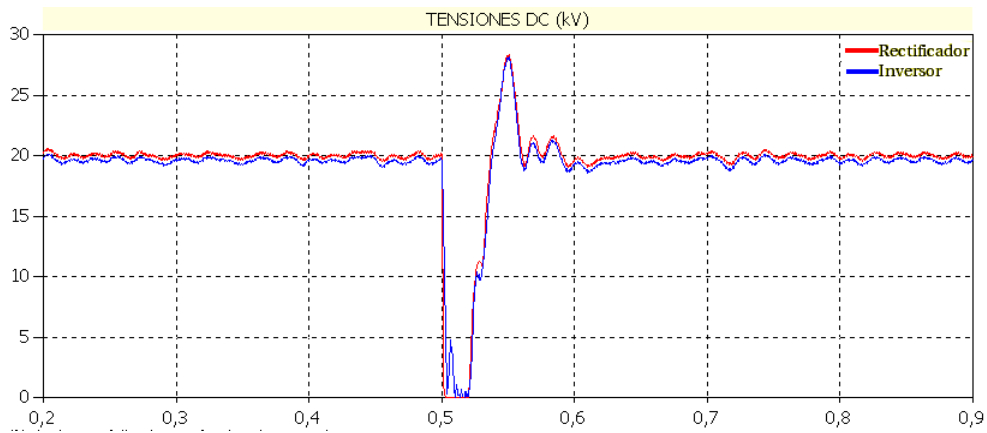


Figura 6.51: Tensiones DC cuando ocurre una falla en la línea DC en el rectificador

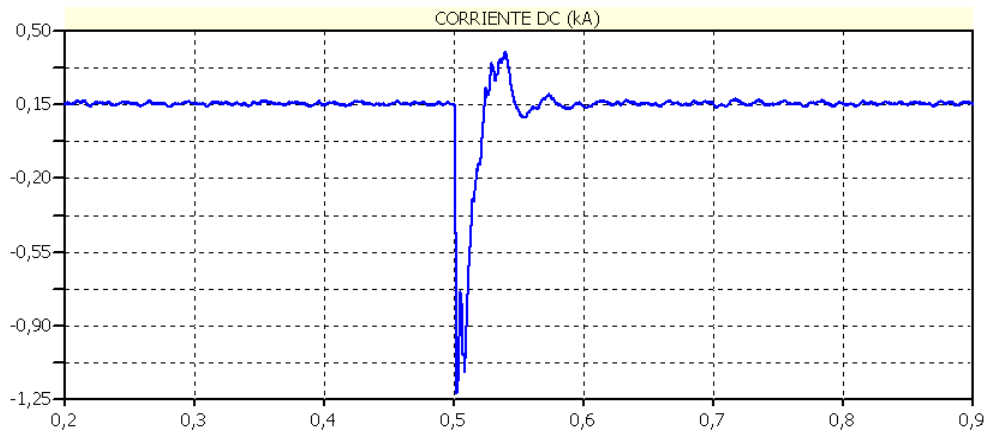


Figura 6.52: Corriente DC cuando ocurre una falla en la línea DC en el rectificador

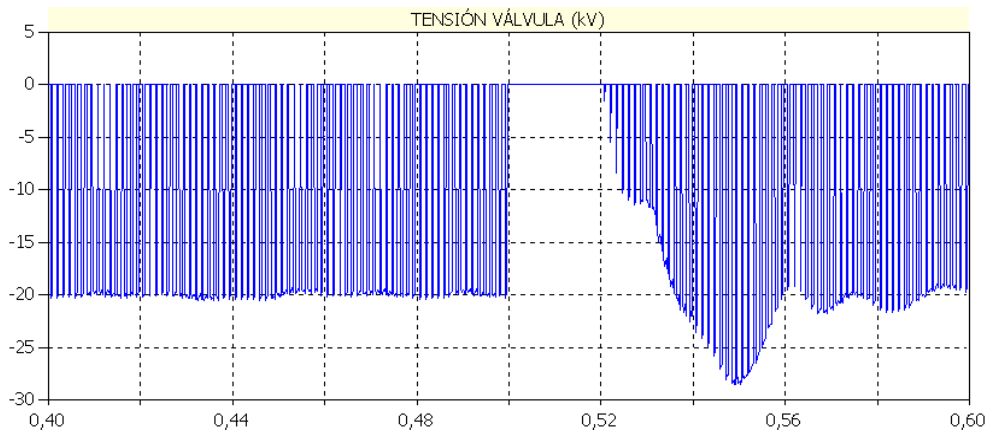


Figura 6.53: Tensión en una válvula cuando ocurre una falla en la línea DC en el rectificador

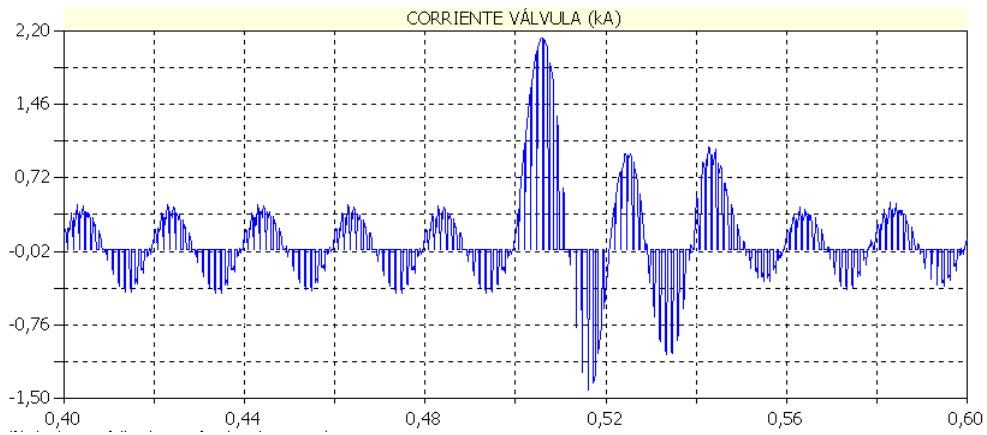


Figura 6.54: Corriente en en una válvula cuando ocurre una falla en la línea DC en el rectificador

6.2.3. Falla en línea DC al lado del inversor

El cuarto caso consiste de una falla en la línea DC en el lado del inversor, la falla empieza en 500ms y tiene una duración de 20ms . En este tipo de falla se presenta la mayor corriente en el enlace $1,52\text{kA}$ y la mayor tensión de válvula $28,9\text{kV}$.

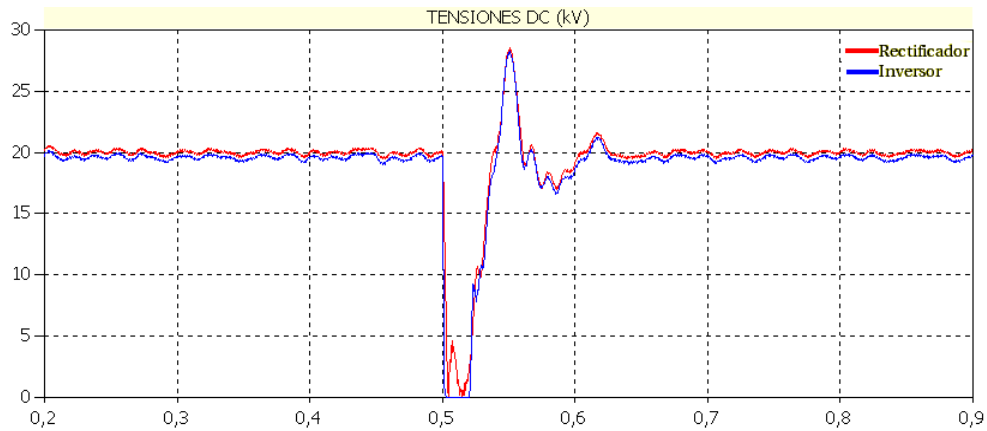


Figura 6.55: Tensiones DC cuando ocurre una falla en la línea DC en el inversor

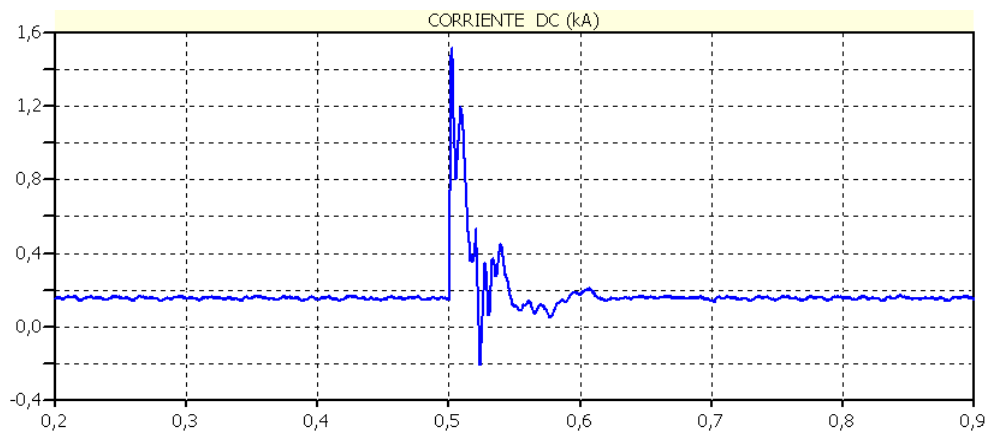


Figura 6.56: Corriente DC cuando ocurre una falla en la línea DC en el inversor

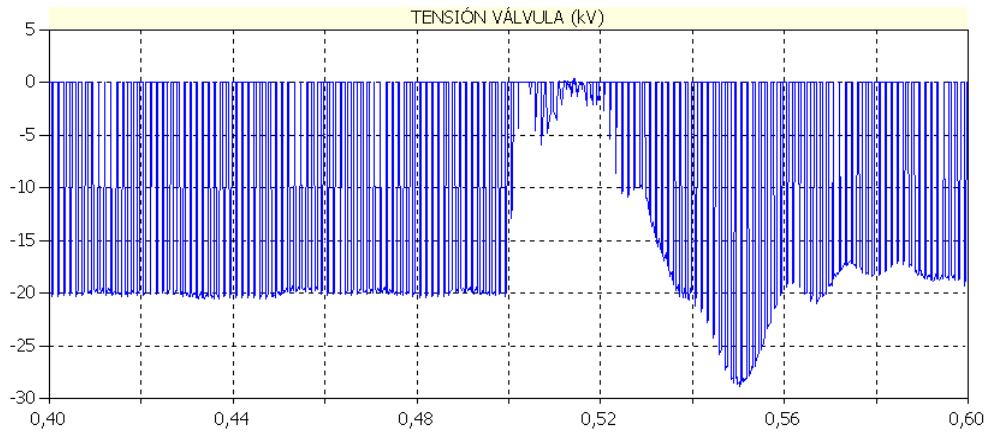


Figura 6.57: Tensión en una válvula cuando ocurre una falla en la línea DC en el inversor

