

Índice

1. Introducción General	2
1.1. Introducción	2
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo General	3
1.2.2. Objetivos Específicos	3
1.3. Alcances del Proyecto	4
1.4. Limitaciones	4
1.5. Resultados Esperados	4
1.6. Metodología	4
1.7. Revisión Bibliográfica	5
2. Inversor Fuente de Voltaje	10
2.1. Topología del Convertidor Fuente de Voltaje de 4 Piernas	10
2.2. Estados Válidos de Conmutación del Inversor Fuente de Voltaje	11
2.3. Modelo Matemático del Convertidor 4L-VSI	12
2.4. Restricciones de operación	14
2.5. Conmutación segura del convertidor: Implementación del tiempo muerto	15
3. Control Predictivo a Frecuencia de Conmutación Variable	16
3.1. Introducción	16
3.2. Esquema de Control	17
3.3. Ecuaciones de Predicción	18
3.4. Función de Costos	19
3.5. Resultados de Simulación	20
3.6. Resultados Simulación Cargas Balanceadas en Estado Estacionario	21
3.7. Resultados Simulación Cargas Balanceadas en Estado Transiente	25
3.8. Resultados Simulación Cargas Desbalanceadas en Estado Estacionario	30
3.9. Resultados Simulación Cargas Desbalanceadas en Estado Transiente	34
3.10. Distorsión Armónica Total (THD)	39
3.11. Cargas Balanceadas Estado Estacionario	39
3.12. Cargas Desbalanceadas Estado Estacionario	41

3.13. Análisis de los Resultados	45
4. Control Predictivo con Etapa de Modulación 2D-SVM	46
4.1. Introducción	46
4.2. Esquema de Control	47
4.3. Modelo de Modulación 2D-SVM	48
4.4. Función de Costos	49
4.5. Patrón de conmutación	51
4.6. Resultados Simulación Cargas Balanceadas en Estado estacionario . . .	52
4.7. Resultados de Simulación Cargas Balanceadas Estado Transitorio . . .	56
4.8. Resultados Simulación Cargas Desbalanceadas Estado Estacionario . .	60
4.9. Resultados Simulación Cargas Desbalanceadas en Estado Transiente . .	64
4.10. Distorsión Armónica Total (THD)	67
4.11. Cargas Balanceadas Estado Estacionario	68
4.12. Cargas Desbalanceadas Estado Estacionario	69
4.13. Análisis de los Resultados	73
5. Control Predictivo a Frecuencia de Conmutación Fija M2PCC	74
5.1. Introducción	74
5.2. Esquema de Control	75
5.3. Ecuaciones de Predicción	77
5.4. Patrón de conmutación	78
5.5. Función de Costos	80
5.6. Resultados de Simulación	81
5.7. Cargas Balanceadas Estado Estacionario	81
5.8. Cargas Balanceadas Estado Transiente	85
5.9. Cargas Desbalanceadas Estado Estacionario	89
5.10. Cargas Desbalanceadas Estado Transiente	93
5.11. Distorsión Armónica Total (THD)	97
5.12. Cargas Balanceadas Estado Estacionario	98
5.13. Cargas Desbalanceadas Estado Estacionario	99
5.14. Análisis de los Resultados	103

6. Comparación de Resultados	104
6.1. Corriente Estado Estacionario	104
6.2. Frecuencia de Conmutación	105
7. Voltaje Estado Estacionario	106
7.1. Seguimiento de las Referencias	107
8. Conclusiones	109
8.1. Trabajos Futuros	110
9. Anexos	111
9.1. Ecuación Error en Estado Estacionario	111
9.2. Código Control Predictivo a Frecuencia de Conmutación Variable . . .	111
9.3. Código Control Predictivo con Modulación 2D-SVM	114
9.4. Código Control Predictivo M2PCC	121

Índice de Figuras

1.	Topología convertidor dos niveles 4 piernas con carga $R-L$	10
2.	Tiempo muerto aplicado al convertidor.	15
3.	Esquema control predictivo de corriente a frecuencia de conmutación variable.	17
4.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga balanceada en estado estacionario de las corrientes de fase u, v, w (i_u, i_v, i_w).	21
5.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga balanceada en estado estacionario acercamiento de las corrientes de fase u, v, w (i_u, i_v, i_w).	22
6.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga balanceada en estado estacionario de la fase neutra n (i_n).	22
7.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga balanceada en estado estacionario del voltaje del enlace dc v_{dc}	23
8.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga balanceada en estado estacionario del voltaje de línea de las fases u y v (v_{uv}).	23
9.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga balanceada en estado estacionario del voltaje de fase u (v_{un}).	24
10.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga balanceada en estado transiente de las corrientes de fase u, v, w (i_u, i_v, i_w).	25
11.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga balanceada en estado estacionario acercamiento de las corrientes de fase u, v, w (i_u, i_v, i_w).	26
12.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga balanceada en estado transiente de la fase neutra n (i_n).	26
13.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga balanceada en estado transiente del voltaje del enlace dc v_{dc}	27
14.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga balanceada en estado transiente del voltaje de línea de las fases u y v (v_{uv}).	28
15.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga balanceada en estado transiente del voltaje de fase u (v_{un}).	29
16.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga desbalanceada en estado estacionario de las corrientes de fase u, v, w (i_u, i_v, i_w).	30
17.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga balanceada en estado estacionario acercamiento de las corrientes de fase u, v, w (i_u, i_v, i_w).	31

