

Índice

1. Introducción	1
1.1. Introducción General	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Alcances y Limitaciones	3
1.4. Metodología	3
1.5. Estado del Arte	4
1.5.1. Sistema eléctrico de potencia	4
1.5.2. Convertidores de potencia	5
1.5.3. Dispositivos semiconductores	9
1.5.4. Controladores	11
2. Convertidor Matricial Monofásico	17
2.1. Convertidor Matricial Monofásico	17
2.1.1. Topología	18
2.1.2. Modelo matemático	19
2.1.3. Estados válidos de conmutación del SPMC	19
3. Topologías Derivadas del Convertidor Matricial Monofásico	21
3.1. Convertidor Matricial Modular	21
3.1.1. Topología	22
3.1.2. Modelo matemático	23
3.2. Convertidor Matricial Multi-Modular	23
3.2.1. Topología	24
3.2.2. Modelo matemático	24
4. Control Predictivo Basado en Modelos para el Convertidor Matricial Monofásico	26
4.1. Esquema de Control	27
4.2. Modelo de Predicción	28
4.3. Función de Costos	30
4.4. Algoritmo Implementado	31
4.5. Resultados de Simulación	32
4.5.1. Estado estacionario	32
4.5.2. Estado transiente	36

4.5.3. Análisis de THD y error absoluto medio	38
5. Control Predictivo Basado en modelos para el Convertidor Matricial Modular	44
5.1. Esquema de Control	44
5.2. Algoritmo Implementado	45
5.3. Modelo de Predicción	45
5.4. Función de Costos	46
5.5. Resultados de Simulación	46
5.5.1. Estado estacionario	46
5.5.2. Estado transiente	51
5.5.3. Análisis de THD y error absoluto medio	54
6. Control Predictivo Basado en Modelos para el Convertidor matricial Multi-Modular	61
6.1. Esquema de Control	61
6.2. Algoritmo Implementado	62
6.3. Modelo de Predicción	63
6.4. Función de Costos	63
6.5. Resultados de Simulación	63
6.5.1. Estado estacionario	63
6.5.2. Estado transiente	75
6.5.3. Análisis de THD y error absoluto medio	77
7. Conclusiones	85
7.1. Trabajo Futuro	86
8. Anexos	89
8.1. Códigos y Simulación Matlab/Simulink	89
8.1.1. Convertidor matricial monofásico	89
8.1.2. Convertidor matricial modular	95
8.1.3. Convertidor matricial multi-modular	103
8.2. Conmutación Segura	123

Índice de Figuras

1.	Diagrama de bloques de un sistema electrónico de potencia.	5
2.	Clasificación de convertidores AC/AC	6
3.	Topologías convertidores AC/AC con almacenador de energía: a) VSI, b) CSI, c) Fuente Z y d)Fuente Quasi-Z.	7
4.	Diagrama de bloques de un convertidor indirecto.	8
5.	Diagrama de bloques de un convertidor directo.	8
6.	Símbolo: a) diodo, b) diodo schottky, c) diodo led, d) diodo zener, e) diodo corriente constante, f) diodo varactor.	10
7.	Símbolo tiristor: a) SCR, b) TRIAC/DIRAC, c) GTO, d) RCT.	11
8.	Símbolo transistor: a) BJT, b) MOSFET, c) IGBT, d) MCT.	11
9.	Métodos de control y modulación para convertidores matriciales.	12
10.	Modulación SPWM	13
11.	Vectores (a) de voltaje y (b) de corriente.	14
12.	Topología del convertidor matricial monofásico directo.	18
13.	Topología de convertidor matricial modular	22
14.	Topología convertidor matricial multi-modular.	24
15.	Esquema de control predictivo de corriente para el convertidor matricial modular	28
16.	Representación modelo matemático de la carga	29
17.	Diagrama de flujo de controlador predictivo basado en modelos para convertidor matricial monofásico	31
18.	Corriente en la carga al aplicar MPC a SPMC con una frecuencia de muestreo de 10kHz.	33
19.	Voltaje en la carga al aplicar MPC a SPMC con una frecuencia de muestreo de 10kHz.	33
20.	Corriente en la carga al aplicar MPC a SPMC con una frecuencia de muestreo de 20kHz.	34
21.	Voltaje en la carga al aplicar MPC a SPMC con una frecuencia de muestreo de 20kHz.	34
22.	Corriente en la carga al aplicar MPC a SPMC con una frecuencia de muestreo de 40kHz.	35
23.	Voltaje en la carga al aplicar MPC a SPMC con una frecuencia de muestreo de 40kHz.	35
24.	Corriente en la carga al aplicar MPC a SPMC con cambio escalón en la referencia y una frecuencia de muestreo de 10kHz.	37