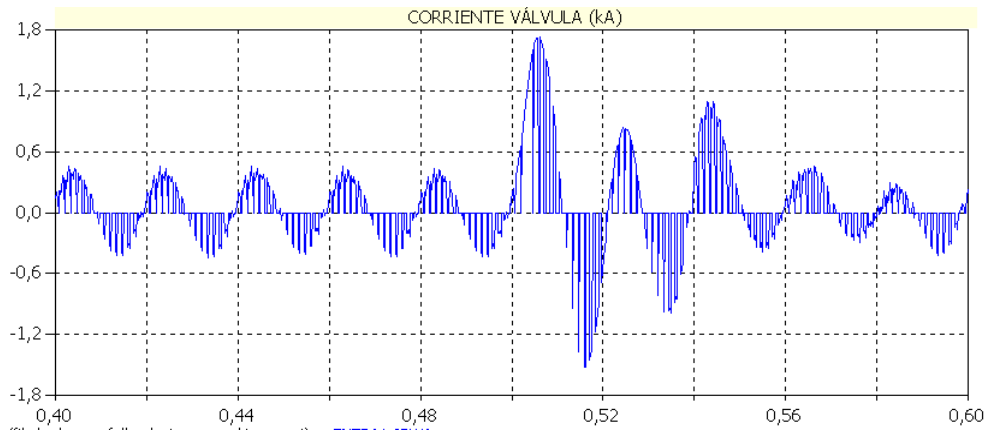


Figura 6.58: Corriente en en una válvula cuando ocurre una falla en la línea DC en el inversor

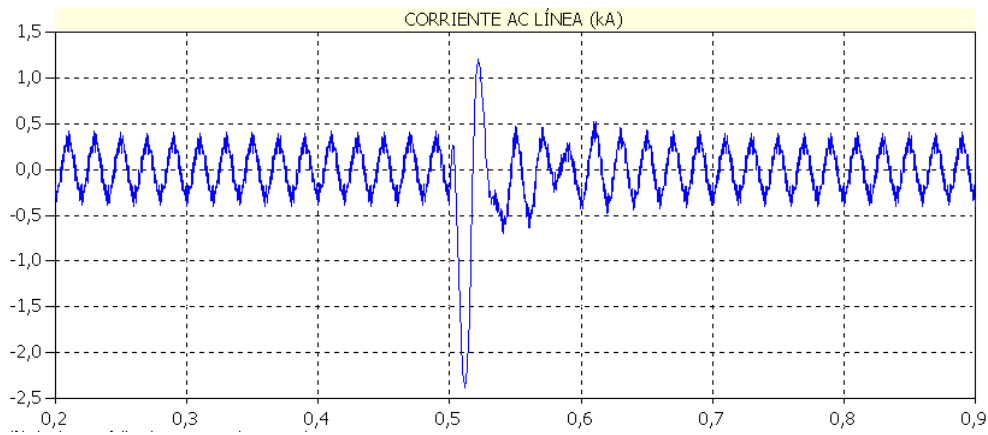


Figura 6.59: Corriente AC de línea cuando ocurre una falla en la línea DC en el inversor

6.2.3.1. Exigencias de los dispositivos

De los resultados anteriores, en operación normal y cortocircuito, se determina que las válvulas deben resistir o se deben proteger de tensiones directas de $28,9\text{ kV}$ y corrientes de cortocircuito de $2,13\text{ kA}$. La tensión y corriente máximas que aparecen en el enlace DC son $28,9\text{ kV}$ y $1,52\text{ kA}$ respectivamente. La máxima corriente AC de línea es $2,38\text{ kA}$.

Estos datos son importantes, porque permiten determinar las características de los elementos del sistema HVDC conocidas las máximas tensiones y corrientes que aparecen durante cortocircuito y operación normal, también permite diseñar un sistema de protecciones adecuado, seguro y confiable para los diferentes equipos.

Capítulo 7

Conclusiones, observaciones y aportes

El objetivo del proyecto era modelar y simular sistemas HVDC con la finalidad de apropiarse de este conocimiento, para estar en capacidad de resolver problemáticas empleando esta tecnología y dejar un precedente para investigaciones futuras. La implementación de los modelos en ATP y HAGP, permite mayor accesibilidad a la apropiación del conocimiento y desarrollo del mismo, porque estos se pueden modificar fácilmente para obtener diferentes modos de operación de los sistemas de transmisión en corriente directa.

Las principales conclusiones del proyecto son las siguientes:

- Se comprobó la flexibilidad de los sistemas HVDC-VSC para controlar potencia activa y reactiva, que puede ayudar al mejoramiento en la operación de un sistema de potencia.
- El sistema de control hace parte fundamental de la protección de los equipos, porque limita algunas variables como el ángulo de ignición y extinción en el caso CSC, que reduce las variaciones elevadas de respuestas del sistema, disminuyendo el riesgo de falla y consiguiendo una rápida recuperación después de despejada una falla.
- Los modelos implementados permiten especificar las exigencias a las cuales van a estar sometidos los equipos, lo cual facilita la determinación de sus especificaciones y su sistema de protecciones.
- Los modelos de los sistemas HVDC implementados en ATP y HAGP tienen buenos resultados que permiten hacer análisis de estos sistemas ante operación normal y presencia de perturbaciones.

Como aportes:

- Se plantean modelos de los componentes básicos de los sistema HVDC en ATPDraw, como unidades convertoras, el PLL, medidores de potencia activa y reactiva, medidores de ángulos de ignición y extinción de válvulas tipo SCR, entre otros .
- Se implementó el modelo reducido HVDC-VSC en la herramienta HAGP como un nuevo elemento de un sistema de potencia.
- Se crea un antecedente en el manejo de tecnología HVDC para la universidad, que puede ser continuado en diferentes proyectos e investigaciones que incluyan más aspectos y que analicen la viabilidad y realidad de esta tecnología en el país para el mejoramiento del sistema eléctrico colombiano.

Sugerencias

- Implementar modelos de estaciones convertidoras de más niveles para la reducción de armónicos.
- Implementar otros tipos de control como lógica Fuzzy, redes neuronales o controles mas complejos para sistemas HVDC y que operen en sistemas desbalanceados.

Bibliografía

- [Ainsworth,1968] Ainsworth, J. The Phase-Locked Oscillator - A New Control System for controlled static converter, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-87, March 1968, pp. 866-872.
- [Arrillaga J, 1998] Arrillaga, Jos. High Voltage Direct Current Transmission. The Institution of Electrical Engineers, 1998.
- [Carlson, 1996] Carlson, A. Specific requirements on HVDC converter transformers. ABB Transformers AB. 1996
- [Cory B, 1969] Cory, B. J. Convertidores y Sistemas de Corriente Continua de Alta Tensión. URMO.1969.
- [Dixon, 2000] Juan Dixon. Three-phase controlled rectifiers. Department of Electrical Engineering. Pontificia Universidad Católica de Chile, CHILE 2000.
- [Ekström A, 1970] Ekström, Ake and Liss Göte. A Refined HVDC Control System. IEEE Trans.May/June 1970.
- [Frau,2005] J. I. Frau y J. Gutiérrez. Transporte de energía eléctrica en corriente continua:HVDC. Endesa Distribución. Electrónica de potencia. 2005
- [Hingorani , 1968] Hingorani, N.G. and Chadwick, P. A New Constant Extinction Angle Control for AC/DC/AC Static Converters, IEEE Trans. Vol. PAS-83, pp 866-872, March 1968.
- [Jussila, 2004] M. Jussila, M. Salo, L. Kähkönen y H. Tuusa. A vector modulated three-phase four-quadrant rectifier - Application to a DC Motor Drive. 2004.

- [Khatri] Sood, V. Khatri, V. Jin, H. Analysis and EMTP Simulation of un HVDC Rectifier Operating With a Weak System. IEEE Trans. Power App. System pp 173-177.
- [Kimbark E, 1971] Kimbark, Eduward Wilson. Direct Current Transmission. Volumen I, Wiley Interscience, 1971.
- [Kundur P, 1994] Kundur, P. Power System Stability and Control. McGraw-Hill, Inc., 1st. edition, 1994.
- [Mejía, 2005] L. Mejía Hurtado. Herramienta software para el modelado y simulación de sistemas de eléctricos de potencia para estudios de estabilidad de tensión ante grandes perturbaciones: diseño y elaboración. Tesis de grado. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander. 2005.
- [Möltgen G, 1972] Möltgen, Gottfried. Line Commutated Thyristor Converters. Siemens Aktiengesellschaft and Pitman, 1972.
- [Rodríguez, 2007] Rodríguez, C. Herramienta Software para el modelado y simulación de sistemas eléctricos de potencia ante grandes perturbaciones. Tesis de maestría. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga 2007.
- [Rodríguez, 2003] Rodríguez C. Herramienta software para el modelado y simulación de sistemas de eléctricos de potencia ante grandes perturbaciones: diseño y elaboración. Tesis de grado. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander. 2003.
- [Sierra, 2006] E. Sierra Rodríguez. Compensador estático síncrono (STATCOM): modelado y simulación. Tesis de grado, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga 2006.
- [Sood V, 2004] Sood, Vijay K. HVDC and FACTS Controllers. Applications of Static Converters in Power Systems. Kluwer Academic Publisher, 2004.

-
- [Sood, 1994] Sood, V. Khatri, V. Jin, H. EMTP Simulation of un HVDC Rectifier Operating With a Weak System, IEEE Trans. Power App. System pp 91-95, 1994.
- [Std-1030, 1987] IEEE Guide for Specification of High-Voltage Direct -Current Systems Part I - Steady-State Performance. ANSI/IEEE Std 1030-1987.
- [Zhang, 2001] Guibin Zhang, Zheng Xu, Ye Cai. An equivalent model for simulating VSC based HVDC. IEEE Trans. 20-24. Departament of Electrical Engineering, Zhejiang University. China 2001.
- [Walshe, 2002] Walshe, K. A. Basic switching circuits. Power electronics. 2002
- [Zhao,2006] Chengyong Zhao, Study on control strategies to improve the stability of multi-infeed HVDC systems applying VSC-HVDC, IEEE, 2253-2257, 2006.

Apéndice A

Guía del usuario HAGP

Este apéndice contiene una guía de usuario de HAGP (Herramienta Software para el Análisis de Estabilidad de Gran Perturbación de Sistemas Eléctricos de Potencia). Esta herramienta corresponde al trabajo realizado por Carlos Rodríguez S [Rodríguez, 2007], [Rodríguez, 2003], Lizette Mejía [Mejía, 2005] y Edgar Enrique Sierra R [Sierra, 2006] quienes con su trabajo han creado, modificado y ampliado HAGP para que cubra la mayoría de los elementos que están presentes en un sistema de potencia.

La guía contiene la descripción de los parámetros de los sistemas HVDC implementados en HAGP. La guía completa para los demás elementos la encuentran en la referencia [Rodríguez, 2007].

A.1. Instalación

HAGP 2.0 puede ser instalado en PC con versiones 5.3, 6.5 y 7.0 de MATLAB. La carpeta con el contenido del programa tiene un tamaño aproximado de 3,4 MB. Se recomienda instalar HAGP en PC con 256 MB de RAM y procesador de 1,4 GHz o equipos con capacidades superiores. El proceso de instalación comprende los siguientes pasos:

1. Descomprima la carpeta hagd 2.0.
2. Copie la carpeta hagd en la carpeta toolbox que se encuentra en el directorio raíz de MATLAB. La ubicación del directorio raíz puede ser obtenida en la ventana de comandos por medio de la instrucción matlabroot. La carpeta hagd contiene tres subcarpetas: la carpeta bin, en la cual se encuentran los archivos de ejecución del programa, la carpeta casos que contiene los archivos de datos y por último la carpeta resultados donde se almacenan los archivos de resultados. Inicialmente, la carpeta casos contiene archivos con los

casos ejemplo incluidos en la distribución de HAGP. Todos los archivos correspondientes a casos nuevos deben incluirse en dicha carpeta.

