

Índice

1. Introducción	1
1.1. Objetivo General	3
1.2. Objetivos Específicos	3
1.3. Alcances	3
1.4. Resultados Esperados	4
1.5. Aplicaciones	4
1.6. Revisión Bibliográfica	5
1.6.1. Convertidor NPC en aplicaciones de energías renovables	5
1.6.2. Topologías derivadas del convertidor NPC	8
1.6.3. Convertidor NPC de más niveles	8
2. El Inversor NPC	10
2.1. Topología	10
2.1.1. Circuito de potencia	10
2.1.2. dc-link	11
2.2. Estados Válidos	11
2.2.1. Corriente en el inversor	14
2.3. Modelo Matemático	15
3. Revisión de técnicas de modulación y control	17
3.1. Modulación PWM Basada en Portadora (Carrier-Based PWM)	17
3.2. Modulación por Vectores Espaciales (Space Vector Modulation)	18
3.3. Eliminación Selectiva de Armónicos SHE	19
3.4. Control Predictivo de Corriente en el Inversor NPC	20
4. Método de control propuesto para el convertidor	21
4.1. Principio del Control Predictivo en Convertidores de Potencia	21
4.2. Esquema de Control Propuesto para el NPC	21
4.3. Modelo Matemático de Predicción	22
4.4. Función de Costos	23
4.5. Algoritmo de Control	24
5. Simulación del método propuesto	25
5.1. Resultados de Simulación	25

5.1.1.	Respuesta estacionaria	26
5.1.2.	Respuesta dinámica	28
5.1.3.	Respuesta con perturbaciones en la red	30
5.2.	Análisis de Resultados	31
5.2.1.	Distorsión armónica total (THD)	31
5.3.	Control de Desbalance en Enlace Continuo	33
5.3.1.	Voltajes en enlace continuo sin control de desbalance	34
5.3.2.	Voltajes en enlace continuo aplicando control de desbalance	35
5.4.	Análisis de Resultados	41
6.	Implementación experimental	44
6.1.	Armado y Montaje de Estructura del Convertidor	44
6.2.	Armado y Montaje del Circuito de Potencia	46
6.3.	Armado y Montaje del Banco de Carga	46
6.4.	Mediciones y Acondicionamiento de Señales	47
6.5.	Sensor de Corriente	48
6.6.	Sensor de Voltaje	49
6.7.	Acondicionamiento de Señales	50
6.8.	Programación del DSP	50
6.8.1.	Interfaz de programación DSP	51
6.8.2.	Algoritmo de control	52
6.9.	Programación FPGA	52
6.9.1.	Interfaz de programación FPGA	54
6.9.2.	Algoritmo de control	55
6.10.	Comunicación DSP-FPGA	56
6.11.	Resultados Experimentales	56
6.11.1.	Respuesta estacionaria	56
6.11.2.	Respuesta dinámica	59
6.12.	Respuesta con Perturbaciones en la Red	61
6.13.	Análisis de Resultados	62
7.	Comparación de resultados	64
8.	Conclusiones	66
8.1.	Trabajo Futuro	67

A. Esquema del convertidor en GeckoCIRCUITS	68
B. Esquema de conexiones circuito IGBT	69
C. Esquema de conexiones sensor de corriente	70
D. Esquema de conexiones sensor de voltaje	71
E. Esquema de conexiones acondicionador de señales	72
F. Listado de componentes	73
F.1. Circuito IGBT	73
F.2. Sensor de corriente	73
F.3. Sensor de voltaje	74
F.4. Acondicionador de señales	74
G. Especificación técnica TMS320F28335	75
H. Programación DSP: Código Code Composer Studio	76
H.1. main.c	76
H.2. gpioconfig.h	90
H.3. adcconfig.h	92
I. Programación FPGA: Código ISE Design Suite	93