25.	Corriente en la carga al aplicar MPC a SPMC con cambio escalón en la referencia y una frecuencia de muestreo de 20kHz.	37
26.	Corriente en la carga al aplicar MPC a SPMC con cambio escalón en la referencia y una frecuencia de muestreo de 40kHz.	38
27.	Distorsión armónica total de: a) corriente en la carga y b) voltaje en la carga, al aplicar MPC a SPMC con $f_s=10\text{kHz}$	41
28.	Distorsión armónica total de: a) corriente en la carga y b) voltaje en la carga, al aplicar MPC a SPMC con $f_s=20\text{kHz}$	41
29.	Distorsión armónica total de: a) corriente en la carga y b) voltaje en la carga, al aplicar MPC a SPMC con $f_s=40\text{kHz}$	42
30.	Esquema de control predictivo de corriente para el convertidor matricial modular	44
31.	Diagrama de flujo de controlador predictivo basado en modelos para convertidor matricial modular	45
32.	Corriente en la carga al aplicar MPC a 3x1-MMC con una frecuencia de muestreo de 10kHz.	47
33.	Voltaje fase <i>A</i> en la carga al aplicar MPC a 3x1-MMC con una frecuencia de muestreo de 10kHz.	47
34.	Voltajes en la carga al aplicar MPC a 3x1-MMC con una frecuencia de muestreo de 10kHz.	48
35.	Corriente en la carga al aplicar MPC a 3x1-MMC con una frecuencia de muestreo de 20kHz.	48
36.	Voltaje fase <i>A</i> en la carga al aplicar MPC a 3x1-MMC con una frecuencia de muestreo de 20kHz.	49
37.	Voltajes en la carga al aplicar MPC a 3x1-MMC con una frecuencia de muestreo de 20kHz.	49
38.	Corriente en la carga al aplicar MPC a 3x1-MMC con una frecuencia de muestreo de 40kHz.	50
39.	Voltaje fase <i>A</i> en la carga al aplicar MPC a 3x1-MMC con una frecuencia de muestreo de 40kHz.	50
40.	Voltajes en la carga al aplicar MPC a 3x1-MMC con una frecuencia de muestreo de 40kHz.	51
41.	Corriente en la carga al aplicar MPC a 3x1-MMC con cambio escalón en la referencia y una frecuencia de muestreo de 10kHz.	52
42.	Corriente en la carga al aplicar MPC a 3x1-MMC con cambio escalón en la referencia y una frecuencia de muestreo de 20kHz.	52

