

# Tabla de contenido

Resumen.....	ii
Agradecimientos .....	iv
Índice de Figuras.....	vii
Índice de Tablas .....	ix
Nomenclatura.....	x
Abreviaciones .....	xi
1. Introducción General .....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Alcances del proyecto.....	3
1.4. Metodología.....	3
1.5. Revisión Bibliográfica.....	4
1.6. Aplicaciones del STATCOM .....	6
2. Diseño del STATCOM .....	9
2.1. Marco Teórico .....	9
2.1.1. Topología del inversor .....	11
2.1.2. Diseño definitivo del STATCOM.....	12
2.1.3. Modulación .....	13
2.1.4. Selección de componentes y mantenimiento.....	16
2.1.5. Modelamiento dinámico y simulación a frecuencia fundamental para una fase	23
2.1.6. Análisis dinámico .....	27
3. Construcción e Implementación .....	31
3.1. Diseño de las etapas.....	31
3.1.1. Etapa de Sensado .....	31
3.1.2. Etapa del inversor .....	33
3.1.3. Etapa de Alimentación.....	35
3.1.4. Etapa de Control y Programación.....	37
3.1.5. Etapa de Carga RL.....	37

3.2.	Diseño de las Tarjetas Impresas .....	37
3.2.1.	Construcción de las tarjetas Impresas .....	38
3.3.	Estructura de Almacenamiento.....	39
4.	Resultados .....	42
4.1.	Consideraciones del modelo con carga <i>RL</i> .....	42
4.2.	Formas de onda de simulación. ....	44
4.3.	Formas de ondas experimentales.....	55
4.4.	Discusión y análisis de resultados .....	61
4.4.1.	Primer caso .....	61
4.4.2.	Segundo caso .....	62
4.4.3.	Tercer caso .....	62
5.	Conclusiones y Análisis.....	63
5.1.	Conclusión General .....	63
5.2.	Implementación y puesta en marcha .....	63
5.3.	Resultados.....	65
5.4.	Trabajos futuros.....	67
6.	Bibliografía .....	68
Anexo A.	Transformación <i>dq</i> .....	70
Anexo B.	Código.....	74

# Índice de Figuras

Fig. 1. 1. STATCOM Hitachi, de 20[MVA]. .....	7
Fig. 2. 1. Esquema básico del STATCOM conectado a una carga RL. ....	9
Fig. 2. 2. Equivalencia simplificada del STATCOM .....	10
Fig. 2. 3. Triangulo de Potencias. ....	11
Fig. 2. 4. Esquema de un inversor trifásico fuente de voltaje.....	11
Fig. 2. 5. Esquema de un inversor trifásico construido con 3 inversores monofásicos. ....	12
Fig. 2. 6. Esquema eléctrico del inversor trifásico del compensador (en vacío). ....	13
Fig. 2. 7. Formas de onda involucrada en la SPWM. ....	14
Fig. 2. 8. Comparación entre <i>a) Vmod1 y Vtri b) Vmod2 y Vtri</i> .....	15
Fig. 2. 9. Resta entre las señales PWM. ....	16
Fig. 2. 10. Esquema simplificado del sistema a 6[kHz]. ....	17
Fig. 2. 11. Gráfico representando la Tabla 1. ....	18
Fig. 2. 12. Análisis de Fourier para $M = 0.6$ . ....	19
Fig. 2. 13. Simplificación del circuito de la Fig. 13 para cálculo de inductancia. ....	19
Fig. 2. 14. Análisis de Fourier para la corriente de entrada.....	20
Fig. 2. 15. Esquema básico del compensador para el cálculo de C. ....	21
Fig. 2. 16. Gráfica del voltaje en el lado DC. ....	22
Fig. 2. 17. Equivalencia para el modelamiento. ....	24
Fig. 2. 18. Voltaje Vdc en el lado DC de la fase A. ....	26
Fig. 2. 19. Corriente en el lado AC de la Fase A en estado estacionario. ....	26
Fig. 2. 20. Comparación de fase entre corriente y voltaje en la Fase A del lado AC.....	27
Fig. 2. 21. Conexión del compensador y distribución de corrientes. ....	30
Fig. 3. 1. Distribución eléctrica en potencia y control del compensador. ....	31
Fig. 3. 2. Esquema de la etapa de control. ....	32
Fig. 3. 3. Circuito del sensor de voltaje. ....	32
Fig. 3. 4. Adaptador corriente-voltaje.....	33
Fig. 3. 5. Esquema de la etapa del inversor. ....	33
Fig. 3. 6. Circuito del driver del inversor. ....	34
Fig. 3. 7. Conexión del circuito integrado IR2104 hacia el inversor.....	34
Fig. 3. 8. Esquema del inversor. ....	35
Fig. 3. 9. Esquema de alimentación para la electrónica involucrada en el control.....	36
Fig. 3. 10. Diseño del sensor de voltaje (doble cara).....	38
Fig. 3. 11. Maquina CNC construyendo una tarjeta impresa .....	39
Fig. 3. 12. Disposición por bloques de la estructura.....	40

