



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Morelia

División de Estudios de Posgrado e Investigación
Programa de Graduados e Investigación en Ingeniería Eléctrica

T E S I S

"DESARROLLO E IMPLEMENTACION DE UNA ESTRATEGIA DE CONTROL APLICADA A ENLACES DE CD BACK TO BACK VSC OPERANDO BAJO CONDICIONES DESBALANCEADAS"

Presenta:

Ing. Mario Alberto Santoyo Anaya

Para obtener el grado de:

Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica

Directores de tesis:

Dr. Edgar Lenymirko Moreno Goytia
Dr. Juan Ramon Rodriguez Rodriguez

Morelia, Michoacán, noviembre, 2018

Resumen

La generación de energía eléctrica está basada principalmente en la quema de combustibles fósiles, lo cual genera enormes cantidades contaminantes, el uso de fuentes de energía renovables (por ejemplo, energía solar y eólica) reduce en gran medida esta problemática. En años recientes, los avances en tecnologías de energía renovable han incrementado la capacidad de generación y han reducido costos de producción. La penetración de fuentes renovables a los sistemas de transmisión HVDC, técnicamente depende de resolver fenómenos como la integración de unidades de generación no constantes e intermitentes, donde las estructuras de control son un participante clave. De esta manera, el desarrollo de sistemas de control modernos, capaces de compensar o reducir los efectos adversos de las variaciones en la generación de potencia de fuentes renovables, es indispensable para la operación, control y protección de un sistema de transmisión HVDC. Las relativas ventajas técnicas, económicas, operativas, y de control de los sistemas HVDC empujan hacia la ampliación de la penetración de los sistemas MT-HVDC en las redes de transmisión actuales y futuras. Los retos de la implementación, integración, operación, control y protección de los MT-HVDC son un nicho de investigación muy amplio.

En este trabajo de tesis es desarrollada una estrategia de control novedosa para enlaces de CD Back-to-Back enfocado a sistemas de transmisión MT-HVDC-VSC, mediante el modelo matemático del convertidor VSC que mejora la operación y control de sistemas HVDC actuales. El modelo básico consiste en mantener la operación del VSC en Factor de Potencia unitario ante los cambios dinámicos de carga, y/o en presencia de eventos PQ. Adicionalmente, se eliminan los sensores de corriente, reduciendo el número de sensores del sistema de 7 a 4 sensores, en comparativa con sistemas basados en técnicas dq0.

La validez y comprobación del sistema de control “Single PI Loop VSC” desarrollado en este trabajo de tesis son hechas mediante diversos casos de estudio en simulación, donde un VSC operando como rectificador es sometido a cambios dinámicos en sus variables del lado de CD como en las variables del lado de CA. Adicionalmente, se construyó un prototipo de laboratorio escalado 1:25 con el propósito de evaluar el desempeño del control para los diferentes escenarios de operación. Las respuestas dinámicas presentadas por el sistema de

control desarrollado, son comparadas con el esquema de control $dq0$, al ser el esquema con mayor uso y desarrollo en la literatura. Se logro comprobar que los sistemas de control basados en la técnica $dq0$ no son capaces de mantener en óptimas condiciones de trabajo al sistema en presencia de desbalances en los voltajes de entrada de CA. En contraste, el sistema de control “Single PI Loop VSC” mostró un desempeño favorable durante los escenarios de desbalance y cambios de carga dinámicos, resolviendo las problemáticas presentadas con la técnica $dq0$.

Índice General

Abstract	iii
Resumen	v
Dedicatoria	vii
Agradecimientos	viii
Índice General	ix
Lista de Figuras	xii
Lista de Tablas	xv
Lista de Acrónimos	xvi

Capítulo 1 Introducción

1.1 Introducción	1
1.1.1 Transmisión de Energía Eléctrica Mediante HVDC	2
1.1.2 Sistemas Multiterminal MT-HVDC	3
1.2 Motivación	4
1.3 Justificación	5
1.4 Estado del Arte de Estrategias de Control para VSC	6
1.5 Objetivos y Metas	7
1.5.1 Objetivos	7
1.5.2 Metas	7
1.6 Contribución de la Tesis	8
1.7 Organización de la Tesis	9
1.8 Referencias	10

Capítulo 2 Tecnologías de las Estaciones HVDC

2.1 Generación Distribuida	13
2.2 Electrónica de Potencia en Redes de Alto Voltaje	16
2.3 Sistemas de Transmisión HVDC	17
2.4 Enlace HVDC Punto a Punto	24
2.5 Sistemas Espalda-Espalda (Back-to-Back)	25
2.6 Sistemas HVDC Multiterminal	26
2.7 Técnicas de Control para Sistemas MT-HVDC	26
2.8 Tecnologías Emergentes en los Sistemas HVDC	27
2.9 Instalación y Proyección de Sistemas HVDC-VSC	30
2.10 El Futuro en Redes de Transmisión	31
2.11 Referencias	32