Índice de Figuras

1.	Clasificación convertidores de potencia.	2
2.	Configuración general de un convertidor NPC conectado a un sistema fotovoltaico y un elevador de tensión.	6
3.	Convertidor Boost-NPC conectado a un PMSG para aplicaciones WECs.	6
4.	NPC back to back para aplicaciones PMSG.	7
5.	Convertidor NPC doble elevador para aplicaciones PMSG.	7
6.	Active neutral point clamped.	8
7.	Convertidor NPC de cinco niveles.	9
8.	Inversor neutral point clamped de tres niveles.	11
9.	Conexión dc-link.	11
10.	Representación vectorial y estados correspondientes de cada vector de voltaje.	13
11.	Recorrido de la corriente aplicando un estado P.	14
12.	Recorrido de la corriente aplicando un estado O.	14
13.	Recorrido de la corriente aplicando un estado N.	15
14.	Planta del sistema: carga resistiva inductiva pasiva trifásica.	15
15.	Sistema a controlar: enlace dc, inversor, carga.	16
16.	Modulación PWM basada en portadora.	17
17.	Diagrama de espacio vectorial en convertidor NPC.	19
18.	Voltaje de salida en convertidor NPC aplicando una técnica de control SHE.	19
19.	Control predictivo de corriente para el inversor NPC de tres niveles . . .	20
20.	Método de control predictivo clásico de corriente.	22
21.	Diagrama de flujo de algoritmo de control predictivo a implementar. . .	24
22.	Resultados simulados del control predictivo de corriente aplicado al convertidor NPC: amplitud y frecuencia de referencia 2[A] y 20[Hz] respectivamente	26
23.	Resultados simulados del control predictivo de corriente aplicado al convertidor NPC: amplitud y frecuencia de referencia 2[A] y 50[Hz] respectivamente	27

24.	Resultados simulados del control predictivo de corriente aplicado al convertidor NPC: amplitud y frecuencia de referencia 4[A] y 20[Hz] respectivamente	27
25.	Resultados simulados del control predictivo de corriente aplicado al convertidor NPC: amplitud y frecuencia de referencia 4[A] y 50[Hz] respectivamente	28
26.	Resultados simulados del control predictivo de corriente aplicado al convertidor NPC: cambio de amplitud de 2[A] a 4[A] con frecuencia de 50[Hz]	28
27.	Resultados simulados del control predictivo de corriente aplicado al convertidor NPC: cambio de amplitud de 4[A] a 2[A] con frecuencia de 50[Hz]	29
28.	Resultados simulados del control predictivo de corriente aplicado al convertidor NPC: cambio de frecuencia de 20[Hz] a 50[Hz] con amplitud de 4 [A]	29
29.	Resultados simulados del control predictivo de corriente aplicado al convertidor NPC: cambio de amplitud y frecuencia de 4[A] a 2[A] y 20[Hz] a 50 [Hz] respectivamente	30
30.	Resultados simulados del control predictivo de corriente aplicado al convertidor NPC: con alimentación trifásica desbalanceada	30
31.	Resultados simulados del control predictivo de corriente aplicado al convertidor NPC: cambio de referencias de amplitud y voltaje con alimentación trifásica desbalanceada	31
32.	Análisis FFT para el voltaje en la carga v_{ab} : a) referencia de 2[A] y 20[Hz]; b) referencia de 2[A] y 50[Hz]; c) referencia de 4[A] y 20[Hz]; d) referencia de 4[A] y 50[Hz].	32
33.	Voltajes en condensadores del enlace continuo v_{dc1} y v_{dc2} sin considerar el control de desbalance: a) referencia de 2[A] y 20[Hz]; b) referencia de 2[A] y 50[Hz]; c) referencia de 4[A] y 20[Hz]; d) referencia de 4[A] y 50[Hz].	34
34.	Voltajes en condensadores del enlace continuo v_{dc1} y v_{dc2} considerando el control de desbalance, aplicando una referencia de 2[A] y 20[Hz]; a) voltaje en enlace continuo; b) zoom de voltaje en enlace continuo . . .	35
35.	Voltajes en condensadores del enlace continuo v_{dc1} y v_{dc2} considerando el control de desbalance, aplicando una referencia de 4[A] y 50[Hz]; a) voltaje en enlace continuo; b) zoom de voltaje en enlace continuo . . .	36