43.	Corriente en la carga al aplicar MPC a 3x1-MMC con cambio escalón en la referencia y una frecuencia de muestreo de 40kHz.	53
44.	Distorsión armónica total de: a) corriente en la carga fase <i>A</i> y b) voltaje en la fase <i>A</i> , al aplicar MPC a 3x1-MMC con $f_s=10\text{kHz}$	55
45.	Distorsión armónica total de: a) corriente en la carga fase <i>B</i> y b) voltaje en la fase <i>B</i> , al aplicar MPC a 3x1-MMC con $f_s=10\text{kHz}$	55
46.	Distorsión armónica total de: a) corriente en la carga fase <i>C</i> y b) voltaje en la fase <i>C</i> , al aplicar MPC a 3x1-MMC con $f_s=10\text{kHz}$	56
47.	Distorsión armónica total de: a) corriente en la carga fase <i>A</i> y b) voltaje en la fase <i>A</i> , al aplicar MPC a 3x1-MMC con $f_s=20\text{kHz}$	56
48.	Distorsión armónica total de: a) corriente en la carga fase <i>B</i> y b) voltaje en la fase <i>B</i> , al aplicar MPC a 3x1-MMC con $f_s=20\text{kHz}$	57
49.	Distorsión armónica total de: a) corriente en la carga fase <i>C</i> y b) voltaje en la fase <i>C</i> , al aplicar MPC a 3x1-MMC con $f_s=20\text{kHz}$	57
50.	Distorsión armónica total de: a) corriente en la carga fase <i>A</i> y b) voltaje en la fase <i>A</i> , al aplicar MPC a 3x1-MMC con $f_s=40\text{kHz}$	58
51.	Distorsión armónica total de: a) corriente en la carga fase <i>B</i> y b) voltaje en la fase <i>B</i> , al aplicar MPC a 3x1-MMC con $f_s=40\text{kHz}$	58
52.	Distorsión armónica total de: a) corriente en la carga fase <i>C</i> y b) voltaje en la fase <i>C</i> , al aplicar MPC a 3x1-MMC con $f_s=40\text{kHz}$	59
53.	Esquema de control predictivo de corriente para el convertidor matricial multi-modular	61
54.	Diagrama de flujo de controlador predictivo basado en modelos para convertidor matricial multi-modular	62
55.	Corrientes en la carga al aplicar MPC a 3x3-MMMC con una frecuencia de muestreo de 10kHz.	64
56.	Voltajes en la carga al aplicar MPC a 3x3-MMMC con una frecuencia de muestreo de 10kHz.	64
57.	Voltaje medido a) módulo <i>A1</i> , b) módulo <i>21</i> , c) módulo <i>A3</i> y d) salida fase <i>A</i> al aplicar MPC 3x3-MMMC a frecuencia de muestreo de 10kHz.	65
58.	Voltaje medido a) módulo <i>B1</i> , b) módulo <i>B2</i> , c) módulo <i>B3</i> y d) salida fase <i>B</i> al aplicar MPC 3x3-MMMC a frecuencia de muestreo de 10kHz.	65
59.	Voltaje medido a) módulo <i>C1</i> , b) módulo <i>C2</i> , c) módulo <i>C3</i> y d) salida fase <i>C</i> al aplicar MPC 3x3-MMMC a frecuencia de muestreo de 10kHz.	66
60.	Corrientes en la carga al aplicar MPC a 3x3-MMMC con una frecuencia de muestreo de 20kHz.	66

61.	Voltajes en la carga al aplicar MPC a 3x3-MMMC con una frecuencia de muestreo de 20kHz.	67
62.	Voltaje medido a) módulo <i>A1</i> , b) módulo <i>A2</i> , c) módulo <i>A3</i> y d) salida fase <i>A</i> al aplicar MPC 3x3-MMMC a frecuencia de muestreo de 20kHz.	67
63.	Voltaje medido a) módulo <i>B1</i> , b) módulo <i>B2</i> , c) módulo <i>B3</i> y d) salida fase <i>B</i> al aplicar MPC 3x3-MMMC a frecuencia de muestreo de 20kHz.	68
64.	Voltaje medido a) módulo <i>C1</i> , b) módulo <i>C2</i> , c) módulo <i>C3</i> y d) salida fase <i>C</i> al aplicar MPC 3x3-MMMC a frecuencia de muestreo de 20kHz.	68
65.	Corrientes en la carga al aplicar MPC a 3x3-MMMC con una frecuencia de muestreo de 40kHz.	69
66.	Voltajes en la carga al aplicar MPC a 3x3-MMMC con una frecuencia de muestreo de 40kHz.	69
67.	Voltaje medido a) módulo <i>A1</i> , b) módulo <i>A2</i> , c) módulo <i>A3</i> y d) salida fase <i>A</i> al aplicar MPC 3x3-MMMC a frecuencia de muestreo de 40kHz.	70
68.	Voltaje medido a) módulo <i>B1</i> , b) módulo <i>B2</i> , c) módulo <i>B3</i> y d) salida fase <i>B</i> al aplicar MPC 3x3-MMMC a frecuencia de muestreo de 40kHz.	70
69.	Voltaje medido a) módulo <i>C1</i> , b) módulo <i>C2</i> , c) módulo <i>C3</i> y d) salida fase <i>C</i> al aplicar MPC 3x3-MMMC a frecuencia de muestreo de 40kHz.	71
70.	Corrientes en la carga al aplicar MPC a 3x3-MMMC con una frecuencia de muestreo de 10kHz y referencia de 300A.	72
71.	Voltajes en la carga al aplicar MPC a 3x3-MMMC con una frecuencia de muestreo de 10kHz y referencia de 300A.	73
72.	Voltaje medido a) módulo <i>A1</i> b)módulo <i>A2</i> , c) módulo <i>A3</i> y d) salida fase <i>A</i> al aplicar MPC a 3x3-MMMC a frecuencia de muestreo de 10kHz y referencia de 300A.	73
73.	Voltaje medido a) módulo <i>B1</i> b)módulo <i>B2</i> , c) módulo <i>B3</i> y d) salida fase <i>B</i> al aplicar MPC a 3x3-MMMC a frecuencia de muestreo de 10kHz y referencia de 300A.	74
74.	Voltaje medido a) módulo <i>C1</i> b)módulo <i>C3</i> , c) módulo <i>C3</i> y d) salida fase <i>C</i> al aplicar MPC a 3x3-MMMC a frecuencia de muestreo de 10kHz y referencia de 300A.	74
75.	Corriente en la carga al aplicar MPC a 3x3-MMMC con cambio escalón en la referencia y una frecuencia de muestreo de 10kHz.	75
76.	Corriente en la carga al aplicar MPC a 3x3-MMMC con cambio escalón en la referencia y una frecuencia de muestreo de 20kHz.	76
77.	Corriente en la carga al aplicar MPC a 3x3-MMMC con cambio escalón en la referencia y una frecuencia de muestreo de 40kHz.	76

