

Índice

Capítulo 1. Introducción	1
1.1.- Introducción General	1
1.2.- Revisión Bibliográfica	4
1.2.1.-Trabajos Previos	4
1.2.2.-Discusión Bibliográfica.....	13
1.3.- Hipótesis del Trabajo	16
1.4.- Objetivos	16
1.4.1.-Objetivo General	16
1.4.2.-Objetivos Específicos.....	16
1.5.- Alcances	16
1.6.- Metodología	17
Capítulo 2. Sistemas fotovoltaicos y diseño de la configuración <i>multistring</i>	19
2.1.- Introducción	19
2.2.- Configuraciones de los sistemas fotovoltaicos para la conexión a la red eléctrica.....	19
2.2.1.-Configuración por <i>módulo</i>	20
2.2.2.-Configuración <i>string</i> o por cadena.....	21
2.2.3.-Configuración <i>central</i>	23
2.2.4.-Configuración <i>multistring</i> o múltiples cadenas de paneles fotovoltaicos.....	24
2.3.- Aspectos generales del convertidor multinivel asimétrico de 27 niveles ...	27
2.4.- Convertidores en la configuración <i>multistring</i>	29
2.5.- Selección y diseño de los convertidores dc-dc.	32
2.5.1.-Comparación de convertidores dc-dc para el control de MPPT.....	33
A. Voltaje de entrada al convertidor dc-dc.....	33
B. Cantidad de componentes semiconductores	34
C. Análisis de operación del convertidor dc-dc en la curva característica de un panel fotovoltaico.....	35
2.5.2.-Diseño del convertidor <i>boost</i> para el control MPPT	38

2.5.3.-Convertidor <i>buck</i> para el control de voltaje dc de alimentación de una celda <i>punte H</i>	44
2.6.- Ecuaciones que modelan los convertidores dc-dc.	49
2.6.1.-Convertidor <i>boost</i> con una fuente de voltaje como carga.	49
2.6.2.-Convertidor <i>buck</i>	51
2.6.3.-Modelo de una celda Solar.	52
2.6.4.-Configuración <i>multistring</i> de doble etapa dc con una resistencia como carga ..	54
2.7.- Estrategia de Control	55
2.7.1.-Algoritmo de seguimiento de máximo punto de potencia P&O	55
2.7.2.-Control del convertidor <i>boost</i>	58
2.7.3.-Estrategia de control para el convertidor <i>buck</i>	60
Capítulo 3. Construcción e implementación	60
3.1.- Introducción	60
3.2.- Convertidor <i>boost</i>	61
3.3.- Convertidor <i>buck</i>	62
3.4.- Sensor de Voltaje	64
3.5.- Sensor de Corriente.....	68
3.6.- Tarjeta de Disparo.....	69
3.7.- Paneles Fotovoltaicos	70
3.8.- Almacenador de energía	70
3.9.- Tarjeta controladora	71
3.10.- <i>Set-up</i> experimental	73
Capítulo 4. Resultados	74
4.1.- Introducción	74
4.2.- Simulación	74
4.2.1.-Estrategia de control.....	75
4.3.- Experimental.....	80
4.3.1.-Control de MPPT de cada panel fotovoltaico	80
4.3.2.-Estudio del voltaje en la carga ante cambios de referencias de voltaje en los paneles fotovoltaicos	84

4.3.3.-Estudio del control MPPT de cada panel fotovoltaico antes cambios de referencia de voltaje en la carga	85
4.3.4.-Estudio del control MPPT y el control en la tensión en la resistencia ante cambios.....	87
Capítulo 5. Conclusiones	88
5.1.- Sumario	88
5.2.- Conclusiones	90
5.3.- Trabajo a futuro	91
Bibliografía.....	92
Anexo A. Esquemáticos <i>Eagle</i>	97
A.1 Convertidor dc-dc de tipo buck	97
A.2 Convertidor dc-dc del tipo boost	98
A.3 Sensor de voltaje y corriente.....	99
Anexo B.....	100
B.1 Programación de control de la configuración Multistring.	100

