

SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Tecnológico de Morelia

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION

PROGRAMA DE GRADUADOS E INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN STATCOM CON CONTROL BASADO EN UN OSCILADOR DE CONTROL DIGITAL

TESIS

que para obtener el grado de

Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica

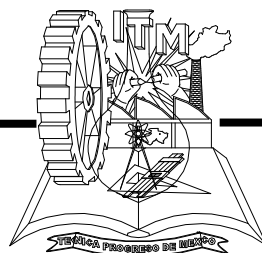
presenta

Saúl Calderón Fernández

Asesor:

Dr. Máximo Hernández Ángeles

Morelia, Mich., Enero de 2013



RESUMEN

Esta tesis trata sobre el diseño, construcción y prueba de un nuevo sistema de control para un compensador estático de VAR (STATCOM). Este nuevo sistema de control se basa en el monitoreo de la potencia reactiva, la cual se utiliza como la única variable de retroalimentación para operar un oscilador controlado digitalmente (DCO). Además de sincronizar el compensador estático de VAR con el sistema de CA, el DCO también determina el tiempo de encendido de los interruptores electrónicos del convertidor, con el fin de lograr el nivel de compensación de potencia reactiva requerida en el sistema de CA. El convertidor CA-CD-CA del compensador trabaja con un patrón de conmutación de 6 pulsos como un caso especial SVPWM. El diseño del sistema de control se desarrolló inicialmente en MATLAB® y Simulink® utilizando un modelo matemático para esta nueva forma de control y luego se construyó un prototipo experimental del STATCOM de $\pm 1\text{kVAR}$ de capacidad. El sistema de control para el compensador estático de VAR se implementó en un microcontrolador PIC16F877A. Las simulaciones por computadora y los resultados experimentales para el compensador estático de VAR y su sistema de control se presentan en esta tesis. También, se compara el desempeño del sistema de control propuesto para el compensador estático de VAR con un sistema de control basado en PLL para un STATCOM y se presentan los resultados más relevantes.

CONTENIDO

Agradecimientos	i
Resumen	ii
Abstract	iii
Contenido	iv
Índice de Figuras	viii
Índice de Tablas	xii
Nomenclatura	xiii

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Métodos de sincronización para STATCOM	6
1.2.1 Métodos con Estimadores	6
1.2.2 Métodos con PLL	9
1.2.3 Métodos con marco de referencia $dq0$	14
1.2.4 Métodos que no utilizan PLL	17
1.2.5 Detector de cruce por cero	19
1.3 Método de sincronización y control propuesto	20
1.4 Justificación	22
1.5 Objetivo	23
1.6 Metodología	23
1.7 Publicaciones	24
1.8 Aportaciones	24
1.9 Estructura de la Tesis	25

CAPÍTULO 2

COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA CON STATCOM

2.1 Introducción	27
2.2 relaciones de potencia	28
2.2.1 Potencia monofásica	29
2.2.2 Potencia trifásica	32
2.3 Compensación de potencia reactiva	34
2.4 Compensador estático de VAR	36
2.5 Convertidor CA-CD-CA empleado en el STATCOM	40
2.6 Compensador estático avanzado de VAR (STATCOM)	43
2.7 Principio de operación del STATCOM	45
2.7.1 Control del STATCOM por ángulo de desfase α	51
2.7.2 Control del STATCOM con voltaje de CD constante	52
2.8 Componentes de un sistema de control de VAR	54
2.9 Requerimientos generales del control de un STATCOM	57
2.10 Operación bajo condiciones no ideales	58

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL CONTROL DEL STATCOM

3.1 Introducción	59
3.2 Interacciones entre el control de voltaje CA y CD del STATCOM	60
3.3 Modelado Matemático en el marco dqo del STATCOM	62
3.4 Linealización del modelo matemático del STATCOM	66
3.5 Parámetros del controlador del STATCOM basado en DCO	68

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DEL CONTROL DE UN STATCOM BASADO EN UN OSCILADOR DE CONTROL DIGITAL

4.1 Introducción	72
------------------	----

4.2 Implementación en simulink de un sistema de control de VAR basado en un STATCOM SVPWM con DCO	73
4.2.1 Programación de la técnica SVPWM con mínima Amplitud de Rizado	74
4.2.2 Técnica SVPWM con número de conmutaciones reducidas basado en portadora	78
4.2.3 Técnica SVPWM estándar basado en portadora	82
4.2.4 Técnica con sobremodulación SVPWM para obtener 6 pulsos	85
4.3 Estudio del control del STATCOM	85
4.3.1 Cambio de la operación del STATCOM de modo inductor a modo capacitor	87
4.3.2 Conexión de carga inductiva	88
4.3.3 Conexión de carga capacitiva	91
4.3.4 Cambio de fase en la red de CA	92
4.3.5 Cambio de modo capacitor a modo inductor en sobremodulación	95

CAPÍTULO 5

IMPLEMENTACIÓN, OPERACIÓN Y PRUEBA DEL CONTROL DEL STATCOM BASADO EN UN DCO

5.1 Introducción	99
5.2 Equipo utilizado	100
5.3 Descripción del STATCOM	101
5.4 Reactancia de enlace	103
5.5 Capacitor de CD	103
5.6 Fuente de alimentación de potencia y excitador de transistores del STATCOM	105
5.7 IGBTs de potencia y circuitos de amortiguamiento	107
5.8 Implementación de la realimentación del STATCOM	109
5.8.1 Diseño de la interfaz analógica	110
5.9 Control digital para el STATCOM con DCO	111
5.10 Operación del sistema de control de potencia reactiva	116
5.10.1 Corriente de línea del STATCOM	116
5.10.2 Voltajes del sistema eléctrico y del STATCOM	117

5.10.3 Señal de potencia reactiva	118
5.10.4 Corriente y voltaje en el capacitor de CD	119
5.11 Respuesta transitoria del compensador	120
5.11.1 Aplicación de carga inductiva	120
5.11.2 Cambio de referencia inductiva	121
5.11.3 Aplicación de carga capacitiva	122
5.11.4 Cambio de referencia capacitiva	124
5.11.5 Cambio de referencia capacitiva a inductiva	125

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1 Conclusiones	127
6.2 Trabajos futuros	128

APÉNDICES

Apéndice A

TÉCNICAS DE CONMUTACIÓN PARA EL CONTROL PWM DEL STATCOM

A.1 Introducción	130
A.2 Inversor trifásico	131
A.3 Pulsos modulados en anchura con vectores espaciales (SVPWM)	136
A.3.1 Vector espacial PWM	136
A.4 Formas de modulación especial	147
A.4.1 Reducción en el número de conmutaciones (5 segmentos)	147
A.4.2 Modulación discontinua	149
A.5 Máximo índice de modulación	150

Apéndice B

MICROCONTROLADORES PIC 16F877A

B.1 Instrucciones y memoria del PIC16F877A	152
B.2 Registros de control	154