78.	Distorsión armónica total de: a) corriente en la carga fase A y b) voltaje en la fase A , al aplicar MPC a 3x3-MMMC con $f_s=10\text{kHz}$	78
79.	Distorsión armónica total de: a) corriente en la carga fase B y b) voltaje en la fase B , al aplicar MPC a 3x3-MMMC con $f_s=10\text{kHz}$	78
80.	Distorsión armónica total de: a) corriente en la carga fase C y b) voltaje en la fase C , al aplicar MPC a 3x3-MMMC con $f_s=10\text{kHz}$	79
81.	Distorsión armónica total de: a) corriente en la carga fase A y b) voltaje en la fase A , al aplicar MPC a 3x3-MMMC con $f_s=20\text{kHz}$	79
82.	Distorsión armónica total de: a) corriente en la carga fase B y b) voltaje en la fase B , al aplicar MPC a 3x3-MMMC con $f_s=20\text{kHz}$	80
83.	Distorsión armónica total de: a) corriente en la carga fase C y b) voltaje en la fase C , al aplicar MPC a 3x3-MMMC con $f_s=20\text{kHz}$	80
84.	Distorsión armónica total de: a) corriente en la carga fase A y b) voltaje en la fase A , al aplicar MPC a 3x3-MMMC con $f_s=40\text{kHz}$	81
85.	Distorsión armónica total de: a) corriente en la carga fase B y b) voltaje en la fase B , al aplicar MPC a 3x3-MMMC con $f_s=40\text{kHz}$	81
86.	Distorsión armónica total de: a) corriente en la carga fase C y b) voltaje en la fase C , al aplicar MPC a 3x3-MMMC con $f_s=40\text{kHz}$	82
87.	Distorsión armónica total de: a) corriente en la carga fase A y b) voltaje en la fase A , al aplicar MPC a 3x3-MMMC con $f_s=10\text{kHz}$ y referencia de 300A.	82
88.	Distorsión armónica total de: a) corriente en la carga fase B y b) voltaje en la fase B , al aplicar MPC a 3x3-MMMC con $f_s=10\text{kHz}$ y referencia de 300A.	83
89.	Distorsión armónica total de: a) corriente en la carga fase C y b) voltaje en la fase C , al aplicar MPC a 3x3-MMMC con $f_s=10\text{kHz}$ y referencia de 300A.	83
90.	Topología del convertidor matricial monofásico directo.	87
91.	Topología del convertidor matricial monofásico directo.	87
92.	Topología del convertidor matricial monofásico directo.	88
93.	Esquema principal y sub-sistemas simulación para SPMC	89
94.	Contenido de sub-sistema convertidor de potencia	90
95.	Contenido de sub-sistema celda SPMC	90
96.	Contenido de sub-sistema controlador	91
97.	Configuración bloque <i>Source A1</i>	91
98.	Esquema principal y sub-sistemas simulación para 3x1-MMC	95
99.	Configuración bloque <i>Source A1, A2 y A3</i>	96

