

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Hipótesis de la tesis.	2
1.3. Objetivos de la tesis.	3
1.3.1. Objetivo general.	3
1.3.2. Objetivos específicos.	3
1.4. Estructura de la tesis:	3
2. Emulador de descarga de batería	5
2.1. Fundamentos básicos de baterías.	5
2.2. Definiciones eléctricas de las baterías.	6
2.3. Tipos de baterías.	6
2.4. Modelo de baterías.	8
2.4.1. Tipos de modelos.	8
2.4.2. Principales suposiciones en el modelamiento de baterías.	9
2.4.3. Ecuación de voltaje de circuito abierto.	10
2.5. Batería Litio-ion.	12
2.5.1. Principales partes.	13
2.5.2. Principio de funcionamiento.	13
2.6. Conversor de voltaje tipo multifases.	14
2.7. Emulador de baterías.	15
2.7.1. Ventajas del emulador de baterías.	16
2.8. Algunos casos de estudio de emuladores de baterías.	16
3. Modelo de una batería Litio-ion.	19
3.1. Resistencia en una batería.	19
3.1.1. Resistencia interna.	19
3.1.2. Resistencia iónica.	20
3.2. Comportamiento de la caída de voltaje de la batería después de un pulso de corriente de descarga.	21
3.3. Parámetros de la ecuación de voltaje de circuito abierto.	22
3.4. Estimación de valores de las redes RC mediante espectroscopia de impedancia electroquímica.	23
3.4.1. Potenciostato - Galvanostato.	24
3.4.2. Selección de la amplitud AC.	26
3.4.3. Modelo de Circuito Equivalente Eléctrico.	26

3.5.	Representación gráfica de las mediciones de impedancia en EIS.	27
3.5.1.	Diagrama de Nyquist.	27
3.5.2.	Diagramas de Bode.	29
3.6.	Estimación de valores de las redes RC mediante técnica de “Extracción de parámetros en el dominio del tiempo”.	30
3.7.	Obtención de la ecuación del voltaje transiente de la batería	34
3.7.1.	Comportamiento eléctrico del CEE.	34
3.8.	Determinación del voltaje de circuito abierto del modelo de batería	35
3.9.	Determinación de la ecuación del voltaje de descarga del modelo de batería.	36
4.	Diseño de convertor de voltaje tipo multifases.	37
4.1.	Convertor de voltaje boost.	37
4.2.	Generación de pulsos de disparo.	38
4.2.1.	Valores referenciales de diseño de controladores.	39
4.2.2.	Control PI conexión cascada.	40
4.3.	Conversión analógica-digital.	41
4.3.1.	Retardos de transporte.	41
4.3.2.	Transformada bilineal de Tustin.	41
4.3.3.	Controlador PI digital.	42
4.4.	Diseño de interfase de entrada del convertor boost.	43
4.4.1.	Cálculo de relación de voltajes y corrientes en modo de conducción de corriente continua.	43
4.4.2.	Cálculo del inductor en el límite entre el modo de operación corriente continua y discontinua.	44
4.5.	Diseño de interfase de salida del convertor de voltaje boost.	46
4.5.1.	Cálculo del capacitor de salida.	46
4.6.	Modelamiento dinámico del convertor boost.	47
4.6.1.	Modelamiento dinámico para la obtención de la función de transferencia del controlador de corriente.	47
4.6.2.	Modelamiento dinámico para la obtención de la función de transferencia del controlador de voltaje.	48
4.7.	Determinación de los valores de variación(rizado) de corriente y voltaje del convertor de voltaje boost.	49
4.8.	Convertor de voltaje tipo multifases.	50
4.8.1.	Cálculo de los inductores en el límite entre el modo de operación corriente continua y discontinua.	51
4.8.2.	Diseño de interfase de salida: Cálculo del capacitor de salida.	53
4.9.	Determinación de los valores de variación (rizado) de corriente y voltaje del convertor multifases.	53
4.10.	Modelamiento dinámico del convertor multifases.	54
4.10.1.	Modelamiento dinámico para la obtención de la función de transferencia del controlador de corriente.	54
4.10.2.	Modelamiento dinámico para la obtención de la función de transferencia del controlador de voltaje.	54
4.11.	Diagrama de bloques del lazo de control.	54
5.	Diseño experimental de emulador de descarga con modelo en línea de ba-	