3. Incluya en el path de MATLAB la carpeta hagp y las subcarpetas bin, casos y resultados.
4. Tenga presente que a medida que se generen archivos de resultados, estos ocupan espacio en el disco duro. En particular, archivos de resultados de sistemas de gran dimensión pueden tener un tamaño de varias decenas de MB.

A.2. Ejecución

Para ejecutar HAGP, se escribe en la ventana de comandos de MATLAB la instrucción `hagps('datos')`, donde `datos` es el nombre del archivo de MATLAB (sin la extensión `.m`) en el cual se especifican las características del sistema de potencia y de la simulación.

Los resultados se almacenan en un archivo de datos con el nombre `resultados_datos.mat`. Para acceder al menú de visualización de resultados gráficos, se escribe la instrucción `hagpr('datos')`. Con este menú se puede acceder a otros submenús que muestran resultados de magnitudes asociadas a elementos dinámicos, barras, etc. Para acceder a estos submenús, se introduce el código correspondiente.

Para el caso HVDC los casos de simulación son: `sistema_hvdc_csc.m` y `sistema_hvdc_csc.m`. Para simular el primer caso se ejecuta la instrucción `>>hagps('sistema_hvdc_csc')` y para graficar los datos se ejecuta la instrucción `>>hagpr('sistema_hvdc_csc')`. Los datos se guardan en la carpeta `resultados` con el nombre `resultados_sistema_hvdc_csc.mat`

A.3. Enlaces de corriente directa HVDC-CSC

Los parámetros para este tipo de enlace se ingresan en la matriz `hvdc1` en el orden que se muestra en la tabla A.1.

A.4. Enlaces de corriente directa HVDC-VSC

Los parámetros del enlace HVDC-VSC se colocan en la matriz `hvdc2` en el orden que se muestra en la tabla A.2. El estatus puede ser 1 para el enlace en servicio o 0 para el enlace fuera de

Columna	Parámetro	Descripción	Unidades
1	fb	Número barra inicial	-
2	tb	Número barra final	-
3	Estatus	Estatus	-
4	R_{dc}	Resistencia convertidores y línea DC	Ω
5	L_{dc}	Inductancia filtros y línea DC	H
6	N_r	Número de puentes rectificador	-
7	T_r	Tap transformador rectificador	pu
8	X_r	Reactancia de conmutación rectificador	Ω
9	K_{pR}	Ganancia proporcional rectificador	1/kA
10	K_{iR}	Ganancia integral rectificador	s/kA
11	α_{max}	Valor máximo ángulo de disparo rectificador	grados
12	α_{min}	Valor mínimo ángulo de disparo rectificador	grados
13	I_{ord}	Corriente de referencia DC	kA
14	N_i	Número de puentes inversor	-
15	T_i	Tap transformador inversor	pu
16	X_i	Reactancia de conmutación inversor	Ω
17	K_{pl}	Ganancia proporcional inversor	1/kA
18	K_{il}	Ganancia integral inversor	s/kA
19	γ_{max}	Valor máximo ángulo de extinción inversor	grados
20	γ_{min}	Valor mínimo ángulo de extinción inversor	grados
21	I_m	Margen de corriente	%

Cuadro A.1: Parámetros del enlace en corriente directa HVDC-CSC

servicio.

La potencia nominal del enlace se usa como potencia base para determinar los parámetros de los transformadores de los convertidores y la resistencia DC, esta potencia base es diferente a la potencia base del sistema.

La relación de transformación se da en la dirección de AC hacia DC en los dos lados del enlace.

El archivo de simulación para el sistema HVDC-CSC (sistema_hvdc_csc.m) en HAGP se muestra a continuación:

% tiempo de simulación

tfinal = 3.00;

% paso de integración

dtmin = 0.001;

dtmax_st = 0.1;

dtmax_lt = 1.00;

Columna	Parámetro	Descripción	Unidades
1	fb	Número barra inicial	-
2	tb	Número barra final	-
3	st	Estatus	-
4	P_{NOM}	Potencia nominal enlace	MW
5	U_{dc}	Tensión DC referencia	kV
6	I_{dc}	Corriente DC referencia	kA
7	R_{dcl}	Resistencia línea enlace	pu
8	C	Capacitancia de enlace	F
9	Q_r	Potencia reactiva referencia rectificador	pu
10	R_{tr}	Resistencia rectificador	pu
11	X_{tr}	Reactancia rectificador	pu
12	Reltr	Relación transformador rectificador	$\frac{kV}{kV}$
13	K_{udc}	Ganancia proporcional regulador 1 figura 5.3	$\frac{kV}{MW}$
14	K_{iudc}	Ganancia integral regulador 1 figura 5.3	$\frac{s kV}{MW}$
15	K_{dr}	Ganancia proporcional regulador 2 figura 5.3	$\frac{Rad}{MW}$
16	K_{idr}	Ganancia integral regulador 2 figura 5.3	$\frac{s Rad}{MW}$
17	K_{qr}	Ganancia proporcional regulador figura 5.4	$\frac{1}{MVA}$
18	K_{igr}	Ganancia integral regulador figura 5.4	$\frac{s}{MVA}$
19	Q_i	Potencia reactiva referencia inversor	pu
20	R_{ti}	Resistencia rectificador	pu
21	X_{ti}	Reactancia rectificador	pu
22	Relti	Relación transformador inversor	$\frac{kV}{kV}$
23	K_{di}	Ganancia proporcional regulador figura 5.5	$\frac{Rad}{MW}$
24	K_{idi}	Ganancia integral regulador figura 5.5	$\frac{s Rad}{MW}$
25	K_{qi}	Ganancia proporcional regulador figura 5.6	$\frac{1}{MVA}$
26	K_{iqi}	Ganancia integral regulador figura 5.6	$\frac{s}{MVA}$

Cuadro A.2: Parámetros del enlace HVDC-VSC

prd_st = 10;

it_slr = 3;

ps_slr = 5;

ps_sli = 5;

% valor máximo de los vectores F y G

tolx = 1e-06;

tolv = 1e-06;

maxitrn = 25;

% % control simulación

```

deltamax = 180;
dwmax = 0.05;
gref = 1;
%% constante filtro cálculo de frecuencia
taof = 0.05;
% frecuencia nominal
freq_n = 60;
% base
baseMVA = 900.0000;
% datos de barras
% 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17
% # tipo Pd Qd Pdo Qdo Gs Bs Gs0 Bs0 rea Vm Va basekV zona maxVm minVm
barras = [1 2 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1 1.0000 20.200 20.0000 1 1.1000 0.9000;
2 2 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1 1.0000 10.500 20.0000 1 1.1000 0.9000;
3 3 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 2 1.0000 -6.800 20.0000 1 1.1000 0.9000;
4 2 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 2 1.0000 -17.00 20.0000 1 1.1000 0.9000;
5 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1 1.0000 0.0000 230.0000 1 1.1000 0.9000;
6 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1 1.0000 0.0000 230.0000 1 1.1000 0.9000;
7 1 967.0 100.0 0.0 0.0 0.0 500 0.0 0.0 1 1.0000 0.0000 230.0000 1 1.1000 0.9000;
8 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 3 1.0000 0.0000 230.0000 1 1.1000 0.9000;
9 1 1767.0 100.0 0.0 0.0 0.0 350 0.0 0.0 2 1.0000 0.0000 230.0000 1 1.1000 0.9000;
10 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 2 1.0000 0.0000 230.0000 1 1.1000 0.9000;
11 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 2 1.0000 0.0000 230.0000 1 1.1000 0.9000;
];
%% nombres de barras
idbarras = ['b-1 ';
'b-2 ';
'b-3 ';
'b-4 ';
'b-5 ';
'b-6 ';
'b-7 ';
'b-8 '];

```

```

'b-9';
'b-10';
'b-11';
];
% cargas
% 1 2 3 4 5 6 7 8
% barra prctp prctq a kpf b kqf Vc
crg2 = [7 100 100 1.0 0.0 2.0 0.0 0.1;
9 100 100 1.0 0.0 2.0 0.0 0.1;
];
% parámetros de las unidades generadoras
% nmero bus Pg Qg Vsp REG Sn status Ra Xl Xpl Xd Xd' Xd'' Tdo' Tdo'' Xq Xq' Xq'' Tqo' Tqo'' Ft1d Ft2d Fg2d
Asatd Bsatd Lratiod Ft1q Ft2q Fg2q Asatq Bsatq Lratioq H Kd R2 X2 R0 X0 Re Xe
% 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39
40 41
% MW MVAr pu % MVA pu pu pu pu pu pu s s pu pu pu s s pu pu pu pu pu pu pu pu pu pu pu pu s s
maqsnc2 = [1 1 700 185 1.03 100 900 1 0.0025 0.2 0.0 1.8 0.3 0.25 8.0 0.03 1.7 0.55 0.25 0.4 0.05 0.9 inf 0.0 0.015
9.6 0.0 0.9 inf 0.0 0.015 9.6 0.0 6.5 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0;
2 2 700 235 1.01 100 900 1 0.0025 0.2 0.0 1.8 0.3 0.25 8.0 0.03 1.7 0.55 0.25 0.4 0.05 0.9 inf 0.0 0.015 9.6 0.0 0.9
inf 0.0 0.015 9.6 0.0 6.5 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0;
3 3 719 176 1.03 100 900 1 0.0025 0.2 0.0 1.8 0.3 0.25 8.0 0.03 1.7 0.55 0.25 0.4 0.05 0.9 inf 0.0 0.015 9.6 0.0 0.9
inf 0.0 0.015 9.6 0.0 6.175 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0;
4 4 700 202 1.01 100 900 1 0.0025 0.2 0.0 1.8 0.3 0.25 8.0 0.03 1.7 0.55 0.25 0.4 0.05 0.9 inf 0.0 0.015 9.6 0.0 0.9
inf 0.0 0.015 9.6 0.0 6.175 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0;
];
%nombres de unidades generadoras
idmaqsnc2 = ['G1';
'G2';
'G3';
'G4';
];
% excitador
exc3 = [4 1 200 0.0 0.0 0.0 7.0 -6.6 0.01 0.0 0.0;
1 1 200 0.0 0.0 0.0 7.0 -6.6 0.01 0.0 0.0;

```

```

3 1 200 0.0 0.0 0.0 7.0 -6.6 0.01 0.0 0.0;
2 1 200 0.0 0.0 0.0 7.0 -6.6 0.01 0.0 0.0;
];
% estabilizadpr
pss1 = [1 1 20 10 0.05 0.02 3.0 5.4 0.2 -0.2;
2 1 20 10 0.05 0.02 3.0 5.4 0.2 -0.2;
3 1 20 10 0.05 0.02 3.0 5.4 0.2 -0.2;
4 1 20 10 0.05 0.02 3.0 5.4 0.2 -0.2;
];
% turbina
% 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
% ng status Pr tipo K1 T1 K2 T2 K3 T3 K4 T4
turb2 = [1 1 1800 3 0.26 0.5 0.22 8.0 0.22 8.0 0.3 0.5;
2 1 1800 3 0.26 0.5 0.22 8.0 0.22 8.0 0.3 0.5;
3 1 1800 3 0.26 0.5 0.22 8.0 0.22 8.0 0.3 0.5;
4 1 1800 3 0.26 0.5 0.22 8.0 0.22 8.0 0.3 0.5;
];
% gobernador
% % 1 2 3 4 5 6 7 8
% % ng Rp Tsr Tsm Lc1 Lc2 K A
gob2 = [1 0.05 0.1 0.3 0.1 -1.0 1 0;
2 0.05 0.1 0.3 0.1 -1.0 1 0;
3 0.05 0.1 0.3 0.1 -1.0 1 0;
4 0.05 0.1 0.3 0.1 -1.0 1 0;
];
% hvdc
% f t st Rdc Ldc Nr Tr Xr Kpr Kir amax amin Iord Ni Ti Xi Kpi Kii gmax gmin Im
% 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21
% (ohms) (H) (ohms) (1/kA) (s/kA) (deg) (deg) (kA) (ohms) (1/kA) (s/kA) (deg) (deg) (%)
hvdc1 = [7 9 1 5 1.24 2 0.25 0.7 10 100 140 5 1.5 2 0.25 0.7 10 100 70 18 10;
];
%datos de los elementos de la red(líneas y transformadores)
% 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17