Índice de Figuras

Fig 1.1 Proyectos de Generación Ingresados a SEIA entre el año 2015 y 2016 [3]	2
Fig 2.1 Configuraciones en sistemas fotovoltaicas. a) Configuración por módulo. b) Configuración <i>string</i> . c) Configuración <i>multistring</i> . d) Configuración <i>central</i>	20
Fig 2.2 Micro inversor comercial [7].....	21
Fig 2.3 Configuración <i>string</i> con aislación galvánica. (a) única etapa. (b) doble etapa [7].	22
Fig 2.4 Configuración <i>string</i> sin transformador	23
Fig 2.5 Configuración <i>central</i> [7].....	24
Fig 2.6 Convertidor multinivel 3L-NPC para una configuración <i>central</i> [7].....	24
Fig 2.7 Conexión de Paneles solares en una configuración <i>multistring</i> con diferentes características. a) Diferentes potencia nominal y tamaño. b) Diferentes orientaciones. c) Diferentes grados de sombreado [8].....	26
Fig 2.8 Configuración <i>multistring</i> [7].....	26
Fig 2.9 Convertidor multinivel asimétrico de 27 niveles [4].....	27
Fig 2.10 Configuración <i>multistring</i> de doble etapa dc-dc para un convertidor multinivel asimétrico	28
Fig 2.11 Convertidores <i>boost</i> conectados a un único inversor puente H [9]	30
Fig 2.12 Inversores puente H acoplados a su propio rectificador de onda completa conectados a un único inversor puente H [7]	30
Fig 2.13 Convertidores <i>boost</i> conectados a un único inversor NPC de 3 niveles [6]	31
Fig 2.14 Convertidores <i>boost</i> conectados a un único inversor VSI de dos niveles [6]	31
Fig 2.15 Convertidores <i>boost</i> conectados a un único inversor de 5 niveles [12]	32
Fig 2.16 Etapa de entrada del convertidor dc-dc. a) En el caso de un convertidor <i>boost</i> b) En el caso de un convertidor <i>buck</i> y <i>buck-boost</i>	34
Fig 2.17 Circuito de los convertidores dc-dc para evitar el flujo de corriente de retorno	35
Fig 2.18 Curvas características de salida de los paneles solares bajo cambio de irradiancia y temperatura. a) y c) corriente v/s voltaje. b) y d) potencia v/s voltaje [7].....	36
Fig 2.19 Circuito equivalente de la Fig 2.17a	36
Fig 2.20 Región de seguimiento y no seguimiento del convertidor <i>boost</i>	37

Fig 2.21 Región de seguimiento y no seguimiento del convertidor <i>buck</i>	38
Fig 2.22 Formas de onda en modo de conducción continua del convertidor <i>boost</i> . a) Voltaje <i>gate-source</i> . b) Voltaje a través del inductor. c) Corriente a través inductor. d) Voltaje a través del diodo. e) Corriente a través del switch. f) Voltage <i>drain-source</i> . g) Corriente a través del diodo [15]	39
Fig 2.23 Formas de onda de salida del convertidor <i>boost</i> . a) Corriente a través del diodo..	43
Fig 2.24 Convertidor <i>buck</i>	44
Fig 2.25 Formas de onda del convertidor <i>buck</i> en modo de conducción continua. a) Voltaje <i>gate-source</i> . b) Voltaje a través del inductor. c) Corriente a través inductor. d) Voltaje a través del diodo. e) Corriente a través del switch. f) Voltage <i>drain-source</i> . g) Corriente a través del diodo [15]	45
Fig 2.26 Formas de ondas de salida del convertidor <i>buck</i> . a) Corriente a través del condensador. b) Voltaje de salida del convertidor. c) Corriente a través del inductor. d) Voltaje de a través del condensador [15]	49
Fig 2.27 Circuito equivalente. a) cuando $u = 1$. b) cuando $u = 0$	50
Fig 2.28 Circuito equivalente. a) cuando $u = 1$. b) cuando $u = 0$	51
Fig 2.29 Circuito equivalente de una celda solar	52
Fig 2.30 Circuito de la configuración <i>multistring</i> de doble etapa dc	54
Fig 2.31 Diagrama de flujo del algoritmo P&O	56
Fig 2.32 Condiciones del algoritmo P&O. a) Potencia actual es igual a la anterior. b) y c) Potencia actual es mayor que la anterior. d) y e) Potencia actual es menor que la anterior.	58
Fig 2.33 Estrategia de control para el convertidor <i>boost</i>	58
Fig 2.34 PWM <i>interleaved (phase shift)</i>	59
Fig 2.35 Estrategia de control para el control de voltaje de salida del convertidor <i>buck</i>	60
Fig 3.1 Placa y componentes montados del convertidor <i>boost</i>	62
Fig 3.2 Placa y componentes montados del convertidor <i>buck</i>	63
Fig 3.3 Sensor de voltaje	64
Fig 3.4 Gráfico de V_{in} v/s V_{out+} , V_{out-} del circuito integrado ACPL-C87X	65
Fig 3.5 Divisor de voltaje	65
Fig 3.6 Gráfica voltaje sensado v/s voltaje entrada a ACPL-C87X.....	66
Fig 3.7 Circuito amplificador diferencial no inversor	66