Capítulo 3 El VSC ante Desbalances de Voltaje

3.1 Análisis Crítico del Estado del arte para VSC de aplicación Industrial	36
--	----

3.2 Análisis Crítico del Estado del arte para VSC-HVDC.....	41
3.2.1 Contaminación Armónica en Sistemas HVDC en Estado Estable	43
3.2.2 Armónicos en Sistemas HVDC en Estado Dinámico	44
3.3 Contribución de la Investigación Doctoral.....	52
3.4 Referencias.....	53
3.4.1 Referencias para VSCs de Baja Tensión	53
3.4.2 Referencias para desbalances de VSC en Baja Tensión	53
3.4.3 Referencias para desbalances de VSC en Alta Tensión	55

Capítulo 4 Modelado y Control del Convertidor VSC de 6 Pulsos

4.1 VSC de 6 Pulsos.....	56
4.2 Control del VSC en Marco de Referencia Rotatorio dq0.....	60
4.2.1 Modo de Control de Corriente.....	61
4.2.1.1 Diseño de Controladores para VSC en dq0	63
4.2.1.2 Control de Potencia Activa y Reactiva en un VSC	66
4.2.1.3 Análisis de la Respuesta a Escalón.....	68
4.2.2 Modo de Control de Voltaje de CD.....	69
4.2.2.1 Saturación de Variables Moduladoras del VSC	71
4.2.2.2 Análisis de la Respuesta del VSC al Escalón para el Modo de Control de Voltaje.....	73
4.3 Control para HVDC Back-to-Back	75
4.3.1 Control dq0 para rectificador VSC bajo desbalances en el lado CA	78
4.3.2 Análisis matemático de la corriente I_{CD} bajo una depresión de voltaje de CA	83
4.4 Propagación de disturbios en un sistema HVDC	85
4.5 Conclusiones del capítulo.....	88
4.6 Referencias.....	89

Capítulo 5 Sistema de Control “Single PI Loop VSC” Propuesto

5.1 Sistema de Control “Single PI Loop VSC” para Rectificador VSC-PFC para Desbalances.	91
5.2 Operación del VSC-PFC del Lado de CA en Términos Vectoriales.....	94
5.3 Modelo de la Planta del VSC en el Dominio de la Frecuencia	97
5.4 Ley de Control del Sistema de Control “Single PI Loop VSC”	99
5.5 Esquema Integrado de la Planta del Sistema de Control “Single PI Loop VSC” y Rectificador VSC-PFC.....	100
5.6 Señales de Referencia PLL	101
5.7 Modelo de Pequeña Señal del Sistema VSC-PFC.....	101
5.8 Sintonización del Controlador PI	102
5.9 Simulación del Sistema de Control con Modelo Promediado.....	103
5.10 Referencias.....	106

Capítulo 6 Casos de Estudio

6.1 Casos de Estudio en Simulación	107
6.1.1 Cambio de Carga Tipo Escalón	108

6.1.2 Simulación de Cambio en V_{CD_ref} Tipo Escalón.....	108
6.1.3 Simulación de Depresión de Voltaje Balanceada en V_{gi}	109
6.1.4 Simulación de Depresión de Voltaje Desbalanceada en V_{gi}	110
6.1.5 Simulación de Depresión de Voltaje Monofásica en V_{gi}	111
6.2 Casos de Estudio Experimentales con un Prototipo Escalado.....	112
6.2.1 Cambio de Carga Tipo Escalón	114
6.2.2 Cambio de V_{CD_ref} Tipo Escalón.....	114
6.2.3 Depresión de Voltaje Trifásica Balanceada en V_{gi}	114
6.2.4 Depresión de Voltaje Monofásica en V_{gi}	116
6.3 Desarrollo e Implementación de Prototipo Escalado de Laboratorio.....	117
6.4 Discusión.....	118
6.4.1 Equivalente en PUs Entre Sistema Simulado y Prototipo Escalado	118
6.4.2 Análisis de Operación para Diferentes Cargas	118
6.4.3 Comparación con el Método de Control Convencional, marco de referencia dq0	120
6.4.4 Comparación de Tiempos de Respuesta de Establecimiento.....	121
6.4.5 Análisis de Aplicaciones.....	122

Capítulo 7 Conclusiones, Contribuciones y Trabajos Futuros

7.1 Conclusiones	123
7.2 Contribución de la Tesis.....	124
7.3 Trabajos Futuros.....	125