```

```

% f t c t r x b r0 x0 b0 tap angtap gcnx Re1 Xe1 Re2 Xe2 status
red = [1 5 1 0.0000 0.1500 0.0000 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1;
2 6 1 0.0000 0.1500 0.0000 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1;
3 11 1 0.0000 0.1500 0.0000 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1;
4 10 1 0.0000 0.1500 0.0000 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1;
5 6 1 0.0225 0.2250 0.0049 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1;
6 7 1 0.0090 0.0900 0.0019 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1;
7 8 1 0.0990 0.9900 0.0214 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1;
7 8 2 0.0990 0.9900 0.0214 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1;
8 9 1 0.0990 0.9900 0.0214 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1;
8 9 2 0.0990 0.9900 0.0214 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1;
11 10 1 0.0225 0.2250 0.0049 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1;
10 9 1 0.0090 0.0900 0.0019 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1;
];

```

% %— Matriz de control de la simulación — % %

```

mfallas = [4.00 50 9 100 0 0 0 0 0;
4.50 51 9 100 0 0 0 0 0;
];

```

```
return;
```

El archivo de simulación para el sistema HVDC-VSC (sistema_hvdc_vsc.m) en HAGP se muestra a continuación:

```

% tiempo de simulación
tfinal = 1;

% paso de integración
dtmin = 0.00002;
dtmax_st = 0.00001;
dtmax_lt = 0.001;
prd_st = 10;
it_slr = 3;
ps_slr = 5;
ps_sli = 5;

% valor maximo de los vectores F y G
tolx = 1e-3;

```

```

tolv = 1e-3;
maxitrn = 25;

% % control simulación
deltamax = 180;
dwmax = 0.05;
gref = 1;

% % constante filtro calculo de frecuencia
taof = 0.05;

% frecuencia nominal
freq_n = 50;

% base
baseMVA = 5;

% datos de barras Bs para conexion shunt
% 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17

% # tipo Pd Qd Pdo Qdo Gs Bs Gs0 Bs0 lnea Vm Va basekV zona maxVm minVm
barras = [1 1 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1 1.0000 0 10 1 1.1000 0.9000;
2 5 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1 1.0000 0 10 1 1.1000 0.9000;
3 2 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1 1.0000 0 10 1 1.1000 0.9000;
4 2 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1 1.0000 0 10 1 1.1000 0.9000;
];

% %nombres de barras
idbarras = ['b-1 ';
'b-2 ';
'b-3 ';
'b-4 ';
'b-5 '];

% cargass
% 1 2 3 4 5 6 7 8

% barra prctp prctq a kpf b kqf Vc
crg2 = [3 3.6 1.74 1.0 0.0 1.0 0.0 0.1;
4 3.6 1.74 1.0 0.0 1.0 0.0 0.1;
];

```


Apéndice B

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.

B.1. Caso de simulación HVDC-CSC

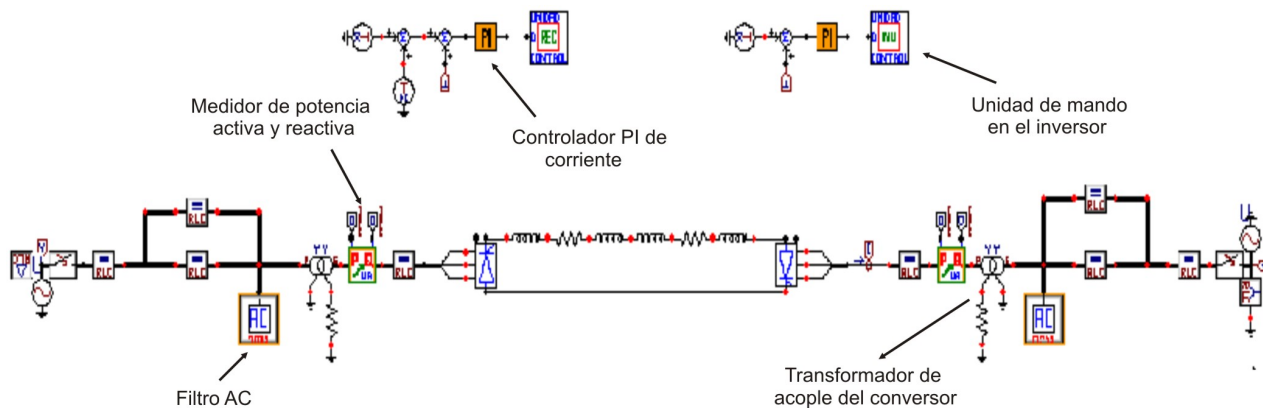


Figura B.1: Sistema HVDC_CSC modelado en ATPDRAW

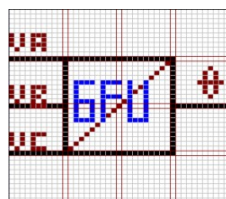


Figura B.3: Unidad de disparo de puerta

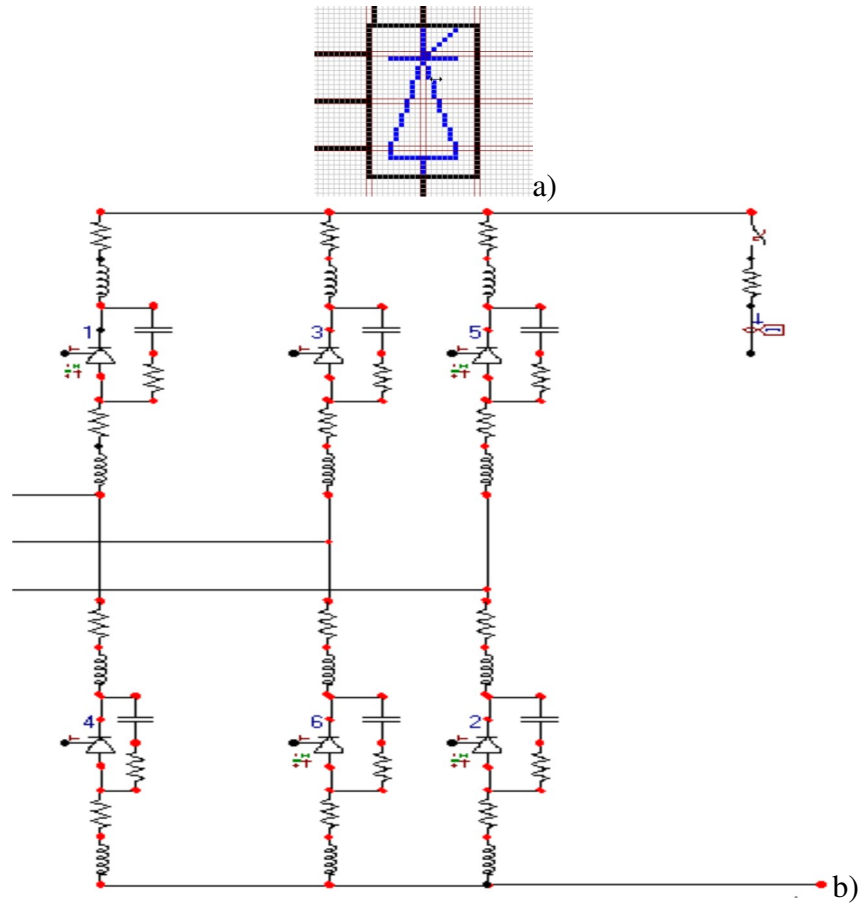


Figura B.2: Puente conversor de seis pulsos modelado en ATPDRAW a) bloque comprimido equivalente b) circuito unidad conversora

```

MODEL DQ0_GU
COMMENT
ESTE PROGRAMA REPRESENTA LA UNIDAD DE DISPARO DE PUERTA, QUE REALIZA LA
SINCRONIZACIÓN DE LAS TENSIONES DE FASES, BASADO EN UN OSCILADOR
CONTROLADO POR TENSIÓN EN CONJUNTO CON UN PLL
ENDCOMMENT
DATA KP {DFLT:0} —CONSTANTE PROPORCIONAL
      KI {DFLT:0} —CONSTANTE INTEGRAL
      VBASE {DFLT:1} —TENSIÓN PICO DE FASE
INPUT
FA_A —TENSIÓN PICO DE LA FASE A
FA_B —TENSIÓN PICO DE LA FASE B
FA_C —TENSIÓN PICO DE LA FASE C
VAR
V_ALPH —PROYECCIÓN DE LAS TENSIONES AC EN EL EJE ALFA
V_BETA —PROYECCIÓN DE LAS TENSIONES AC EN EL EJE BETA
V_SYNC —SEÑAL DE SINCRONIZACIÓN
V_CUS —SEÑAL DEL OSCILADOR SENO-COSENOS
ERROR —SEÑAL DE ERROR
C_P —SALIDA DEL CONTROLADOR PI
ERRI
ERRPI —SEÑAL DE ERROR INTEGRATIVO
THETA —SEÑAL RAMPA
FA_AB —TENSIÓN DE FASE A EN PU
FA_BB —TENSION DE FASE B EN PU
FA_CB —TENSION DE FASE C EN PU
OUTPUT THETA
HISTORY INTEGRAL(ERRI) {DFLT: 0}
HISTORY INTEGRAL(C_P) {DFLT: 0}
INIT
V_ALPH:=0
V_BETA:=0
V_SYNC:=0
V_CUS:=0
C_P:=0
ERROR:=0
ERRI:=0
THETA:=0
ENDINIT
—EN ESTA SECCIÓN SE DEFINE EL PROGRAMA, QUE SE EJECUTA EN

```

```

—CADA INTERVALO DE TIEMPO DEFINIDO COMO PASO DE SIMULACIÓN
EXEC
—CALCULO DE LA PROYECCIÓN DE LAS TENSIONES AC EN EL EJES ALFA Y BETA O DQ
  FA_AB:=(FA_A)/VBASE
  FA_BB:=(FA_B)/VBASE
  FA_CB:=(FA_C)/VBASE
  V_ALPH:=((2/3)*FA_AB) -((1/3)*FA_BB) -((1/3)*FA_CB)
  V_BETA:=(1/(SQRT(3)))*(FA_BB - FA_CB )
—CALCULO DE LA SEÑAL DE ERROR
  ERROR:= V_ALPH*V_CUS + V_BETA*V_SYNC
  ERRI:=ERROR
  ERRPI:=INTEGRAL(ERRI)
  C_P:=(ERRI*KP+KI*ERRPI)+360
—OSCILADOR CONTROLADO POR TENSION
  THETA:=INTEGRAL(C_P)
  IF THETA>=2*PI THEN
    INTEGRAL(C_P):=0
  ENDIF
—SALIDAS DEL OSCILADOR SENO-COSENOS
  V_CUS :=1*COS(THETA)
  V_SYNC :=1*SIN(THETA)
ENDEXEC
ENDMODEL

