

Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS	IX
LISTA DE FIGURAS	X
NOMENCLATURA.....	XIII
ABREVIACIONES.....	XIV
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
1.2.1 <i>Introducción</i>	4
1.2.2 <i>Estado del Arte</i>	4
1.2.3 <i>Convertidores de potencia</i>	5
1.3. OBJETIVOS	9
1.3.1 <i>Objetivo General</i>	9
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i>	9
1.4. ALCANCES Y LIMITACIONES	10
1.5. METODOLOGÍA	11
CAPÍTULO 2. SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICO BASADO EN UNA BICICLETA DE SPINNING	13
2.1. INTRODUCCIÓN	13
2.2. MARCO TEÓRICO	13
2.3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA MECÁNICA	15
2.3.1 <i>El pedaleo</i>	16
A. Fases del pedaleo	16
2.3.2 <i>Volante de inercia</i>	18
2.3.3 <i>Selección del generador</i>	19
2.3.4 <i>Sistema de transmisión generador</i>	22
2.4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO	23
2.4.1 <i>Puente rectificador</i>	24
2.4.2 <i>Topología inversor fuente cuasi-Z (qZSI)</i>	24
A. Principios de operación del convertidor cuasi-Z	25
A ..1 Estados válidos de conmutación.....	26
A ..2 Modo de operación non shoot through	27
A ..3 Modo de operación shoot through	28
B. Conmutación del convertidor cuasi-Z	31
B ..1 Método boost simple (SBC)	31
C. Modelo dinámico del convertidor cuasi-Z.....	33
C ..1 Modelo dinámico en modo de operación non shoot through	34
C ..2 Modelo dinámico en modo de operación shoot through	35
C ..3 Modelo en espacio de estados promedio	37
2.4.3 <i>Filtro LCL</i>	38
CAPÍTULO 3. ESQUEMA DE CONTROL PROPUESTO PARA CONVERTIDOR FUENTE CUASI-Z.....	41
3.1. INTRODUCCIÓN	41
3.2. PRINCIPIOS DEL CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL	42
3.2.1 <i>Control PI en cascada (doble lazo realimentado)</i>	43
3.2.2 <i>Control PI en tiempo discreto</i>	45
3.3. PRINCIPIOS DEL CONTROL PROPORCIONAL RESONANTE.....	47
3.3.1 <i>Esquema de control PR aplicado a la salida de potencia</i>	49
3.3.2 <i>Control PR en tiempo discreto</i>	50
3.3.3 <i>Esquema de control propuesto para el convertidor cuasi-Z</i>	50