36.	Voltajes en condensadores del enlace continuo v_{dc1} y v_{dc2} considerando el control de desbalance, aplicando una referencia de 2[A] y 20[Hz]; a) voltaje en enlace continuo; b) zoom de voltaje en enlace continuo . . .	36
37.	Voltajes en condensadores del enlace continuo v_{dc1} y v_{dc2} considerando el control de desbalance, aplicando una referencia de 4[A] y 50[Hz]; a) voltaje en enlace continuo; b) zoom de voltaje en enlace continuo . . .	37
38.	Voltajes en condensadores del enlace continuo v_{dc1} y v_{dc2} considerando el control de desbalance, aplicando una referencia de 2[A] y 20[Hz]; a) voltaje en enlace continuo; b) zoom de voltaje en enlace continuo . . .	37
39.	Voltajes en condensadores del enlace continuo v_{dc1} y v_{dc2} considerando el control de desbalance, aplicando una referencia de 4[A] y 50[Hz]; a) voltaje en enlace continuo; b) zoom de voltaje en enlace continuo . . .	38
40.	Resultados simulados del control predictivo de corriente aplicado al convertidor NPC: amplitud y frecuencia de referencia 2[A] y 20[Hz] respectivamente	39
41.	Resultados simulados del control predictivo de corriente aplicado al convertidor NPC: amplitud y frecuencia de referencia 2[A] y 50[Hz] respectivamente	39
42.	Resultados simulados del control predictivo de corriente aplicado al convertidor NPC: amplitud y frecuencia de referencia 4[A] y 20[Hz] respectivamente	40
43.	Resultados simulados del control predictivo de corriente aplicado al convertidor NPC: amplitud y frecuencia de referencia 4[A] y 50[Hz] respectivamente	40
44.	Análisis FFT para el voltaje en la carga v_{ab} : a) referencia de 2[A] y 20[Hz]; b) referencia de 2[A] y 50[Hz]; c) referencia de 4[A] y 20[Hz]; d) referencia de 4[A] y 50[Hz].	41
45.	Laboratorio de Conversión de Energía y Electrónica de Potencia	44
46.	Estructura de la instalación y convertidor, autor Fernando Morales Arriagada.	45
47.	Estructura de la instalación y convertidor.	45
48.	Estructura del setup experimental.	46
49.	Tarjeta del circuito IGBT con su respectivo driver	47
50.	Banco de carga.	48

51.	Sensor de corriente.	49
52.	Sensor de voltaje.	49
53.	Acondicionador de señales.	50
54.	Kit experimental C2000, DSP TMS320F28335.	51
55.	Interfaz de programación Code Composer Studio versión 5.3	52
56.	Diagrama de flujo de algoritmo de control predictivo a implementar. . .	53
57.	FPGA Nexys 3	54
58.	Interfaz de programación FPGA, ISE Project Navigator	54
59.	Diagrama de flujo de algoritmo de control predictivo a implementar. . .	55
60.	Manejo de interrupciones DSP-FPGA.	56
61.	Resultados experimentales del control predictivo de corriente aplicado al convertidor NPC: $Ch1$: voltaje en el enlace dc (v_{dc}); $Ch2$: corriente de carga fase a (i_a); $Ch3$: corriente de carga fase b (i_b); $Ch4$: voltaje entre líneas (v_{ab})	57
62.	Resultados experimentales del control predictivo de corriente aplicado al convertidor NPC: $Ch1$: voltaje en el enlace dc (v_{dc}); $Ch2$: corriente de carga fase a (i_a); $Ch3$: corriente de carga fase b (i_b); $Ch4$: voltaje entre líneas (v_{ab})	57
63.	Resultados experimentales del control predictivo de corriente aplicado al convertidor NPC: $Ch1$: voltaje en el enlace dc (v_{dc}); $Ch2$: corriente de carga fase a (i_a); $Ch3$: corriente de carga fase b (i_b); $Ch4$: voltaje entre líneas (v_{ab})	58
64.	Resultados experimentales del control predictivo de corriente aplicado al convertidor NPC: $Ch1$: voltaje en el enlace dc (v_{dc}); $Ch2$: corriente de carga fase a (i_a); $Ch3$: corriente de carga fase b (i_b); $Ch4$: voltaje entre líneas (v_{ab})	58
65.	Resultados experimentales del control predictivo de corriente aplicado al convertidor NPC: $Ch1$: voltaje en el enlace dc (v_{dc}); $Ch2$: corriente de carga fase a (i_a); $Ch3$: corriente de carga fase b (i_b); $Ch4$: voltaje entre líneas (v_{ab})	59
66.	Resultados experimentales del control predictivo de corriente aplicado al convertidor NPC: $Ch1$: voltaje en el enlace dc (v_{dc}); $Ch2$: corriente de carga fase a (i_a); $Ch3$: corriente de carga fase b (i_b); $Ch4$: voltaje entre líneas (v_{ab})	59