```

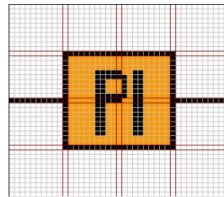


Figura B.4: Controlador PI

```

MODEL PI
COMMENT
ESTE PROGRAMA REALIZA EL CONTROL DE CORRIENTE CONSTANTE EN EL INVERSOR A
PARTIR DE LA COMPARACIÓN DE LAS CORRIENTES DE ORDEN Y DE MEDIDA
ENDCOMMENT
DATA KP {DFLT:0} —CONSTANTE PROPORCIONAL
      KI {DFLT:0} —CONSTANTE INTEGRAL

```

```

INPUT  ERROR  —SEÑAL DE ERROR

VAR    C_P    —SEÑAL DE SALIDA DEL CONTROLADOR
        ERR1  —SEÑAL DE ERROR
        ERRPI —ERROR INTEGRAL

OUTPUT  C_P

HISTORY INTEGRAL(ERR1) {DFLT: 0}

INIT   C_P:=0
        ERR1:=0
ENDINIT
—EN ESTA SECCIÓN SE DEFINE EL PROGRAMA, QUE SE EJECUTA EN
—CADA INTERVALO DE TIEMPO DEFINIDO COMO PASO DE SIMULACIÓN
EXEC

        ERR1:=ERROR
        ERRPI:=INTEGRAL(ERR1) —INTREGRACIÓN DE LA SEÑAL DE ENTRADA(ERROR)
        C_P:=- (ERR1*KP+KI*ERRPI)

ENDEXEC

ENDMODEL

```

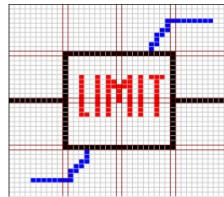


Figura B.5: Bloque limitador

```

MODEL LIMIT
COMMENT
ESTE PROGRAMA TIENE LA FUNCIÓN DE LIMITAR LA SEÑAL DE ENTRADA A UN
LIMITE SUPERIOR O INFERIOR SEGÚN SEA EL CASO
ENDCOMMENT
DATA
        LIM_IN {DFLT:0} —DATO LIMITE INFERIOR
        LIM_SU {DFLT:9999} —DATO LIMITE SUPERIOR

```

```

INPUT
    ENT      —SEÑAL DE ENTRADA AL MODELO
VAR
    SAL      —SEÑAL DE SALIDA LIMITADA
OUTPUT
    SAL
INIT
ENDINIT
—EN ESTA SECCIÓN SE DEFINE EL PROGRAMA, QUE SE EJECUTA EN
—CADA INTERVALO DE TIEMPO DEFINIDO COMO PASO DE SIMULACIÓN
EXEC
    IF ENT<=LIM_IN THEN
        SAL:= LIM_IN
    ENDIF

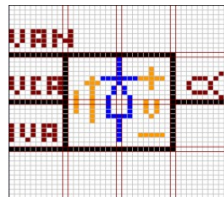
    IF ENT>=LIM_SU THEN
        SAL:= LIM_SU
    ENDIF

    IF ( LIM_IN<= ENT AND ENT <=LIM_SU) THEN
        SAL:=ENT
    ENDIF

ENDEXEC

ENDMODEL

```

Figura B.6: Medidor del ángulo α

```

MODEL MED_ALF
COMMENT

```

ESTE PROGRAMA REALIZA LA MEDICIÓN DEL ÁNGULO ALFA A PARTIR DE LA TENSIÓN Y
CORRIENTE EN LAS VÁLVULAS

ENDCOMMENT

INPUT

ANO —TENSIÓN DE ÁNODO
CAT —TENSIÓN DE CÁTODO
I_VAL —CORRIENTE DE VÁLVULA

VAR

ALFA —ÁNGULO MEDIDO
SUM —TENSIÓN EN VÁLVULA
TG —TIEMPO DE INICIO DEL ÁNGULO ALFA
TGA —TIEMPO FINAL DEL ÁNGULO ALFA
ST —VARIABLE DE ESTADO
CU — CONTADOR

OUTPUT

ALFA —ÁNGULO MEDIDO

INIT

CU:=0
TG:=0
TGA:=0
ST:=0
ALFA:=0

ENDINIT

—EN ESTA SECCIÓN SE DEFINE EL PROGRAMA, QUE SE EJECUTA EN
—CADA INTERVALO DE TIEMPO DEFINIDO COMO PASO DE LA SIMULACIÓN

EXEC

SUM:=ANO-CAT

IF (SUM>0 AND I_VAL<=0 AND ST=0) THEN

TG:=T ST:=1

ENDIF

IF (I_VAL>0 AND ST=1) THEN

CU:=CU+1

ENDIF

IF (I_VAL<=0 AND ST=1) THEN

CU:=0

```

ENDIF

IF CU=2 THEN
TGA:=T
  ALFA:=(TGA-TG)*21600
  ST:=0   CU:=0
ENDIF

ENDEXEC
ENDMODEL

```

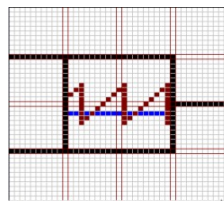


Figura B.7: Unidad generadora de pulsos

```

MODEL FIRING_R
COMMENT
ESTE PROGRAMA REALIZA LA COMPARACIÓN DE LA SEÑAL TRIANGULAR PROPORCIONAL A
  THETA CON LA SEÑAL DE SALIDA DEL CONTROLADOR PI PARA OBTENER EL
  RESPECTIVO PULSO
ENDCOMMENT

INPUT
  ALFA  —SEÑAL DE ENTRADA PROVENIENTE DEL CONTROLADOR PI
  THETA —SEÑAL DE ENTRADA PROVENIENTE DEL GFU

VAR
  FIR_1 —SEÑAL DE PULSOS HACIA EL CONVERSION
  ALFA_1 —SEÑAL DE CORRECCIÓN DEL PULSO

OUTPUT
  FIR_1

INIT
  FIR_1:=0

ENDINIT
—EN ESTA SECCIÓN SE DEFINE EL PROGRAMA, QUE SE EJECUTA EN
—CADA INTERVALO DE TIEMPO DEFINIDO COMO PASO DE LA SIMULACIÓN
EXEC

```

```

ALFA_1:=ALFA+0.38
IF (THETA<=ALFA_1 AND THETA>=ALFA) THEN
    FIR_1:=1 ELSE FIR_1:=0
ENDIF

ENDEXEC

ENDMODEL

```

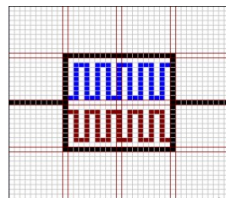


Figura B.8: Unidad desplazamiento de pulsos

```

MODEL RING2
COMMENT
ESTE PROGRAMA REALIZA EL DESPLAZAMIENTO DE LOS PULSOS EN TIEMPO DE ACUERDO
AL DATO INGRESADO EN RET
ENDCOMMENT

DATA    RET    {DFLT:0}  ---DATO DE DESPLAZAMIENTO EN TIEMPO

INPUT  X        SEÑAL DE ENTRADA (PULSOS)

VAR    TIRIS    ---SEÑAL DE PULSOS DESPLAZADOS
        STATE    ---VARIABLE DE ESTADO EN EL PROGRAMA
        TON    ---TIEMPO EN QUE SE DETECTA 1 EN LA SEÑAL DE PULSO
        TOFF    ---TIEMPO DE DETECCIÓN DE CERO EN LA SEÑAL DE PULSO

OUTPUT TIRIS
INIT
    TIRIS := 0
    STATE:=0
ENDINIT
---EN ESTA SECCIÓN SE DEFINE EL PROGRAMA, QUE SE EJECUTA EN
---CADA INTERVALO DE TIEMPO DEFINIDO COMO PASO DE SIMULACIÓN

```

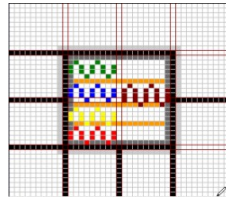


Figura B.9: Selector de señal mínima

```

EXEC
IF STATE = 0 THEN
  IF X > 0 THEN TON:=T STATE:=1 ENDIF
  ELSIF STATE = 1 THEN
    IF T-TON >= RET THEN
      TIRIS:=1 STATE:=2
    ENDIF
  ELSIF STATE=2 THEN
    IF X<=0 THEN
      TOFF:=T STATE:=5
    ENDIF
  ELSIF STATE = 5 THEN
    IF T-TOFF >= RET THEN
      TIRIS:=0 STATE:=0
    ENDIF
  ENDIF
ENDIF

ENDEXEC
ENDMODEL

MODEL MINIMO
COMMENT
ESTE PROGRAMA REALIZA LA SELECCIÓN DEL VALOR MÍNIMO DE
LAS ENTRADAS
ENDCOMMENT

INPUT
—ENTRADAS AL MODELO
  ENT
  ENT1
  ENT2
  ENT3

```

```
    ENT4
    ENT5
VAR
    MIN
OUTPUT
    MIN  —SALIDA DEL VALOR MÍNIMO
INIT
    MIN:=0
ENDINIT
—EN ESTA SECCIÓN SE DEFINE EL PROGRAMA, QUE SE EJECUTA EN
—CADA INTERVALO DE TIEMPO DEFINIDO COMO PASO DE LA SIMULACIÓN
EXEC
    IF ENT<ENT1 THEN  MIN:=ENT
    ELSE  MIN:=ENT1
    ENDIF
    IF MIN<ENT2 THEN  MIN:=MIN
    ELSE  MIN:=ENT2
    ENDIF
    IF MIN<ENT3 THEN  MIN:=MIN
    ELSE  MIN:=ENT3
    ENDIF
    IF MIN<ENT4 THEN  MIN:=MIN
    ELSE  MIN:=ENT4
    ENDIF
    IF MIN<ENT5 THEN  MIN:=MIN
    ELSE  MIN:=ENT5
    ENDIF
    MIN:=180-MIN

ENDEXEC
ENDMODEL
```