tería Litio-ion.	55
5.1. Esquemático de emulador de descarga de batería Litio-ion.	55
5.2. Características de la batería de Litio-ion.	55
5.3. Obtención de valores estimados de parámetros de la ecuación de circuito abierto de la batería Litio-ion.	56
5.3.1. Descripción del banco de pruebas de descarga de batería.	57
5.3.2. Obtención de valores estimados de parámetros de la ecuación de circuito abierto a partir de curva de descarga.	57
5.4. Estimación de los valores RC mediante Espectroscopia de la Impedancia Electroquímica.	58
5.4.1. Descripción del banco de pruebas para análisis de espectroscopia de impedancia electroquímica.	59
5.4.2. Configuración Potenciostato-Galvanostato para pruebas de impedancia.	59
5.4.3. Resultado obtenidos en pruebas de espectroscopia de impedancia electroquímica.	60
5.4.4. Diagramas de Lissajous y admitancia.	61
5.4.5. Obtención de valores RC mediante diagramas de Nyquist.	62
5.4.6. Obtención de valores RC mediante ajustes en software NOVA 2.0.	63
5.5. Estimación de los valores RC mediante la técnica de “Extracción de parámetros en el dominio del tiempo”.	64
5.5.1. Descripción del banco de pruebas de descarga de batería.	64
5.5.2. Análisis de perfil de descarga I-V.	64
5.5.3. Obtención de valores de las redes RC.	66
5.6. Diseño de convertor de voltaje tipo multifases.	67
5.6.1. Convertor de voltaje boost tipo multifases.	68
5.6.2. Control en cascada voltaje - corriente.	69
5.6.3. Generación de pulsos de disparo para elementos de conmutación.	71
5.7. Diseño modelo de batería	71
5.8. Esquemático general del emulador de descarga de batería.	74
6. Simulaciones y resultados.	75
6.1. Simulación modelo de batería.	75
6.2. Simulación de sistema completo.	77
6.2.1. Primer escenario de funcionamiento.	78
6.2.2. Segundo escenario de funcionamiento.	81
7. Conclusiones.	84
Bibliografía	87

Índice de Tablas

2.1. Tipos de baterías	7
2.2. Tipos de batería de Litio-ion	7
2.3. Parámetros de baterías	12
4.1. Valores referenciales de diseño de controladores.	39
4.2. Valores de variación de voltaje y corriente	50
5.1. Características de batería de Litio-ion	56
5.2. Puntos seleccionados para análisis.	58
5.3. Valores estimados de los parámetros de la ecuación de circuito abierto.	58
5.4. Datos utilizados en pruebas de medición de impedancia	60
5.5. Valores estimados de circuito equivalente eléctrico.	62
5.6. Datos programados en software de carga electrónica.	64
5.7. Información obtenida de las ventanas de tiempo.	67
5.8. Valores estimados RC para circuito equivalente eléctrico.	67
5.9. Valores de los componentes de convertor de voltaje boost tipo multifases.	69
5.10. Valores utilizados en el diseño de controladores.	70
5.11. Parámetros de los controladores de voltaje y corriente.	70