67.	Resultados experimentales del control predictivo de corriente aplicado al convertidor NPC: <i>Ch1</i> : voltaje en el enlace dc (v_{dc}); <i>Ch2</i> : corriente de carga fase a (i_a); <i>Ch3</i> : corriente de carga fase b (i_b); <i>Ch4</i> : voltaje entre líneas (v_{ab})	60
68.	Resultados experimentales del control predictivo de corriente aplicado al convertidor NPC: <i>Ch1</i> : voltaje en el enlace dc (v_{dc}); <i>Ch2</i> : corriente de carga fase a (i_a); <i>Ch3</i> : corriente de carga fase b (i_b); <i>Ch4</i> : voltaje entre líneas (v_{ab})	60
69.	Resultados experimentales del control predictivo de corriente aplicado al convertidor NPC: <i>Ch1</i> : voltaje en el enlace dc (v_{dc}); <i>Ch2</i> : corriente de carga fase a (i_a); <i>Ch3</i> : corriente de carga fase b (i_b); <i>Ch4</i> : voltaje entre líneas (v_{ab})	61
70.	Resultados experimentales del control predictivo de corriente aplicado al convertidor NPC: <i>Ch1</i> : voltaje en el enlace dc (v_{dc}); <i>Ch2</i> : corriente de carga fase a (i_a); <i>Ch3</i> : corriente de carga fase b (i_b); <i>Ch4</i> : voltaje entre líneas (v_{ab})	61
71.	Análisis FFT para el voltaje en la carga v_{ab} : a) referencia de 2[A] y 20[Hz]; b) referencia de 2[A] y 50[Hz].	62
72.	Análisis FFT para el voltaje en la carga v_{ab} : a) referencia de 4[A] y 20[Hz]; b) referencia de 4[A] y 50[Hz].	63
73.	Simulación Gecko CIRCUITS	68
74.	Esquemático circuito Switch IGBT.	69
75.	Esquemático circuito sensor de corriente	70
76.	Esquemático circuito sensor de voltaje	71
77.	Esquemático circuito acondicionador de señales	72

Índice de Tablas

1.	Estados válidos y tensiones de salida ($x = a, b, c$).	12
2.	Estados válidos del convertidor NPC.	13
3.	Parámetros de simulación	25
4.	Resultados de simulación: distorsión armónica total voltaje y corriente de salida del convertidor NPC.	33

5.	Resultados de simulación: distorsión armónica total voltaje y corriente de salida del convertidor NPC.	42
6.	Resultados de simulación: distorsión armónica total voltaje y corriente de salida del convertidor NPC.	42
7.	Resultados de simulación: distorsión armónica total voltaje y corriente de salida del convertidor NPC.	42
8.	Resultados experimentales: distorsión armónica total voltaje y corriente de salida del convertidor NPC.	63
9.	Resultados experimentales: porcentaje de error en corriente de salida del convertidor NPC.	63