

Índice

1. Introducción general	17
1.1. Introducción	17
1.1.1. Descripción de la problemática	17
1.1.2. Descripción del proyecto	20
1.2. Estado del arte	21
1.3. Objetivos	25
1.3.1. Objetivo general	25
1.3.2. Objetivos específicos	25
1.4. Alcances y limitaciones	26
1.4.1. Alcances	26
1.4.2. Limitaciones	26
1.5. Metodología	27
1.5.1. Estudio teórico:	27
1.5.2. Estudio del comportamiento del convertidor	27
1.5.3. Estudio por simulación	27
1.5.4. Estudio experimental	27
2. Accionamiento asimétrico hexafásico	28
2.1. Estados de conmutación del sistema	28
2.1.1. Voltajes de línea del convertidor hexafásico	31
2.1.2. Representación matricial de voltaje de línea	34
2.1.3. Representación matricial de voltaje de fase	35
3. Técnicas de modulación por ancho de impulso	40
3.1. Técnica de modulación SVPWM, Liverpool	40
3.2. Técnica de modulación propuesta por el LCEEP.	47
3.3. Simulación de las técnicas de modulación y comparación entre ellas	51
3.3.1. Modulación vectorial, Liverpool	51
3.3.2. Técnica de modulación propuesta pro el LCEEP	53
3.3.3. Comparación entre técnicas de modulación	58
3.3.4. Cálculo del CTHD a partir del THD	64
4. Implementación experimental	68
4.1. Arquitectura del sistema	68

4.2.	Enumeración de módulos	69
4.2.1.	Variac (autotransformador)	69
4.2.2.	Rectificador trifásico AC/DC	70
4.2.3.	Enlace DC	71
4.2.4.	Convertidor DC/AC hexafásico	71
4.2.5.	Carga con neutro común	72
4.2.6.	Medición de voltaje	73
4.2.7.	Medición de corriente	74
4.2.8.	Acondicionador de señales	75
4.2.9.	Interfaz con Usuario	76
4.2.10.	Control con DSP	76
4.2.11.	Conmutación con FPGA	77
4.3.	Armado del proyecto	80
4.3.1.	Interfaz de potencia	80
4.3.2.	Interfaz de instrumentación	93
4.3.3.	Interfaz de control	97
4.4.	Simulaciones	103
4.5.	Algoritmos	117
4.6.	Resultados	118
5.	Conclusiones y trabajos futuros	123
5.1.	Conclusiones	123
5.2.	Trabajos Futuros	124
6.	Anexos	126
6.1.	Código principal en la tarjeta FPGA para implementar una modulación SPWM en el convertidor DC/AC hexafásico. . . .	126
6.2.	Código en el archivo .ucf para reconocer entradas y salidas en la tarjeta FPGA	134
6.3.	Código en la tarjeta DSP para implementar una modulación SPWM en el convertidor DC/AC hexafásico	135

Índice de Figuras

1.	Esquema general de la patente [1].	17
2.	Señal trifásica con tercer armónico.	18
3.	Señal trifásica con quinto armónico.	18
4.	Señal trifásica con séptimo armónico.	19
5.	Rotación en un motor de inducción de la señal fundamental (flecha amarilla) con el séptimo armónico (flecha roja).	19
6.	Rotación en un motor de inducción de la señal fundamental (flecha amarilla) con el séptimo armónico (flecha roja) y el quinto armónico (flecha azul).	20
7.	Máquina de inducción de seis fases simétrica [2].	22
8.	Máquina de inducción de seis fases asimétrica [2].	22
9.	Comparación entre la señal moduladora y portadora [3].	23
10.	Esquema convertidor DC/AC Hexafásico.	28
11.	Convertidor DC/AC Hexafásico y configuración del primer estado activo.	31
12.	Configuraciones de carga para el convertidor DC/AC hexafásico.	35
13.	Fase del convertidor DC/AC hexafásico.	36
14.	Proyección de los vectores espaciales aplicando la transformación de Clarke en los distintos planos de referencia.	39
15.	Plano de transformación Z1-Z2 aplicando la transformación rotacional.	41
16.	Planos de transformación $\alpha - \beta$ con la reducción de vectores y las formas de las 18 secuencias de conmutación existentes.	43
17.	Esquema de la técnica de modulación propuesta por el LCEEP.	49
18.	Simulación SVM hexafásico.	51
19.	Forma de onda de voltaje de línea, voltaje de fase y corrientes del convertidor hexafásico en la técnica propuesta por la universidad de John Moores.	52
20.	Simulación de la técnica de modulación propuesta por el LCEEP.	54
21.	Forma de onda en los planos de referencia $\alpha - \beta$, x-y, Z1.	54
22.	Formas de onda de voltaje de línea, voltaje de fase y corrientes del convertidor hexafásico en la técnica de modulación propuesta por el LCEEP.	55
23.	Forma de onda en los planos de referencia $\alpha - \beta$, x-y, Z1.	55
24.	Formas de onda de voltaje de línea, voltaje de fase y corrientes del convertidor hexafásico en la técnica de modulación propuesta por el LCEEP.	56
25.	Forma de onda en los planos de referencia $\alpha - \beta$, x-y, Z1.	56