3.4.	RESULTADOS DE SIMULACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO	51
3.5.	RESULTADOS DE SIMULACIÓN EN ESTADO TRANSITORIO	54
3.6.	RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE POTENCIA SUMINISTRADA EN LA CARGA R-L.....	60
3.7.	FACTOR DE RIZADO Y TIEMPO DE ASENTAMIENTO	64
3.8.	CONCLUSIONES Y DISCUSIONES	65
CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES		66
4.1.	INTRODUCCIÓN	66
4.2.	ARMADO Y ENSAMBLADO DE SISTEMA DE TRANSMISIÓN MECÁNICA Y ESTRUCTURAS DE SOPORTE.....	66
4.3.	MEDICIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES.....	70
4.3.1	<i>Sensor de corriente</i>	71
4.3.2	<i>Sensor de voltaje</i>	72
4.3.3	<i>Acondicionador de señales</i>	73
4.4.	ESTRATEGIA DE CONMUTACIÓN.....	74
4.5.	CIRCUITO DE DISPARO.....	76
4.6.	CIRCUITO DE CONMUTACIÓN DE LA ETAPA INVERSORA	77
4.7.	PROGRAMACIÓN DE LA INTERFAZ DE CONTROL	78
4.7.1	<i>Interpretación de la lectura de sensores</i>	79
4.7.2	<i>Señales ePWM</i>	80
4.7.3	<i>Algoritmo de control</i>	82
4.8.	RESULTADOS EXPERIMENTALES EN ESTADO ESTACIONARIO	84
4.9.	RESULTADOS EXPERIMENTALES EN ESTADO TRANSITORIO	87
4.10.	RESULTADOS EXPERIMENTALES DE POTENCIA SUMINISTRADA EN LA CARGA R-L	91
4.11.	FACTOR DE RIZADO Y TIEMPO DE ASENTAMIENTO	92
4.12.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS	93
4.13.	CONCLUSIONES Y DISCUSIONES	94
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES		95
5.1.	CONCLUSIONES	95
5.2.	TRABAJO FUTURO.....	97
BIBLIOGRAFÍA.....		98
ANEXO A. PLANIMETRÍA DE PIEZAS DEL SISTEMA MECÁNICO DE LA BICICLETA DE SPINNING.....		102
A.1.	PLANO DEL SOPORTE DEL MOTOR/GENERADOR PMSM TRIFÁSICO	102
A.2.	PLANO DE LA PIEZA DE ACOPLE DE VOLANTE DE INERCIA	103
A.3.	PLANO DE LA ESTRUCTURA CENTRAL GABINETE ELECTRÓNICA.....	104
A.4.	PLANO DE LA ESTRUCTURA SUPERIOR GABINETE ELECTRÓNICA	105
A.5.	PLANO DE ACRÍLICOS GABINETE ELECTRÓNICA	106
A.6.	ENSAMBLAJE COMPLETO ESTRUCTURA DEL GABINETE DE ELECTRÓNICA	107
A.7.	PLANO DEL GENERADOR PMSM.....	108
A.8.	PLANO MONTAJE COMPLETO DE BICICLETA.....	109
ANEXO B. ESQUEMAS Y DISEÑO DE TARJETAS ELECTRÓNICAS.....		110
B.1.	TARJETA SENSOR DE CORRIENTE.....	110
B.1.1	<i>Esquemático sensor de corriente</i>	110
B.1.2	<i>Terminales de conexión y diseño de la placa sensor de corriente</i>	111
B.2.	TARJETA SENSOR DE VOLTAJE.....	112
B.2.1	<i>Esquemático sensor de voltaje</i>	112
B.2.2	<i>Terminales de conexión y diseño de la placa sensor de voltaje</i>	114
B.3.	TARJETA ACONDICIONADORA DE SEÑALES	116
B.3.1	<i>Esquemático T. acondicionadora de señales</i>	116
B.3.2	<i>Terminales de conexión y diseño de la placa acondicionadora de señales</i>	117
B.4.	TARJETA DE COMPUERTAS LÓGICAS.....	118
B.4.1	<i>Esquemático T. compuertas lógicas</i>	118

B.4.2	<i>Terminales de conexión y diseño de la placa de la tarjeta de compuertas lógicas</i>	<i>119</i>
B.5.	TARJETA DE DISPAROS	120
B.5.1	<i>Esquemático T. de disparos</i>	<i>120</i>
B.5.2	<i>Terminales de conexión y diseño de placa de T. de disparos</i>	<i>121</i>
B.6.	TARJETA PIERNA INVERSORA	122
B.6.1	<i>Esquemático T. pierna inversora.....</i>	<i>122</i>
B.6.2	<i>Terminales de conexión y diseño de la placa de T. pierna inversora</i>	<i>123</i>
B.7.	TARJETA RED CUASI-Z	124
B.7.1	<i>Esquemático T. Red Cuasi-Z</i>	<i>124</i>
B.7.2	<i>Terminales de conexión y diseño de la placa de T. Red Cuasi-Z.....</i>	<i>125</i>
B.8.	TARJETA RECTIFICADORA TRIFÁSICA PUENTE COMPLETO	126
B.8.1	<i>Esquemático T. rectificadora trifásica puente completo</i>	<i>126</i>
B.8.2	<i>Terminales de conexión y diseño de la placa T. rectificadora trifásica puente completo</i>	<i>127</i>
ANEXO C.	CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR DELFINO TMS320F28335	127

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Estados válidos de etapa inversora.....	26
Tabla 3.1 Tabla de parámetros utilizados en la simulación del control.	51
Tabla 3.2 Factor de rizo en el enlace CC	64
Tabla 3.3 Tiempo de asentamiento de voltaje v_{c1} en estado transiente	64
Tabla 4.1 Factor de rizo en el enlace CC, resultados experimentales.....	92
Tabla 4.2 Tiempo de asentamiento de voltaje v_{c1} en estado transiente	92
Tabla 4.3 Comparación de resultados Factor de rizo en el enlace CC.....	93
Tabla 4.4 Tiempo de asentamiento de voltaje v_{c1} en estado transiente	93