B.2. Caso de simulación del sistema de potencia con enlace HVDC

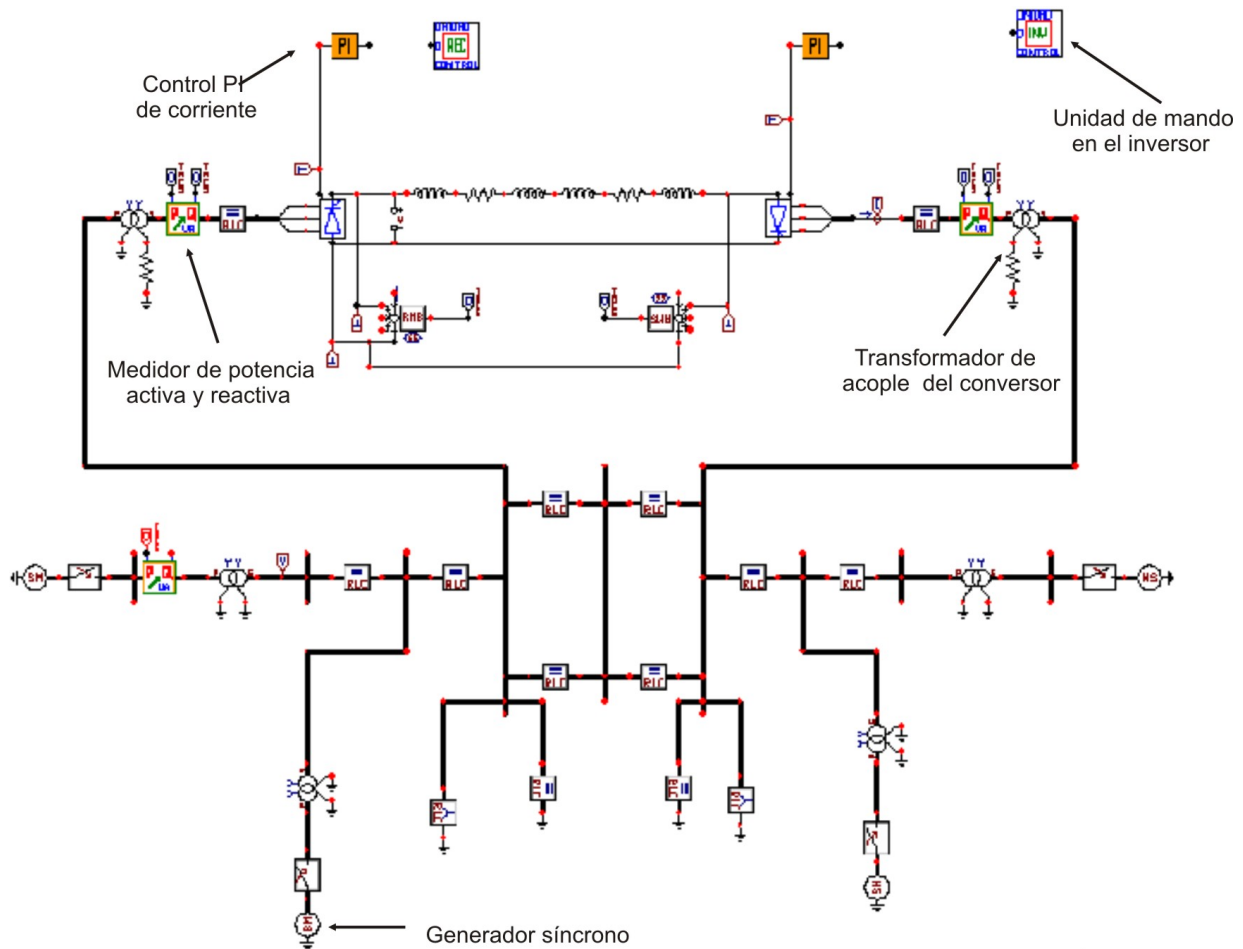


Figura B.10: Sistema de potencia con enlace HVDC modelado en ATPDRAW

B.3. Caso de simulación HVDC-VSC

A continuación se detalla el modelo del sistema de transmisión en corriente directa, con convertidores tipo VSC, realizado en ATPDRAW, el sistema se muestra en las figuras B.11 y B.12. Este modelo es empleado para hacer los diferentes tipos de fallas, para determinar las tensiones y corrientes que aparecen en las válvulas y comprobar el correcto funcionamiento del sistema de control.

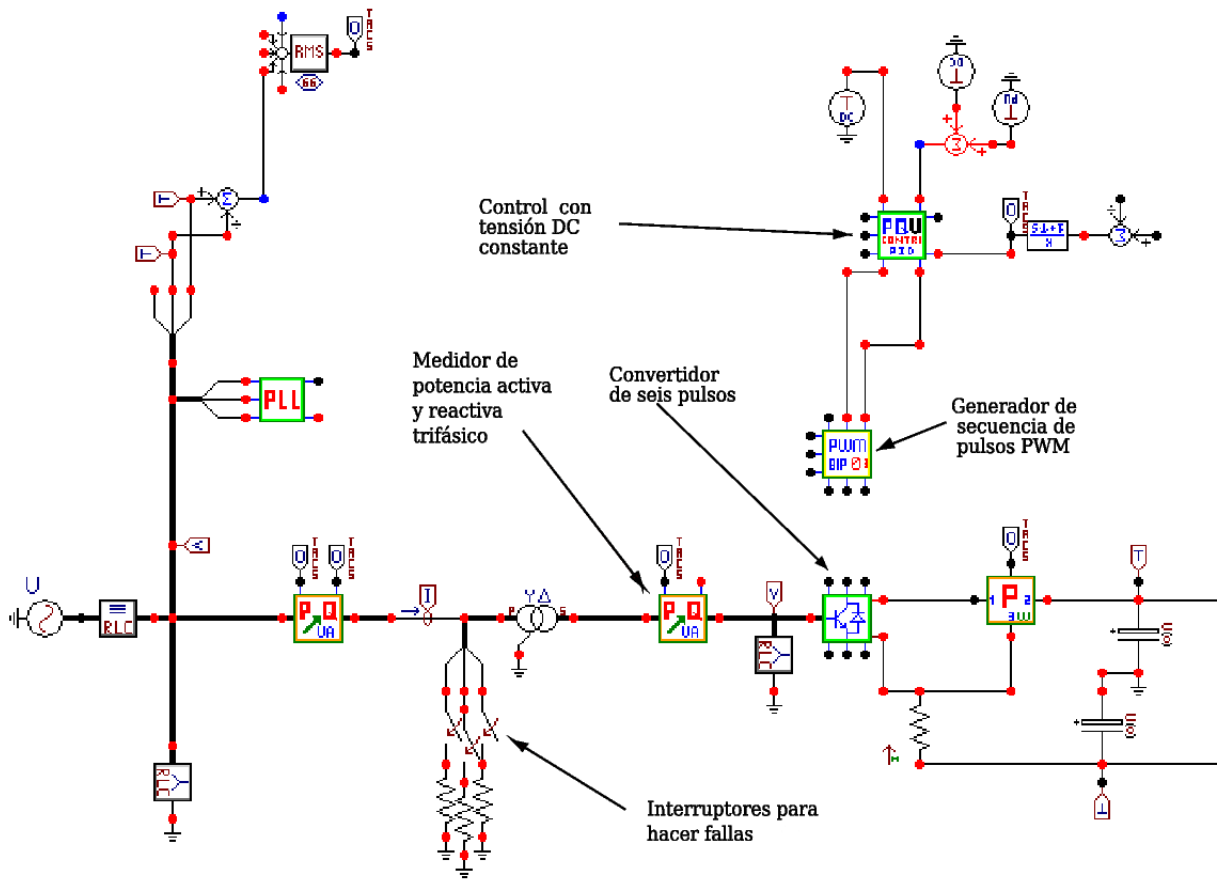


Figura B.11: Sistema HVDC-VSC modelado en ATPDRAW (Parte 1)

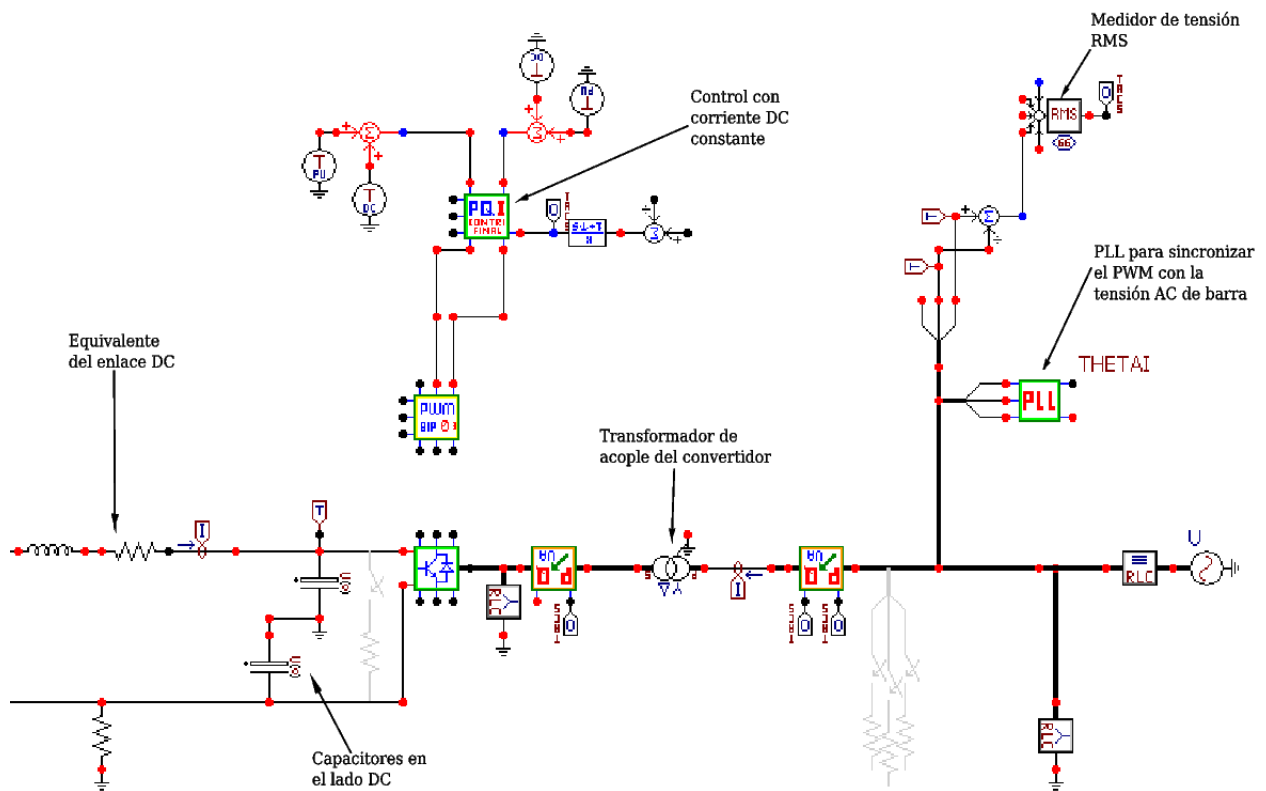


Figura B.12: Sistema HVDC-VSC modelado en ATPDRAW (Parte 2)

En este sistema aparecen diferentes elementos como lo son los convertidores, los medidores de potencia activa y reactiva, los modelos del sistema de control y el generador de la secuencia de pulsos PWM. Estos elementos se detallan a continuación:

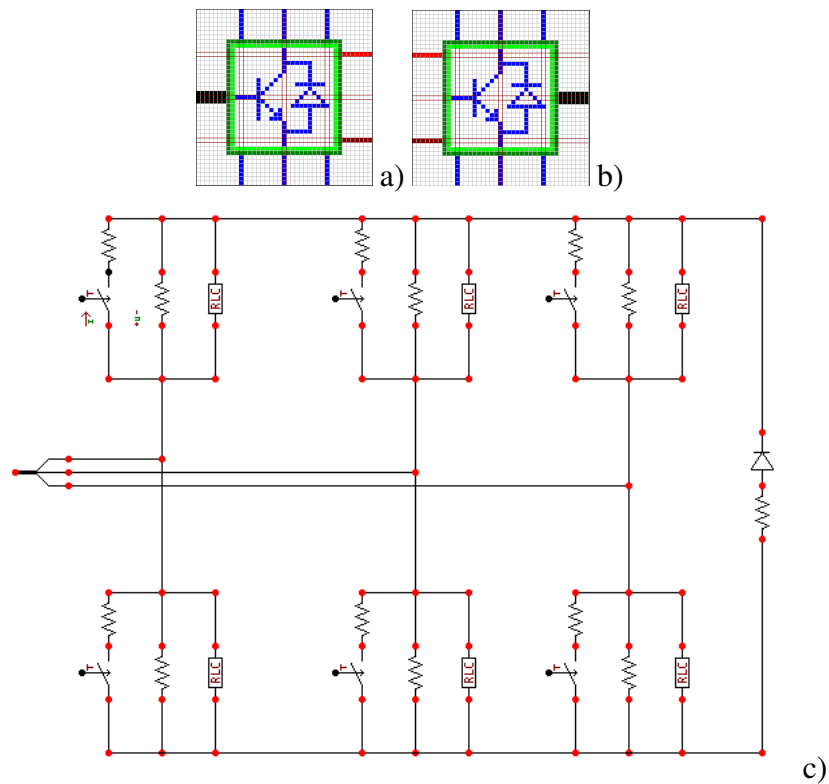


Figura B.13: Convertidores de seis pulsos, a) y b) grupo comprimido equivalente, c) circuito de los convertidores

Las estaciones convertidoras se modelan según las referencias [Walshe, 2002] y [Jussila, 2004], cada interruptor incluye una red snubber.