26.	Formas de onda de voltaje de línea, voltaje de fase y corrientes del convertidor hexafásico en la técnica de modulación propuesta por el LCEEP.	57
27.	Datos obtenidos en ambas simulaciones al incremento del índice de modulación.	58
28.	Datos obtenidos en ambas simulaciones al incremento del índice de modulación.	59
29.	Inyección máxima en el plano x-y dependiendo del valor en el plano $\alpha - \beta$.	60
30.	Comportamiento del THD_v con inyección en los planos de referencia $\alpha - \beta$ y x-y.	61
31.	Comportamiento del THD_v con inyección en los planos de referencia $\alpha - \beta$ y x-y igual a Z1.	61
32.	Comportamiento del THD_v con inyección en los planos de referencia $\alpha - \beta$ y x-y distinto a Z1.	62
33.	Comportamiento del THD_i con inyección en los planos de referencia $\alpha - \beta$ y x-y.	62
34.	Comportamiento del THD_i con inyección en los planos de referencia $\alpha - \beta$ y x-y igual a Z1.	63
35.	Comportamiento del THD_i con inyección en los planos de referencia $\alpha - \beta$ y x-y distinto a Z1.	63
36.	Comportamiento del $CTHD_v$ con inyección en los planos de referencia $\alpha - \beta$ y x-y.	64
37.	Comportamiento del $CTHD_v$ con inyección en los planos de referencia $\alpha - \beta$ y x-y igual a Z1.	65
38.	Comportamiento del $CTHD_v$ con inyección en los planos de referencia $\alpha - \beta$ y x-y distinto a Z1.	65
39.	Comportamiento del $CTHD_i$ con inyección en los planos de referencia $\alpha - \beta$ y x-y.	66
40.	Comportamiento del $CTHD_i$ con inyección en los planos de referencia $\alpha - \beta$ y x-y igual a Z1.	66
41.	Comportamiento del $CTHD_i$ con inyección en los planos de referencia $\alpha - \beta$ y x-y distinto a Z1.	67
42.	Diagrama de la arquitectura del sistema.	68
43.	Variac utilizado en el proyecto.	69
44.	Rectificador Trifásico AC/DC.	70
45.	Esquema del Rectificador Trifásico AC/DC.	70
46.	Enlace DC.	71