Lista de Figuras

Figura 1.1 Inversor Fuente de voltaje tradicional (VSI)	6
Figura 1.2 Inversor Fuente de Corriente Tradicional (CSI)	7
Figura 1.3 Inversor Fuente-Z (ZSI)	8
Figura 1.4 Inversor Fuente cuasi-Z (qZSI)	9
Figura 2.1 Esquema general sistema generador eléctrico	14
Figura 2.2 Esquema Sistema Electrónico implementado.....	14
Figura 2.3 Bicicleta de spinning Oxford Be2690.....	15
Figura 2.4 Representación de las fases del pedaleo	16
Figura 2.5 Plato ovalado, reduce transición de puntos críticos del pedaleo.....	18
Figura 2.6 Diagrama de cuerpo libre, fuerza aplicada al pedal.	20
Figura 2.7 Motor/generador de imanes permanentes síncrono trifásico 500[W]	21
Figura 2.8 Sistema de transmisión de potencia bicicleta-generador	22
Figura 2.9 Rectificador onda completa CA/CC	24
Figura 2.10 Topología convertidor cuasi-Z.....	25
Figura 2.11 Modo de operación non shoot through, según estados válidos de etapa inversora	28
Figura 2.12 Modo de operación shoot through en estado de cortocircuito de la etapa inversora.	30
Figura 2.13 Modulación mediante método boost simple	32
Figura 2.14 Esquema de disparos de los interruptores de la etapa inversora en la modulación simple boost	33
Figura 2.15 Representación simplificada del convertidor cuasi-Z para análisis matemático en modo non shoot through.....	34
Figura 2.16 Representación simplificada del convertidor cuasi-Z para análisis matemático en modo shoot through.....	36
Figura 2.17 Esquema de tiempos de operación Shoot Through y Non Shoot Through.....	38
Figura 2.18 Filtro LCL acoplamiento de red eléctrica con el convertidor cuasi-Z.....	39
Figura 3.1 Control convertidor del cuasi-Z basado en reguladores PI.....	44
Figura 3.2 Descripción gráfica para aproximación rectangular hacia adelante mediante Euler	49
Figura 3.3 Esquema de control PR propuesto, aplicado a filtro LCL con carga R-L.	49
Figura 3.5 Esquema de control Propuesto para el control del convertidor cuasi-Z, inyectando corriente a una carga RL.....	51
Figura 3.5 Esquema de control Propuesto para el control del convertidor cuasi-Z, inyectando corriente a una carga RL.....	51
Figura 3.6 Resultados de simulación de control del convertidor cuasi-Z en estado estacionario.....	53
Figura 3.7 Resultados de simulación de control del convertidor cuasi-Z en estado estacionario.....	54
Figura 3.8 Resultado de simulación para estado transitorio de corriente en la carga R-L.....	55
Figura 3.9 Resultados de voltajes del convertidor cuasi-Z ante cambios de amplitud corriente en la carga R-L de 0.4 a 2 [Ap-p]	56
Figura 3.10 Resultado de simulación para estado transitorio de corriente en la carga R-L.....	57
Figura 3.11 Resultados de voltajes del convertidor cuasi-Z ante cambios de amplitud corriente en la carga R-L de 0.4 a 2 [Ap-p]	58
Figura 3.12 Resultados de simulación de control de convertidor cuasi-Z ante cambio de referencia de voltaje v_{c1} de 45 a 60[V]	59