El sistema de control con tensión DC constante, figura B.14, está hecho como un modelo en ATP y se muestra a continuación:

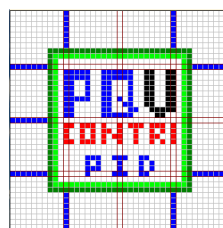


Figura B.14: Sistema de control con tensión DC constante

MODEL PQUDREX2

DATA

YY

```
ALFA
KPP1
KPI2
KQP1
KQI2
VBASE
KPPS
KPIPS
KPDPS
KMM1
INPUT PD
    UDC
    PS
    QS
    US
    UDREF
    QSREF
OUTPUT MM1
    DEL
VAR AA
    ERR1
    ERR2
    ERRPI1
    ERRPI2
    MM1
    BB
    KK1
    KK2
    DEL
    DD
    US1
    DLUD
    PCREF
    DLU DI
    DLU DD
    ERDLUD
    UD1
HISTORY INTEGRAL(ERR2) {DFLT: 0}
HISTORY INTEGRAL(ERR1) {DFLT: 0}
HISTORY INTEGRAL(DLUD) {DFLT: 0}
```

INIT

MMI:=1

DEL:=0

ERRPI1:=0

ERRPI2:=0

ENDINIT

EXEC

——SISTEMA DE CONTROL CON CORRIENTE DC CONSTANTE

——LA FUNCION DE ESTE CONTROL ES MANTENER LA TENSION DC DEL ENLACE
CONSTANTE

——EL CONTROL LO HACE A TRAVES DE DELTA (DEL)

——TAMBIEN CONTROLA LA POTENCIA REACTIVA A TRAVES DEL INDICE DE MODULACION
MMI

——LAS SEALES DE SALIDA SON MMI Y DEL QUE VAN AL BLOQUE PWM QUE SE
ENCARGA DE

——GENERAR UNA SEAL SENOIDAL CON AMPLITUD Y DESFASAJE QUE DEPENDE DE MMI Y
DEL

——LUEGO EL PWM GENERA LA SECUENCIA DE PULSOS PARA LAS SEIS VALVULAS

——LAS SEALES DE ENTRADA AL MODELO SON

——PD = POTENCIA ACTIVA MEDIDA EN EL ENLACE DC EN EL LADO DEL
RECTIFICADOR

——UDC = TENSION DEL ENLACE EN EL INVERSOR

——PS = POTENCIA ACTIVA MEDIDA EN LA ENTRADA DEL CONVERTIDOR DESPUES DEL
TRANSFORMADOR

——QS = POTENCIA REACTIVA MEDIDA EN LA ENTRADA DEL CONVERTIDOR ANTES DEL
TRANSFORMADOR

——US = TENSION AC EN LA BARRA DONDE SE CONECTA EL ENLACE

——UREF = TENSION DC DE REFERENCIA DEL ENLACE, SI EL ENLACE ES DE +/- 10
KV LA TENSION SE ESPECIFICA COMO 20KV

——QSREF = POTENCIA REACTIVA DE REFERENCIA, ES POSITIVA SI ENTRA A LOS
CONVERTIDORES

——DATOS DE ENTRADA (SE CALCULAN POR APARTE)

——YY = ADMITANCIA DEL TRANSFORMADOR DEL CONVERTIDOR, EL VALOR NO ES EN
POR UNIDAD

——ALFA = ANGULO DE LA ADMITANCIA DEL TRANSFORMADOR SE CALCULA COMO ATAN
(RT/XT), EN RADIANES

———KPP1, KQP1, KPPS ———> CONSTANTES PROPORCIONALES
 ———KPI2, KQI2, KIPS ———> CONSTANTES INTEGRALES
 ———KMMI = CONSTANTE QUE ESTA RELACIONADA CON EL FACTOR DE UTILIZACION DE LA
 TENSION DC, SI ESTE ES 1 ENTONCES KMMI=1.41421
 ———VBASE = ES LA TENSION RMS AC DE LINEA NOMINAL, A LA ENTRADA DEL
 CONVERTIDOR DESPUES DEL TRANSFORMADOR

IF T<0.02 THEN

AA:=0

BB:=0

ERR1:=0

ERR2:=0

US1:=VBASE

MMI:=0

DLUD:=0

PCREF:=0

UD1:=UDC

—IF ABS(UD1)<10 THEN UD1:=10 ENDIF

ENDIF

IF T>=0.02 THEN

—————CALCULO P REFERENCIA—CON KP-KI Y OTRA

DLUD:=(UDREF**2-UDC**2)

DLUDI:=INTEGRAL(DLUD)

DLUDD:=(UDC-UD1)/Timestep

IF ABS(DLUDI)>2.5E6 THEN INTEGRAL(DLUD):=0 ENDIF

ERDLUD:=KPPS*DLUD+KPIPS*DLUDI-KPDPS*DLUDD

IF ERDLUD>6E6 THEN ERDLUD:=6E6

ELSIF ERDLUD<-(6E6) THEN ERDLUD:=-6E6 ENDIF

PCREF:=ERDLUD+PD —————+PD+(UDC**2/UD1**2)

UD1:=UDC

—IF ABS(UD1)<10 THEN UD1:=10 ENDIF

IF US=0 THEN US1:=VBASE

ELSE US1:=US ENDIF

—————ACU A (10)—————

AA:=(US1**2*YY*COS(ALFA)-QSREF)/(US1*YY)

—————ECU D—————

DD:=US1*YY*AA*SIN(2*ALFA)-AA**2*YY*SIN(ALFA)

—————ECU K1, K2 Y B (11)—————

```

KK1:=YY*SIN(ALFA)
KK2:=-US1*YY*COS(2*ALFA)
BB:=(-KK2-SQRT(ABS(KK2**2-4*KK1*(PCREF-DD))))/(2*KK1)
-----PI(1)-----
ERR1:=(PCREF-PS)/VBASE
ERRP1:=INTEGRAL(ERR1)
IF ABS(KPI2*ERRP1)>2500 THEN INTEGRAL(ERR1):=0 ENDIF
BB:=BB+ERR1*KPP1+KPI2*ERRP1
-----PI(2)-----
ERR2:=(QSREF-QS)/VBASE
ERRP2:=INTEGRAL(ERR2)
IF ABS(KQI2*ERRP2)>3500 THEN INTEGRAL(ERR2):=0 ENDIF
AA:=AA-ERR2*KQPI-KQI2*ERRP2
-----ECU 12 DELTA-----
DEL:=ATAN2(BB,AA)+ALFA
-----ECU 13 INDICE MODULACION-----
MMI:=(KMM1*AA)/(ABS(UDC)*COS(DEL-ALFA))
IF MMI<0 THEN MMI:=0.55
ELSIF MMI>1 THEN MMI:=1 ENDIF
ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL

```

El sistema de control con corriente DC constante, figura B.15, está hecho como un modelo en ATP y se describe a continuación:

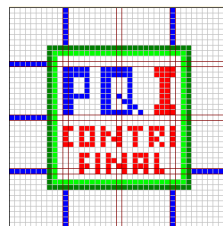


Figura B.15: Sistema de control con corriente DC constante

```

MODEL PQIREFX
DATA
YY
ALFA
KPP1
KPI2

```

```

KQP1
KQI2
VBASE
KMM1
INPUT
  UDC
  PS
  QS
  US
  IREF
  QSREF
OUTPUT MM1
  DEL
VAR  AA
  ERR1
  ERR2
  ERRPI1
  ERRPI2
  MM1
  BB
  KK1
  KK2
  DEL
  DD
  US1
  PSREF
HISTORY INTEGRAL(ERR2) {DFLT: 0}
HISTORY INTEGRAL(ERR1) {DFLT: 0}
INIT
MM1:=1
DEL:=0
ERRPI1:=0
ERRPI2:=0
ENDINIT
EXEC
———SISTEMA DE CONTROL CON CORRIENTE DC CONSTANTE
—————
———
———LA FUNCION DE ESTE CONTROL ES MANTENER LA CORRIENTE DEL ENLACE DC
CONSTANTE