47.	Esquema convertidor DC/AC Hexafásico.	71
48.	Carga RL hexafásica.	72
49.	Conexión de neutro común.	72
50.	Sensor de efecto Hall LV 25-P.	73
51.	Esquema del sensor LV 25-P.	73
52.	Sensor de efecto Hall LA 55-P.	74
53.	Esquema interior del sensor LA 25-P.	74
54.	Etapa de proceso de acondicionador de señales.	75
55.	Tarjeta de DSP TMS320F28335.	76
56.	Tarjeta de FPGA Nexys 3.	77
57.	Conexión del variac.	81
58.	Conexión de la salida del variac con el rectificador AC/DC.	81
59.	Conexión de la salida del rectificador AC/DC para placa de precarga y placa de carga del banco de condensadores.	82
60.	Esquema placa de carga del banco de condensadores.	82
61.	PCB placa de carga del banco de condensadores.	83
62.	Placa de carga del banco de condensadores.	83
63.	Esquema global del control de precarga.	84
64.	Esquema placa precarga.	85
65.	PCB placa precarga.	85
66.	Placa de precarga.	85
67.	Esquema banco de condensadores.	87
68.	Circuito PCB banco de condensadores.	87
69.	Circuito físico del banco de condensadores.	88
70.	Esquema placa sobrecarga.	88
71.	PCB placa sobrecarga.	89
72.	Placa de sobrecarga.	89
73.	Placa de IGBT para sobrecarga.	89
74.	Resistencia de 10[Ω] para sobrecarga.	90
75.	Tarjetas de IGBT.	90
76.	Esquema de la tarjeta de IGBT.	90
77.	Conexión entre las 12 tarjetas de IGBT.	91
78.	Carga RL hexafásica.	92
79.	Conexión de neutro común.	92
80.	Esquema placa sensor LV 25-P.	93
81.	Circuito PCB placa sensor LV 25-P.	93

82.	Placa sensor LV 25-P.	94
83.	Esquema placa sensor LA 55-P.	94
84.	Circuito PCB placa sensor LA 55-P.	94
85.	Placa de sensor LA 55-P.	95
86.	Placas de acondicionador de señales para voltaje y corriente.	95
87.	Esquema del acondicionador de señales.	96
88.	Circuito PCB del acondicionador de señales.	96
89.	Conexión entre la tarjeta de DSP y la tarjeta FPGA.	97
90.	Placas de conversión eléctrica-óptica o tarjetas de disparo.	100
91.	Interfaz de control.	100
92.	Interfaz de potencia.	101
93.	Convertidor hexafásico completo.	102
94.	Simulación del convertidor hexafásico con modulación SPWM.	103
95.	Señales moduladoras con diferentes fases.	104
96.	Corrientes de línea.	105
97.	Voltajes de fase.	106
98.	Voltajes de línea.	107
99.	Señales moduladoras con diferentes fases.	109
100.	Corrientes de línea.	110
101.	Voltajes de fase.	111
102.	Voltajes de línea.	111
103.	Señales moduladoras con diferentes fases.	112
104.	Corrientes de línea.	113
105.	Voltajes de fase.	113
106.	Voltajes de línea.	114
107.	Señales moduladoras con diferentes fases.	115
108.	Corrientes de línea.	115
109.	Voltajes de fase.	116
110.	Voltajes de línea.	117
111.	Instrumento digital de medición, osciloscopio digital KEYSIGHT Infinii-Vision X3024T [4].	118
112.	Señales de salida de la tarjeta FPGA hacia las tarjetas de disparo. . . .	118
113.	Sondas de voltaje y corriente [5] [6].	119
114.	Voltajes de fase a, b y c.	119
115.	Voltajes de fase d, e y f.	120
116.	Voltajes de línea ab, bc y cd.	120

117. Voltajes de línea de, ef y fa.	121
118. Corrientes de línea a, b y c.	121
119. Corrientes de línea d, e y f.	122

Índice de Tablas

1.	Estados de conmutación válidos del convertidor hexafásico.	30
2.	Vectores del convertidor DC/AC hexafásico.	33
3.	Secuencias de conmutación representadas de forma vectorial.	45
4.	Aplicación simétrica de vectores hexafásicos.	51
5.	Las 18 secuencias de conmutación y su ubicación dentro del plano vectorial hexafásico.	52
6.	Aplicación simétrica de vectores para la función U1	53
7.	Aplicación simétrica de vectores para la función U2	53
8.	Configuración conectores PmodA.	98
9.	Configuración conectores PmodB.	98
10.	Configuración conectores PmodC.	99
11.	Configuración conectores PmodD.	99
12.	Parámetros de la señal SPWM y del tercer armónico	108
13.	Parámetros de la señal SPWM y del quinto armónico	108
14.	Parámetros de la señal SPWM y del séptimo armónico	109