Figura 3.13 Resultados de simulación de control de convertidor cuasi-Z ante cambio de referencia de voltaje v_{c_1} de 60 a 45[V]	60
Figura 3.14 Resultados de simulación de potencia 50[W] suministrada a la carga R-L.....	61
Figura 3.15 Resultados de simulación de potencia 112[W] suministrada a la carga R-L.....	62
Figura 3.16 Resultados de simulación para potencia suministrada a la carga R-L para cambios de voltaje de referencia del enlace CC.....	63
Figura 4.1 Estructura soportante del generador(motor PMSM)	67
Figura 4.2 Pieza de acople del volante de inercia con el generador.....	67
Figura 4.3 Ensamblaje sistema de transmisión bicicleta-generador en software 3D Autodesk Inventor	68
Figura 4.4 Diseño de sistema de acople y gabinete electrónico implementado en bicicleta de spinning Oxford Be2690.....	69
Figura 4.5 Construcción de sistema de transmisión mecánica y gabinete de la electrónica, montado en la bicicleta de spinning.....	70
Figura 4.6 Tarjeta electrónica de medición de corriente	72
Figura 4.7 Tarjeta electrónica de medición de voltaje CC.....	73
Figura 4.8 Tarjeta acondicionadora de señales	74
Figura 4.9 Tarjeta de compuertas lógicas para la modulación SBC de los interruptores de la etapa inversora	75
Figura 4.10 Señales de salida tarjeta de operaciones lógicas usando modulación SBC	76
Figura 4.11 Tarjeta de disparos para la conmutación de los interruptores de las piernas inversoras.....	77
Figura 4.12 Esquema de conexión de circuito de disparo utilizando fibra óptica para conmutación de interruptores de la etapa inversora	77
Figura 4.13 Piernas inversoras utilizando Mosfet SiC.....	78
Figura 4.14 Comparación de señales en el microcontrolador	81
Figura 4.15 Diagrama de flujo de control PI doble lazo (cascada) implementado en el algoritmo de control del microcontrolador F28335.	83
Figura 4.16 Diagrama de flujo de control PR implementado en el algoritmo de control del microcontrolador F28335.	84
Figura 4.17 Resultado experimentales en estado estacionario para el control de corriente i_{Load} que circula por la carga R-L y voltaje del condensador v_{c_1}	85
Figura 4.18 Resultado experimentales en estado estacionario control de voltaje del condensador v_{c_1} , y voltaje de salida CA del convertidor cuasi-Z	85
Figura 4.19 Resultado experimentales en estado estacionario para el control de corriente i_{Load} que circula por la carga R-L y voltaje del condensador v_{c_1}	86
Figura 4.20 Resultado experimentales en estado estacionario para el control de voltaje del condensador v_{c_1} (4) con un voltaje de referencia de 45[V] y gráfica de voltaje de salida CA del convertidor cuasi-Z (1)	86
Figura 4.21 Resultado experimentales en estado estacionario para el control de voltaje del condensador v_{c_1} (2) con un voltaje de referencia de 30[V] y gráfica de voltaje de salida CA del convertidor cuasi-Z(4)	87
Figura 4.22 Resultados experimentales para un régimen de transición de corriente i_{load} en la salida CA para un cambio de amplitud y voltaje fijo.	88

Figura 4.23 Resultados experimentales para un cambio de amplitud de corriente de referencia i_{load} de 0.4 a 2[Ap-p], y voltaje v_{C_1} de 60[V]. 89

Figura 4.24 Resultados experimentales del control implementado a convertidor cuasi-Z para el control de voltaje de enlace CC a través de v_{C_1} , y control de corriente i_{load} del lado CA. 90

Figura 4.25 Resultado experimental de un cambio de referencia de voltaje en el condensador C_1 de 30 a 45[V], y voltaje de salida CA del convertidor cuasi-Z. 91

Figura 4.26 Resultados experimentales de potencia suministrada a la carga R-L 91

Nomenclatura

Matrices

- A** : matriz de parámetros de dimensión $n \cdot n$.
B : matriz de parámetros de dimensión $n \cdot p$.
C : matriz de parámetros de dimensión $q \cdot n$.
D : matriz de parámetros de dimensión $q \cdot p$.

Vectores

- x** : vector de n variables de estados, $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n]^T$
u : vector de p variables de entrada, $\mathbf{u} = [u_1 \ u_2 \ \cdots \ u_p]^T$
y : vector de q variables de salida, $\mathbf{y} = [y_1 \ y_2 \ \cdots \ y_q]^T$

Abreviaciones

Mayúsculas

L.A.	: Lazo abierto.
L.C	: Lazo cerrado.
S.S.	: Estado estacionario.
PI	: Controlador proporcional integral.
PR	: Controlador proporcional resonante.
TZ	: Transformada Z.
CC	: Corriente Continua
CA	: Corriente Alterna
CNE	: Comisión Nacional de Energía
UGP	: Unidad de gestión de Proyectos
qZSI	: Inversor Fuente cuasi-Z (quasi-Z Source Inverter)
ZSI	: Inversor fuente-Z (Z Source Inverter)
PLL	: Lazo de sincronización de fase (Phase Lock Loop)
PMSM	: Motor de imanes permanentes sincrónico (Permanent Magnet Synchronous Motor)
SIC	: Sistema Interconectado Central
SING	: Sistema Interconectado del Norte Grande
VSI	: Inversor fuente de voltaje (Voltage Source Inverter)
CSI	: Inversor fuente de corriente (Current Source Inverter)
EMI	: Interferencia Electromagnética (ElectroMagnetic Interference)
SPWM	: Modulación por ancho de pulso sinusoidal (Sinoidal Pulse width Modulation)
SVM	: Modulación Vectorial
FEM	: Fuerza Electromotriz
THD	: Distorsión armónica total (Total Harmonic Distortion)
DSC	: Controlador Digital de Señales
FR	: Factor de Rizado
DAC	: Convertidor Digital Análogo (Digital Analog Converter)
DSP	: Procesador digital de señales (Digital Signal Processor)
ZOH	: Retentor de orden cero (Zero Order Holder)
SBC	: Control elevador simple (Simple Boost Control)