18.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga desbalanceada en estado estacionario de la fase neutra n (i_n).	31
19.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga desbalanceada en estado estacionario del voltaje del enlace dc v_{dc}	32
20.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga desbalanceada en estado estacionario del voltaje de línea de las fases u y v (v_{uv}).	32
21.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga desbalanceada en estado estacionario del voltaje de fase u (v_{un}).	33
22.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga desbalanceada en estado transiente de las corrientes de fase u, v, w (i_u, i_v, i_w).	34
23.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga balanceada en estado estacionario acercamiento de las corrientes de fase u, v, w (i_u, i_v, i_w).	35
24.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga desbalanceada en estado transiente de la fase neutra n (i_n).	35
25.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga desbalanceada en estado transiente del voltaje del enlace dc v_{dc}	36
26.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga desbalanceada en estado transiente del voltaje de línea de las fases u y v (v_{uv}).	37
27.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga desbalanceada en estado transiente del voltaje de fase u (v_{un}).	38
28.	Espectro de armónicos del control predictivo a frecuencia variable en estado estacionario presentes en la corriente de fase u i_u , distorsión armónica total THD = 3.05%.	39
29.	Espectro de armónicos del control predictivo a frecuencia variable en estado estacionario presentes en el voltaje de línea uv v_{uv} , distorsión armónica total THD = 155.52%.	40
30.	Espectro de armónicos del control predictivo a frecuencia variable en estado estacionario presentes en el voltaje de fase u v_{ou} , distorsión armónica total THD = 224.40%.	40
31.	Espectro de armónicos del control predictivo a frecuencia variable con cargas desbalanceadas en estado estacionario presentes en la corriente de fase u i_u , distorsión armónica total THD = 3.15%.	41

32.	Espectro de armónicos del control predictivo a frecuencia variable con cargas desbalanceadas en estado estacionario presentes en el voltaje de línea uv v_{uv} , distorsión armónica total THD = 169.49%.	41
33.	Espectro de armónicos del control predictivo a frecuencia variable con cargas desbalanceadas en estado estacionario presentes en el voltaje de fase u v_{un} , distorsión armónica total THD = 343.07%.	42
34.	Diagrama de bloques del esquema de control a frecuencia fija.	47
35.	Representación vectorial de los voltajes del convertidor.	48
36.	Patrón de conmutación 2D-SVM.	51
37.	Resultados control predictivo con etapa de modulación 2D-SVM con carga balanceada en estado estacionario de las corrientes de fase u, v, w (i_u, i_v, i_w).	52
38.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga balanceada en estado estacionario acercamiento de las corrientes de fase u, v, w (i_u, i_v, i_w).	53
39.	Resultados control predictivo con etapa de modulación 2D-SVM con carga balanceada en estado estacionario de la fase neutra n (i_n).	53
40.	Resultados control predictivo con etapa de modulación 2D-SVM con carga balanceada en estado estacionario del voltaje del enlace dc (v_{dc}).	54
41.	Resultados control predictivo con etapa de modulación 2D-SVM con carga balanceada en estado estacionario del voltaje de línea de las fases u y v (v_{uv}).	54
42.	Resultados control predictivo con etapa de modulación 2D-SVM con carga balanceada en estado estacionario del voltaje de fase u (v_{un}).	55
43.	Resultados control predictivo con etapa de modulación 2D-SVM con carga balanceada en estado transiente de las corrientes de fase u, v, w (i_u, i_v, i_w).	56
44.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga balanceada en estado estacionario acercamiento de las corrientes de fase u, v, w (i_u, i_v, i_w).	57
45.	Resultados control predictivo con etapa de modulación 2D-SVM con carga balanceada en estado transiente de la fase neutra n (i_n).	57
46.	Resultados control predictivo con etapa de modulación 2D-SVM con carga balanceada en estado transiente del voltaje del enlace dc v_{dc}	58
47.	Resultados control predictivo con etapa de modulación 2D-SVM con carga balanceada en estado transiente del voltaje de línea de las fases u y v (v_{uv}).	59