100.	Contenido de sub-sistema M1	96
101.	Contenido de sub-sistema M2	97
102.	Contenido de sub-sistema M3	97
103.	Contenido de sub-sistema Controlador A	98
104.	Contenido de sub-sistema Controlador B	98
105.	Contenido de sub-sistema Controlador C	98
106.	Contenido de sub-sistema celda SPMC A	99
107.	Contenido de sub-sistema celda SPMC B	99
108.	Contenido de sub-sistema celda SPMC C	100
109.	Esquema principal y sub-sistemas simulación para 3x3-MMC	103
110.	Contenido de sub-sistema Fase A	104
111.	Configuración bloques <i>Source A1, A2 y A3</i>	104
112.	Contenido de sub-sistema celda SPMC $A1$	105
113.	Contenido de sub-sistema celda SPMC $A2$	105
114.	Contenido de sub-sistema celda SPMC $A3$	106
115.	Contenido de sub-sistema controlador A	106
116.	Contenido de sub-sistema: a) $A1$, b) $A2$ y c) A	107
117.	Contenido de sub-sistema Fase B	108
118.	Configuración bloques <i>Source B1, B2 y B3</i>	108
119.	Contenido de sub-sistema celda SPMC textitB1	109
120.	Contenido de sub-sistema celda SPMC textitB2	109
121.	Contenido de sub-sistema celda SPMC textitB3	110
122.	Contenido de sub-sistema controlador textitB	110
123.	Contenido de sub-sistema: a) textitB1, b) textitB2 y c) textitB	111
124.	Contenido de sub-sistema Fase textitC	112
125.	Configuración bloques <i>Source B1, B2 y B3</i>	112
126.	Contenido de sub-sistema celda SPMC $C1$	113
127.	Contenido de sub-sistema celda SPMC $C2$	113
128.	Contenido de sub-sistema celda SPMC $C3$	114
129.	Contenido de sub-sistema controlador C	114
130.	Contenido de sub-sistema: a) $C1$, b) $C2$ y c) $C3$	115
131.	Estado inicial ($i_o > 0$)	124
132.	Paso N°1 ($i_o > 0$)	125
133.	Paso N°2 ($i_o > 0$)	125
134.	Paso N°3 ($i_o > 0$)	126
135.	Paso N°4 ($i_o > 0$)	126
136.	Estado inicial ($i_o < 0$)	127

137. Paso N°1 ($i_o < 0$)	127
138. Paso N°2 ($i_o < 0$)	128
139. Paso N°3 ($i_o < 0$)	128
140. Paso N°4 ($i_o < 0$)	129
141. Diagrama estrategia de cuadro pasos ($i_o > 0$)	129
142. Diagrama estrategia de cuadro pasos ($i_o < 0$)	130

Índice de Tablas

1.	Niveles de voltajes de entrada	13
2.	Comparación entre métodos de control y modulación para convertidores matriciales.	16
3.	Nomenclatura de la topología del SPMC	19
4.	Estados válidos del SPDMC	20
5.	Parámetros implementados en simulación	32
6.	Tiempos de transición de MPC a SPMC	38
7.	Error absoluto medio al aplicar MPC a SPMC.	40
8.	Distorsión armónica total de corriente y voltaje en la carga al aplicar MPC a SPMC.	42
9.	Tiempos de transición de MPC a 3x1-MMC	53
10.	Error absoluto medio al aplicar MPC a 3x1-MMC.	54
11.	Distorsión armónica total de corriente y voltaje en la carga al aplicar MPC a 3x1-MMC.	59
12.	Tiempos de transición de MPC a 3x3-MMMC	77
13.	Error absoluto medio al aplicar MPC a 3x3-MMMC.	77
14.	Distorsión armónica total de corriente y voltaje en la carga al aplicar MPC a 3x3-MMMC.. . . .	84
15.	Estados válidos de la conmutación de 4 pasos	124