Índice de Ilustraciones

2.1. Modelos eléctricos de baterías, a)Ideal, b)Lineal y c)Thevenin	9
2.2. Modelo Thevenin para batería Li-ion	10
2.3. Modelo de batería Shepherd Thevenin.	11
2.4. Funcionamiento de una batería de litio-ion.	14
2.5. Conversor tipo multifases	14
2.6. Conversor tipo multifases 3 fases	15
2.7. Esquemático de emulador de batería con carga	17
2.8. Emulador de batería con conversor DC-DC bidireccional	17
2.9. Diseño de emulador de batería	18
2.10. Conversor buck-boost con resistencia para proceso de carga	18
3.1. Representación de caída de voltaje debido a la resistencia interna	20
3.2. Caída de voltaje de una batería de Litio-ion.	22
3.3. Curva de descarga de batería típica	22
3.4. Representación de los datos de impedancia en el Diagrama de Nyquist	25
3.5. Circuitos equivalentes eléctricos de batería Litio-ion.	27
3.6. Diagrama de Nyquist para una celda de Litio-ion	28
3.7. Diagrama de Bode	30
3.8. Circuito equivalente eléctrico del modelos de batería.	31
3.9. Período de relajación de batería	31
3.10. Circuito equivalente eléctrico del modelo Shepherd-Thevenin con 2 redes RC propuesto	36
4.1. Conversor de voltaje boost	38
4.2. Controlador de voltaje - corriente en cascada.	38
4.3. Comparación de señales y generación de pulsos	39
4.4. Conexión en cascada de controladores voltaje - corriente, a) Controlador de voltaje b) Controlador de corriente.	40
4.5. Sistema de control considerando retardo de transporte.	41
4.6. Conversor boost a)Proceso de carga de inductor $S_1 = 0$, $S_2=1$	43
4.7. Límite de conducción del conversor boost	45
4.8. Rizado del voltaje promedio de salida	46
4.9. Conversor de voltaje tipo multifases (3 fases).	50
4.10. Diagrama de bloques del lazo de control del conversor de voltaje boost - 3 fases.	54
5.1. Esquemático general de emulador de descarga de batería de litio-ion propuesto.	56
5.2. Banco de pruebas para descarga de batería Litio-ion.	57

5.3. Descarga experimental a 0.25C.	58
5.4. Banco de pruebas para medición de impedancia.	59
5.5. Diagrama de Nyquist de batería de Litio-ion.	60
5.6. Diagrama de Bode de impedancia y cambio de fase.	61
5.7. Diagrama de Lissajous de prueba de impedancia.	61
5.8. Diagrama de admitancia de prueba de impedancia.	62
5.9. Diagrama de Nyquist, obtención puntos de interés.	62
5.10. Curvas de ajuste en diagrama de Nyquist.	63
5.11. Obtención de valores RC mediante comando "Fit and Simulation".	64
5.12. Descarga experimental con 9 pulsos de corriente.	65
5.13. Voltaje de relajación despues del cuarto pulso de corriente de descarga.	66
5.14. Obtención de las ventanas de tiempo.	67
5.15. Esquema eléctrico de emulador de descarga con convertor de voltaje tipo multifases.	68
5.16. Esquemático control en cascada voltaje-corriente.	71
5.17. Esquemático circuito generador de pulsos de disparo.	71
5.18. Modelo de batería propuesto.	72
5.19. Esquemático completo de emulador de descarga de batería de litio-ion	74
6.1. Descargas de baterías a 0,25C a)Estado de carga b)Corriente de batería c)Voltaje de batería.	76
6.2. Voltajes de descargas de baterías a 0.25C.	77
6.3. Capacidad de corriente entregada por el simulador de emulación de descarga con a)EPDT y b)EIS.	77
6.4. Descarga a distintos pulsos de corriente a)SOC b)pulsos de corriente c) voltajes de baterías	78
6.5. Voltaje de batería a) t=72s b) t=25s.	79
6.6. Niveles de rizado de señales de voltaje en t=51s.	79
6.7. Capacidad de corriente de descarga entregada por: a)batería real b)emulador con EPDT c)emulador con EIS.	80
6.8. Descarga a pulsos de corriente incrementales a)SOC b)corriente c)voltajes de batería.	81
6.9. Capacidad de corriente de descarga entregada por: a)batería real b)emulador con EIS c)emulador con EPDT.	82
6.10. Voltaje de batería en t=58s	82
6.11. Niveles de rizado de señales de voltaje en t=24s	83
6.12. Distribución de la corriente promedio de entrada por cada una de las fases, a)corriente total de inductor, b)corriente fase 1, c)corriente fase 2, d)corriente fase 3	83