48.	Resultados control predictivo con etapa de modulación 2D-SVM con carga balanceada en estado transiente del voltaje de fase u (v_{un}).	59
49.	Resultados control predictivo con etapa de modulación 2D-SVM con carga desbalanceada en estado estacionario de las corrientes de fase u, v, w (i_u, i_v, i_w).	60
50.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga balanceada en estado estacionario acercamiento de las corrientes de fase u, v, w (i_u, i_v, i_w).	61
51.	Resultados control predictivo con etapa de modulación 2D-SVM con carga desbalanceada en estado estacionario de la fase neutra n (i_n).	61
52.	Resultados control predictivo con etapa de modulación 2D-SVM con carga desbalanceada en estado estacionario del voltaje del enlace dc (v_{dc}).	62
53.	Resultados control predictivo con etapa de modulación 2D-SVM con carga desbalanceada en estado estacionario del voltaje de línea de las fases u y v (v_{uv}).	62
54.	Resultados control predictivo con etapa de modulación 2D-SVM con carga desbalanceada en estado estacionario del voltaje de fase u (v_{un}).	63
55.	Resultados control predictivo con etapa de modulación 2D-SVM con carga desbalanceada en estado transiente de las corrientes de fase u, v, w (i_u, i_v, i_w).	64
56.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga balanceada en estado estacionario acercamiento de las corrientes de fase u, v, w (i_u, i_v, i_w).	65
57.	Resultados control predictivo con etapa de modulación 2D-SVM con carga desbalanceada en estado transiente de la fase neutra n (i_n).	65
58.	Resultados control predictivo con etapa de modulación 2D-SVM con carga desbalanceada en estado transiente del voltaje del enlace dc (v_{dc}).	66
59.	Resultados control predictivo con etapa de modulación 2D-SVM con carga desbalanceada en estado transiente del voltaje de línea de las fases u y v (v_{uv}).	66
60.	Resultados control predictivo con etapa de modulación 2D-SVM con carga desbalanceada en estado transiente del voltaje de fase u (v_{un}).	67
61.	Espectro de armónicos del control predictivo a frecuencia fija con cargas balanceadas en estado estacionario presentes en la corriente de fase u i_u , distorsión armónica total THD = 1.37%.	68
62.	Espectro de armónicos del control predictivo a frecuencia fija con cargas balanceadas en estado estacionario presentes en el voltaje de línea uv v_{uv} , distorsión armónica total THD = 153.23%.	68

63.	Espectro de armónicos del control predictivo a frecuencia fija con cargas balanceadas en estado estacionario presentes en el voltaje de fase u v_{un} , distorsión armónica total THD = 241.00 %.	69
64.	Espectro de armónicos del control predictivo a frecuencia fija con cargas desbalanceadas en estado estacionario presentes en la corriente de fase u i_u , distorsión armónica total THD = 1.11 %.	69
65.	Espectro de armónicos del control predictivo a frecuencia fija con cargas desbalanceadas en estado estacionario presentes en el voltaje de línea uv v_{uv} , distorsión armónica total THD = 172.36 %.	70
66.	Espectro de armónicos del control predictivo a frecuencia fija con cargas desbalanceadas en estado estacionario presentes en el voltaje de fase u v_{un} , distorsión armónica total THD = 336.70 %.	70
67.	Control M2PCC.	75
68.	Representación espacial vectorial	76
69.	Control M2PCC.	78
70.	Resultados control predictivo M2PCC con carga balanceada en estado estacionario de las corrientes de fase u, v, w (i_u, i_v, i_w).	81
71.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga balanceada en estado estacionario acercamiento de las corrientes de fase u, v, w (i_u, i_v, i_w).	82
72.	Resultados control predictivo M2PCC con carga balanceada en estado estacionario de la fase neutra n (i_n).	82
73.	Resultados control predictivo M2PCC con carga balanceada en estado estacionario del voltaje del enlace dc (v_{dc}).	83
74.	Resultados control predictivo M2PCC con carga balanceada en estado estacionario del voltaje de línea de las fases u y v (v_{uv}).	83
75.	Resultados control predictivo M2PCC con carga balanceada en estado estacionario del voltaje de fase u (v_{un}).	84
76.	Resultados control predictivo M2PCC con carga balanceada en estado transiente de las corrientes de fase u, v, w (i_u, i_v, i_w).	85
77.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga balanceada en estado estacionario acercamiento de las corrientes de fase u, v, w (i_u, i_v, i_w).	86