```

——EL CONTROL LO HACE A TRAVES DE DELTA (DEL)
 ——TAMBIEN CONTROLA LA POTENCIA REACTIVA A TRAVES DEL INDICE DE MODULACION MMI
 ——LAS SEALES DE SALIDA SON MMI Y DEL QUE VAN AL BLOQUE PWM QUE SE ENCARGA DE
 ——GENERAR UNA SEAL SENOIDAL CON AMPLITUD Y DESFASAJE QUE DEPENDE DE MMI Y DEL
 ——LUEGO EL PWM GENERA LA SECUENCIA DE PULSOS PARA LAS SEIS VALVULAS
 ——
 ——LAS SEALES DE ENTRADA AL MODELO SON
 ——UDC = TENSION DEL ENLACE EN EL INVERSOR
 ——PS = POTENCIA ACTIVA MEDIDA EN LA ENTRADA DEL CONVERTIDOR DESPUES DEL TRANSFORMADOR
 ——QS = POTENCIA REACTIVA MEDIDA EN LA ENTRADA DEL CONVERTIDOR ANTES DEL TRANSFORMADOR
 ——US = TENSION AC EN LA BARRA DONDE SE CONECTA EL ENLACE
 ——IREF = CORRIENTE DC DE REFERENCIA DEL ENLACE, ES NEGATIVO SI SE TRANSMITE POTENCIA ACTIVA DESDE EL RECTIFICADOR HACIA EL INVERSOR
 ——QSREF = POTENCIA REACTIVA DE REFERENCIA, ES POSITIVA SI ENTRA A LOS CONVERTIDORES
 ——
 ——DATOS DE ENTRADA (SE CALCULAN POR APARTE)
 ——YY = ADMITANCIA DEL TRANSFORMADOR DEL CONVERTIDOR, EL VALOR NO ES EN POR UNIDAD
 ——ALFA = ANGULO DE LA ADMITANCIA DEL TRANSFORMADOR SE CALCULA COMO $\text{ATAN}(RT/XT)$, EN RADIANES
 ——KPP1, KQP1 ——> CONSTANTES PROPORCIONALES
 ——KPI2, KQI2 ——> CONSTANTES INTEGRALES
 ——KMMI = CONSTANTE QUE ESTA RELACIONADA CON EL FACTOR DE UTILIZACION DE LA TENSION DC, SI ESTE ES 1 ENTONCES KMMI=1.41421
 ——VBASE = ES LA TENSION RMS AC DE LINEA NOMINAL, A LA ENTRADA DEL CONVERTIDOR DESPUES DEL TRANSFORMADOR
 ——
 ——
 IF T<0.02 THEN
 AA:=0
 BB:=0
 ERR1:=0
 ERR2:=0
 US1:=VBASE

```

MM1:=0
ENDIF
PSREF:=UDC*IREF
IF T>=0.02 THEN
IF US=0 THEN US1:=VBASE
ELSE US1:=US ENDIF
-----ACU A (10)-----
AA:=(US1**2*YY*COS(ALFA)-QSREF)/(US1*YY)
-----ECU D-----
DD:=US1*YY*AA*SIN(2*ALFA)-AA**2*YY*SIN(ALFA)
-----ECU K1, K2 Y B (11)-----
KK1:=YY*SIN(ALFA)
KK2:=-US1*YY*COS(2*ALFA)
BB:=( -KK2-SQRT(ABS(KK2**2-4*KK1*(PSREF-DD))) )/(2*KK1)
-----PI (1)-----
ERR1:=(PSREF-PS)/VBASE
ERRP1:=INTEGRAL(ERR1)
IF ABS(KPI2*ERRP1)>2500 THEN INTEGRAL(ERR1):=0 ENDIF
BB:=BB+ERR1*KPP1+KPI2*ERRP1
-----PI (2)-----
ERR2:=(QSREF-QS)/VBASE
ERRP2:=INTEGRAL(ERR2)
IF ABS(KQI2*ERRP2)>3500 THEN INTEGRAL(ERR2):=0 ENDIF
AA:=AA-ERR2*KQP1-KQI2*ERRP2
-----ECU 12 DELTA-----
DEL:=ATAN2(BB,AA)+ALFA
-----ECU 13 INDICE MODULACION-----
MM1:=(KMM1*AA)/(ABS(UDC)*COS(DEL-ALFA))
IF MM1<0 THEN MM1:=0
ELSIF MM1>1 THEN MM1:=1 ENDIF
ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Un medidor de potencia activa y reactiva y su circuito interno, se muestra en la figura B.16.

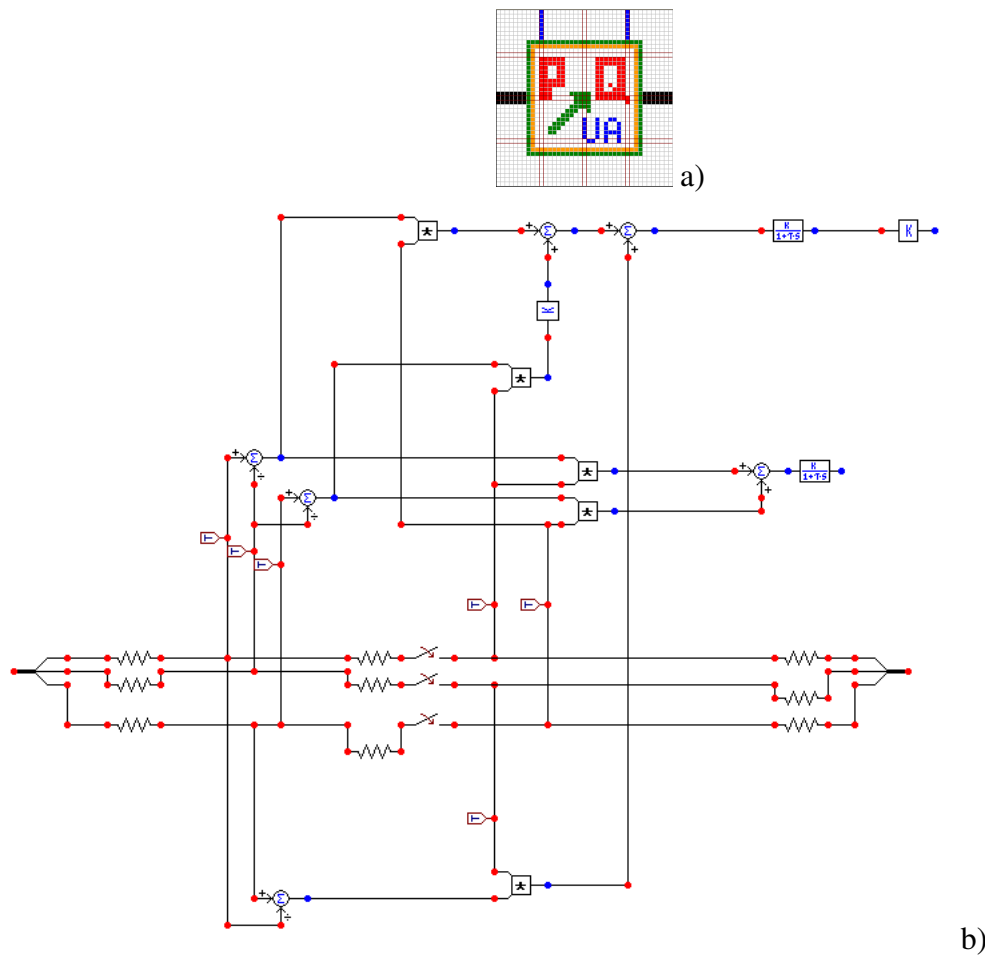


Figura B.16: Medidor de potencia activa y reactiva trifásico a) grupo comprimido, b) circuito del medidor

El generador de la secuencia de pulsos PWM trifásico se muestra en la figura B.17, y el archivo de texto de este modelo es el siguiente:

```

MODEL PWMBIX1
DATA
  FRECX
  VBASE
  AJUSTE
INPUT DLTA
  MM
  THETA
OUTPUT P1
  P2
  P3

```

```

P4
P5
P6
VAR P1
P2
P3
P4
P5
P6
PERX
NN
TRIANX
VAX
VBX
VCX
PENDX
AMPLX
PHASS

INIT
NN:=0
ENDINIT
EXEC
_____
_____GENERADOR DE PATRON DE PULSOS PWM
_____ESTE MODELO CREA UNA SEAL SENOIDAL (TRIFASICA) DE REFERENCIA QUE
DEPENDE DE LOS PARAMETROS DE ENTADA DLTA Y MM
_____ESTA SEAL SENOIDAL ES COMPARADA CON UNA SEAL TRIANGULAR PARA GENERAR LA
SECUENCIA DE PULSOS
_____
_____LAS SEALES DE ENTRADA SON:
_____DLTA ----> VIENE DEL SISTEMA DE CONTROL Y ES EL DESFASAJE QUE DEBE
TENER LA TENSION DE SALIDA DEL CONVERTIDOR
_____MM ----> VIENE DEL SISTEMA DE CONTROL Y ES EL INDICE DE MODULACION
_____THETA ----> ES LA SEAL DE SINCRONISMO QUE VIENE DEL PLL
_____
_____P1, P2, P3, P4, P5, P6 ----> SON LAS SEALES DE CONTROL QUE VAL A LAS
VALVULAS DEL CONVERTIDOR
_____
_____LOS DATOS DE ENTRADA SON
_____FRECX = FRECUENCIA DE OPERACION DEL SISTEMA PARA GENERAR LA SEAL

```

TRIANGULAR
 _____VBASE = TENSION AC RMS DEL SISTEMA A LA ENTRADA DEL CONVERTIDOR
 _____AJUSTE = ANGULO QUE SE DEBE AJUSTAR O DESFASAR LA SEAL PWM GENERADA,
 ES PARA CORREGIR ALGUN DESFASAJE QUE TIENE EL PLL RESPECTO A ESTA SEAL
 _____ Y QUE DEBE CORREGIR EL DESFASAJE INTRODUCIDO POR LOS
 _____ TRANSFORMADORES Y-D DE 30 GRADOS

AMPLX:=VBASE*2**(1/2)

PERX:=1/(15*FRECX)

IF t < 0.02 THEN

P1:=0

P2:=0

P3:=0

P4:=0

P5:=0

P6:=0

NN:=0

TRIANX:=0

VAX:=0

PHASS:=0

IF T >= (NN+1)*PERX THEN NN:=NN+1 ENDIF

ENDIF

IF t >= 0.02 THEN

PHASS:=-DLTA+AJUSTE+THETA

PENDX:=4*VBASE*2**(1/2)/PERX

IF (NN+1)*PERX >= T AND T > (NN+1/2)*PERX THEN

TRIANX:=AMPLX-PENDX*(T-(NN+1/2)*PERX) ENDIF

IF (NN+1/2)*PERX >= T THEN

TRIANX:=PENDX*(T-NN*PERX)-AMPLX ENDIF

IF T >= (NN+1)*PERX THEN NN:=NN+1 ENDIF

VAX:=MM*VBASE*2**(1/2)*COS(PHASS)

VBX:=MM*VBASE*2**(1/2)*COS(PHASS-2*pi/3)

VCX:=MM*VBASE*2**(1/2)*COS(2*pi/3+PHASS)

IF VAX >= TRIANX THEN P1:=1

ELSIF VAX < TRIANX THEN P1:=0 ENDIF

IF VBX >= TRIANX THEN P2:=1

ELSIF VBX < TRIANX THEN P2:=0 ENDIF

IF VCX >= TRIANX THEN P3:=1

```

ELSIF VCX<TRIANX THEN P3:=0 ENDIF
P4:=1-P1
P5:=1-P2
P6:=1-P3
ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL

```

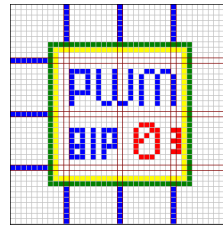


Figura B.17: Generador de secuencia de pulsos PWM

El PLL (Phase Locked Loop) se muestra en la figura B.18 y el archivo de texto se muestra a continuación:

```

MODEL PLLXX
INPUT  VIA
        VIB
        VIC
DATA   F_BASE
        VBASE
        KP
        KI
OUTPUT FREQ
        THETA
VAR    VLA
        VLC
        FREQ
        THETA
        VLAS
        VLCS
        POT
        POTI
        WW

HISTORY INTEGRAL(POT) {DFLT: 0}

```

```

HISTORY INTEGRAL(WW) {DFLT: 0}
INIT
FREC:=F_BASE
VLAS:=0
VLCS:=0
ENDINIT
EXEC
——PLL TRIFASICO CON EL METODO DE LAS POTENCIAS——

```

```

VLA:=(VIA-VIB)/(1.41*VBASE)
VLC:=(VIC-VIB)/(1.41*VBASE)
POT:=VLA*VLAS+VLC*VLCS
POTI:=INTEGRAL(POT)
WW:=KP*POT+KI*POTI+2*PI*F_BASE
——
——THETA ES EL ANGULO DE LA SEAL SENOIDAL
THETA:=INTEGRAL(WW)
IF ABS(THETA)>=2*PI THEN INTEGRAL(WW):=0 ENDIF
VLAS:=COS(THETA)
VLCS:=COS(THETA+2*PI/3)
FREC:=WW/(2*PI)
ENDEXEC
ENDMODEL

```

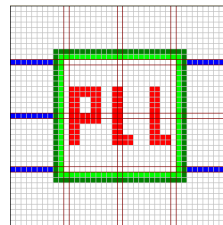


Figura B.18: PLL (Phase Locked Loop) que sincroniza el PWM