Fig. 3. 13. Estructura definitiva del compensador.....	40
Fig. 3. 14. Disposición física de cada etapa del compensador .....	41
Fig. 4. 1. Esquema monofásico general con carga $RL$ . Válido para la fase A, B y C . .....	43
Fig. 4. 2. Corriente $I_a$ que circula por el STATCOM en estado estacionario. ....	46
Fig. 4. 3. Voltaje $V_{sa}$ versus Corriente Total $I_{ta}$ en estado estacionario.....	46
Fig. 4. 4. Corrientes: Corriente total $I_{ta}$ , $I_{ca}$ e $I_a$ .....	47
Fig. 4. 5. Voltaje $V_{p1}$ en fase con el voltaje de alimentación $V_{sa}$ . ....	47
Fig. 4. 6. Gráfica del voltaje DC en estado estacionario .....	48
Fig. 4. 7. Forma de onda de la corriente que circula por el STATCOM. ....	49
Fig. 4. 8. Corriente total $I_{ta}$ versus voltaje $V_s$ . ....	50
Fig. 4. 9. Corrientes: Corriente total $I_{ta}$ , $I_a$ y corriente de carga $I_{ca}$ .....	50
Fig. 4. 10. Voltaje $V_{p1}$ en fase con el voltaje de alimentación $V_{sa}$ . ....	51
Fig. 4. 11. Triángulo de potencias del caso. ....	52
Fig. 4. 12. Corriente $I_a$ que circula por el STATCOM. ....	54
Fig. 4. 13. Forma de onda de corriente total y voltaje de alimentación. ....	54
Fig. 4. 14. Corriente total $I_{ta}$ , corriente $I_a$ y corriente de carga $I_{ca}$ .....	55
Fig. 4. 15. Voltaje $V_{p1}$ en fase con el voltaje de alimentación $V_{sa}$ . ....	55
Fig. 4. 16. Corriente y voltaje del sistema ( $I_{ta}$ vs $V_{sa}$ ). ....	56
Fig. 4. 17. Corriente y voltaje del sistema ( $I_{ta}$ vs $V_{sa}$ ).....	57
Fig. 4. 18. Perspectiva secundaria de las formas de onda involucradas. ....	58
Fig. 4. 19. Voltaje de alimentación $V_{sa}$ versus $V_{p1}$ para $20[V]_{rms}$ .....	58
Fig. 4. 20. Formas de onda de $I_{ca}$ , $V_{sa}$ y $I_{ta}$ , .....	59
Fig. 4. 21. Voltaje de alimentación $V_{sa}$ versus $V_{p1}$ para $20[V]_{rms}$ .....	59
Fig. 4. 22. Corriente de carga y total en fase, desfasadas en $27.7^\circ$ con respecto a $V_s$ .....	60
Fig. 4. 23. Corriente de carga, corriente total y voltaje de alimentación.....	60
Fig. 4. 24. Forma de onda del voltaje $V_{p1}$ con $V_{sa}$ . ....	61

# Índice de Tablas

Tabla 1. Barrido de magnitud de armónicos presentes en la corriente IFi para distintos valores de moduladora.....	18
Tabla 2. Valores de componentes.....	23
Tabla 3. Valores asignados a los componentes para efectos de simulación e implementación en este caso. ....	44
Tabla 4. Valores asignados a los componentes para efectos de simulación e implementación en este caso. ....	51

# Nomenclatura

$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$ : Voltajes de alimentación de la fuente para la fase A, B y C respectivamente.

$I_a, I_b, I_c$ : Corrientes de entrada al STATCOM, en su parte AC para la fase A, B y C respectivamente.

$I_{ca}, I_{cb}, I_{cc}$ : Corrientes de carga para la fase A, B y C respectivamente.

$I_{ta}, I_{tb}, I_{tc}$ : Corrientes totales para la fase A, B y C respectivamente.

$I_a^d, I_b^d, I_c^d$ : Corrientes directas para la fase A, B y C respectivamente.

$I_a^q, I_b^q, I_c^q$ : Corrientes cuadratura para la fase A, B y C respectivamente.

$V_{dc1}, V_{dc2}, V_{dc3}$ : Voltajes DC para las salidas del convertidor de la fase A, B y C respectivamente.

$R_{dc}$ : Resistencia de estabilización del lado DC para fase A, B y C.

$L$ : Filtro lado AC del STATCOM para fase A, B y C.

$C$ : Capacitor para fase A, B y C.

$R_c$ : Resistencias de carga para fase A, B y C.

$L_c$ : Inductancias de carga para fase A, B y C.

$M$ : Índice de modulación

$md$ : Moduladora directa

$mq$ : Moduladora cuadratura

$f_{tri}$ : Frecuencia de señal portadora

$I_f$ : Corriente de fuga

$Z_L$ : Impedancia de carga RL

$\beta$ : Ángulo entre  $V_{sa}$  y la señal moduladora.

# Abreviaciones

VSC: Convertidor fuente de voltaje (Voltage Source Converter)

STATCOM: Compensador estático (Static Compensator)

DC: Corriente directa (Direct Current)

AC: Corriente alterna (Altern Current)

RMS: Valor eficaz de voltaje (Root Mean Square)

PLL: Lazo de seguimiento de fase (Phase Locked Loop)

PI: Control Proporcional – Integrador

DSP: Procesador digital de señales (Digital Signal Processor)

PWM: Modulación por ancho de pulsos (Pulse Width Modulation)

SPWM: Modulación por ancho de pulso senoidal (Sine Pulse Width Modulation)

MSPWM: Modulación por ancho de pulso senoidal modificada (Modified Sine Pulse Width Modulation)

PCC: Punto común de conexión

RL: Carga compuesta por una resistencia y una inductancia

IGBT: Transistor bipolar de compuerta aislada (Insulated-Gate Bipolar Transistor)

ERN: Energías renovables no convencionales

OP: Amplificador operacional (Operational Amplifier)

LCEEP: Laboratorio de Conversión de Energía y Electrónica de Potencia

CNC: Control numérico por computadora