78.	Resultados control predictivo M2PCC con carga balanceada en estado transiente de la fase neutra n (i_n).	86
79.	Resultados control predictivo M2PCC con carga balanceada en estado transiente del voltaje del enlace dc v_{dc}	87
80.	Resultados control predictivo M2PCC con carga balanceada en estado transiente del voltaje de línea de las fases u y v (v_{uv}).	88
81.	Resultados control predictivo M2PCC con carga balanceada en estado transiente del voltaje de fase u (v_{un}).	88
82.	Resultados control predictivo M2PCC con carga desbalanceada en estado estacionario de las corrientes de fase u, v, w (i_u, i_v, i_w).	89
83.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga balanceada en estado estacionario acercamiento de las corrientes de fase u, v, w (i_u, i_v, i_w).	90
84.	Resultados control predictivo M2PCC con carga desbalanceada en estado estacionario de la fase neutra n (i_n).	90
85.	Resultados control predictivo M2PCC con carga desbalanceada en estado estacionario del voltaje del enlace dc (v_{dc}).	91
86.	Resultados control predictivo M2PCC con carga desbalanceada en estado estacionario del voltaje de línea de las fases u y v (v_{uv}).	91
87.	Resultados control predictivo M2PCC con carga desbalanceada en estado estacionario del voltaje de fase u (v_{un}).	92
88.	Resultados control predictivo M2PCC con carga desbalanceada en estado transiente de las corrientes de fase u, v, w (i_u, i_v, i_w).	93
89.	Resultados control predictivo a frecuencia variable con carga balanceada en estado estacionario acercamiento de las corrientes de fase u, v, w (i_u, i_v, i_w).	94
90.	Resultados control predictivo M2PCC con carga desbalanceada en estado transiente de la fase neutra n (i_n).	94
91.	Resultados control predictivo M2PCC con carga desbalanceada en estado transiente del voltaje del enlace dc (v_{dc}).	95
92.	Resultados control predictivo M2PCC con carga desbalanceada en estado transiente del voltaje de línea de las fases u y v (v_{uv}).	96
93.	Resultados control predictivo M2PCC con carga desbalanceada en estado transiente del voltaje de fase u (v_{un}).	97

94.	Espectro de armónicos del control predictivo M2PCC con cargas balanceadas en estado estacionario presentes en la corriente de fase u i_u , distorsión armónica total THD = 0.71 %.	98
95.	Espectro de armónicos del control predictivo M2PCC con cargas balanceadas en estado estacionario presentes en el voltaje de línea uv v_{uv} , distorsión armónica total THD = 151.71 %.	98
96.	Espectro de armónicos del control predictivo M2PCC con cargas balanceadas en estado estacionario presentes en el voltaje de fase u v_{un} , distorsión armónica total THD = 218.15 %.	99
97.	Espectro de armónicos del control predictivo M2PCC con cargas desbalanceadas en estado estacionario presentes en la corriente de fase u i_u , distorsión armónica total THD = 0.73 %.	99
98.	Espectro de armónicos del control predictivo M2PCC con cargas desbalanceadas en estado estacionario presentes en el voltaje de línea uv v_{uv} , distorsión armónica total THD = 170.53 %.	100
99.	Espectro de armónicos del control predictivo M2PCC con cargas desbalanceadas en estado estacionario presentes en el voltaje de fase u v_{un} , distorsión armónica total THD = 324.79 %.	100
100.	Seguimiento de la corriente i_v a su referencia i_v^* en estado transiente.	108

Índice de Tablas

1.	Estados válidos de conmutación para el convertidor de 4 piernas.	11
2.	Parámetros de simulación del control predictivo operando a frecuencia variable de conmutación.	20
3.	Distorsión armónica total de i_u , i_v , i_w y frecuencia de conmutación u , v y w	43
4.	Distorsión armónica total de uv y un de los dos casos de estudio	44
5.	Distorsión armónica total de i_u , i_v , i_w y frecuencia de conmutación u , v y w	71
6.	Distorsión armónica total de uv y un para los dos casos de estudio	72
7.	Tetraedros.	76
8.	Secuencias de conmutación posibles del control M2PCC.	79
9.	Distorsión armónica total de i_u , i_v , i_w , error en estado estacionario y frecuencia de conmutación u , v y w	101
10.	Distorsión armónica total de uv y un para los dos casos de estudio	102
11.	Distorsión armónica total y error en estado estacionario de las corrientes de carga de los controles aplicados para cada caso de estudio en estado estacionario.	104
12.	Frecuencia de conmutación de cada fase de los controles aplicados para ambos casos en estado estacionario.	105
13.	voltaje de línea y fase de los controles aplicados para ambos casos en estado estacionario.	106