Fig 3.8 Gráfica Voltaje sensado v/s V_{adc}	67
Fig 3.9 Sensor de voltaje	67
Fig 3.10 Transductor de corriente LEM LA 25-P	68
Fig 3.11 Circuito configuración LEM LA 25-P	68
Fig 3.12 Sensor de corriente y de voltaje en una sola placa	69
Fig 3.13 Tarjeta de disparo para MOSFET's	70
Fig 3.14. Baterías conectadas en serie	71
Fig 3.15 Esquemas de programación para la estrategia de control. a) Convertidor <i>boost</i> . b) Convertidor <i>buck</i>	72
Fig 3.16 <i>Set-up</i> experimental.....	73
Fig 4.1 Esquema del circuito en PSIM	75
Fig 4.2 Control para los convertidores dc-dc en PSIM	75
Fig 4.3 Cambios de las condiciones ambientales en los paneles fotovoltaicos	76
Fig 4.4 Comportamiento control MPPT en ambos paneles fotovoltaicos. a) Control MPPT panel 1. b) Control MPPT panel 2. c) Estado transiente del control de MPPT en el panel 1	77
Fig 4.5 Curvas del control de voltaje de salida.....	78
Fig 4.6 Corriente en los inductores de los convertidores dc-dc. a) y b) Corriente a través del inductor del convertidor <i>boost</i> . c) y d) Corriente a través del inductor del convertidor <i>boost</i> 2. e) y f) Corriente a través del inductor del convertidor <i>buck</i>	79
Fig 4.7 Curva característica de salida del panel fotovoltaico	81
Fig 4.8 Control de MPPT 1	81
Fig 4.9 Curva característica de salida del panel fotovoltaico 2	82
Fig 4.10 Control de MPPT 2	83
Fig 4.11 PWM <i>interleaved</i> en los convertidores <i>boost</i>	83
Fig 4.12 Estabilidad del voltaje en la carga por cambios de voltaje de salida del panel fotovoltaico 1	84
Fig 4.13 Estabilidad del voltaje en la carga por cambios de voltaje de salida del panel fotovoltaico 2.....	85
Fig 4.14 Impacto por cambio de voltaje de referencia en la carga.....	86
Fig 4.15 Impacto por cambio de voltaje de referencia en la carga.....	87

Fig 4.16 Estabilidad de voltaje, corriente MPP y voltaje en la carga ante impacto de carga
..... 87

Índice de Tablas

Tabla 3.1 Parámetros de diseño del convertidor <i>boost</i>	61
Tabla 3.2 Parámetros de diseño para el convertidor <i>buck</i>	62
Tabla 3.3 Parámetros del panel fotovoltaico.	70

Nomenclatura

C	: Condensador
D	: Ciclo de trabajo
f_o	: Frecuencia de corte
f_s	: Frecuencia de conmutación
I_o	: Corriente de salida
I_i	: Corriente de entrada
i	: Corriente de <i>switch</i>
i_D	: Corriente del diodo
I_{SM}	: Corriente de <i>peak</i> del <i>switch</i>
I_{DM}	: Corriente de <i>peak</i> del diodo
i_L	: Corriente en el inductor
L	: Inductor
M_{VDC}	: Función de transferencia de voltaje dc
P	: Potencia
T	: Período
T	: Temperatura
t	: Tiempo
t_{on}	: Tiempo encendido
S	: Irradiancia
V	: Voltaje
V_{bus}	: Voltaje bus dc
V_{gs}	: Voltaje gate-source
V_{pv}	: Voltaje panel fotovoltaico
v_L	: Voltaje del inductor
V_i	: Voltaje de entrada
V_o	: Voltaje de salida
V_s	: Voltaje de <i>switch</i>
V_D	: Voltaje del diodo
V_{SM}	: Voltaje de <i>peak</i> del <i>switch</i>

Abreviaciones

Mayúsculas

ADC	: Analog Digital Converter
CCM	: Continuous Conduction Mode
DCM	: Discontinuous Conduction Mode
DSP	: Digital Signal Processing
ePWM	: Enhanced Pulse Width Modulator
GMPPT	: Global Maximum Power Point Tracking
GPIO	: General Purpose Input/Output
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor
LERAE	: Laboratorio de Energías Renovables y Acondicionamiento Eléctrico
MOSFET	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.
MPP	: Maximum Power Point
MPPT	: Maximum Power Point Tracking
NPC	: Neutral Point Common
PCB	: Printed Circuit Board
PI	: Proporcional Integrativo
PV	: Photovoltaic
PWM	: Pulse Width Modulation
SEIA	: Servicio de Evaluación del Impacto Ambiental
THD	: Total Harmonic Distortion
VSI	: Voltage Source Inverter

Minúsculas

ac	: alternating current
dc	: direct current
kHz	: kilo-hertz
k Ω	: kilo-ohm