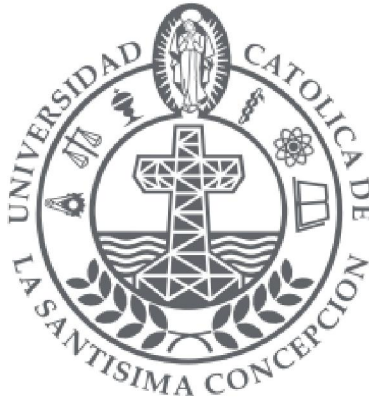


UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE Y ENERGÍA



UCSC

Balance de SOCs de baterías por medio del MMSPC con
transferencia de energía del tipo inductor conmutado.

Nicolas Ignacio Rebolledo Ruiz

Informe de Habilitación Profesional para optar al título de:
Ingeniero Civil Eléctrico

Profesor Patrocinante:
Dr. Ricardo A. Lizana F.

Profesores Guía:
Dr. Eduardo A. Espinosa N.
MSc. Ricardo I. León. C.

Concepción, Octubre de 2019

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION
Facultad de Ingeniería
Departamento de Medio Ambiente y Energía

Profesor Patrocinante:
Dr. Ricardo A. Lizana F.

Balance de SOCs de baterías por medio del MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado.

Nicolas Ignacio Rebolledo Ruiz

Informe de Habilitación Profesional
para optar al Título de

Ingeniero Civil Eléctrico

Octubre de 2019

Resumen

Los convertidores multinivel de fuente de voltaje son una alternativa atractiva para aplicaciones de media tensión, ya que se caracterizan por suministrar una tensión y corriente de salida con una baja distorsión armónica, un bajo dv/dt y un bajo voltaje de modo común. Dentro de los convertidores multinivel existe la familia de los convertidores modulares, los cuales añaden la característica de modularidad a su sistema, esta familia se ha consolidado como una opción competitiva para aplicaciones de media y alta tensión.

Dentro de la familia de los convertidores modulares existe el convertidor modular multinivel serie/paralelo con transferencia de energía del tipo inductor conmutado, el cual presenta una serie de ventajas en comparación a las distintas topologías de convertidores multinivel como:

- i- La capacidad de emular la conexión en paralelo entre los módulos mediante etapas DC – DC.
- ii- Voltaje de salida de naturaleza alterna con un número de niveles controlable y variable.
- iii- Voltaje de salida de naturaleza continua con polaridad positiva o negativa
- iv- Emular la operación de una batería mediante un condensador

Gracias a estas características mencionadas, esta topología presenta un óptimo funcionamiento para aplicaciones de electro movilidad y sistemas de almacenamiento de energía en baterías. Con la finalidad añadirle mayores ventajas a dicho convertidor, en el presente trabajo se le agrega la capacidad de obtener un balance activo del estado de carga de las baterías, con esto se obtiene una transferencia de energía entre las baterías y se promueve una descarga simétrica entre ellas.

El desarrollo natural del proyecto comprende el análisis de distintas tecnologías de baterías, topologías de convertidores DC – DC, el estudio del convertidor propuesto y la estimación del estado de carga de la batería mediante un método contable llamado contador de Coulomb. Todo esto con el fin de obtener un balance intrínseco del SOC de las baterías.

A los alumnos del pasado, presente y futuro de la carrera de Ingeniería Civil Eléctrica de la U.C.S.C.

Agradecimientos

Primero que todo quiero agradecer a mis padres, por el apoyo, comprensión y amor brindado en el transcurso de mi etapa universitaria, sin duda han sido el pilar fundamental para llevar a cabo este trabajo, gracias por el ejemplo de superación que veo día a día en ustedes y por sus ganas y compromiso de mantener una familia unida y de respeto junto a mis hermanos, Roxana, Francisco y Daniel.

Agradecer a Constanza, quien ha sido mi compañera durante toda esta etapa de estudio universitario, gracias por el apoyo y amor que me brindas día a día.

Quiero agradecer al profesor Ricardo Lizana por darme la oportunidad de trabajar junto a su lado, ha sido un muy buen guía, su apoyo siempre ha estado presente y es un buen ejemplo de vocación y amor por lo que hace. Adicionalmente, deseo agradecer al profesor Eduardo Espinosa y Ricardo por el tiempo brindado en los comentarios y correcciones, ya que cuales fueron fundamentales para presentar este informe.

Finalmente, agradezco a los amigos que conforme en este largo proceso, de manera especial agradezco a Cristian por su amistad incondicional durante todos estos años, al igual que mis amigos Luis R., Juan., Luis A., Hans, Eduardo, Eric, José, Hugo M. con quienes compartimos interminables días y noches de estudio. Por último, agradezco a Claudio, Sebastián, Hugo, Diego, Francisco y Mauricio por los momentos agradables y muchas conversaciones de fútbol que compartimos.

Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS	IX
LISTA DE FIGURAS	X
NOMENCLATURA	XI
ABREVIACIONES	XIII
CAPÍTULO 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	14
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL	14
1.2. TRABAJOS PREVIOS	16
1.2.1 <i>Tecnología de baterías.</i>	16
1.2.2 <i>Convertidor DC – DC.</i>	17
1.2.3 <i>MMSPC con transferencia del tipo inductor conmutado.</i>	19
1.2.4 <i>SOC de la batería.</i>	21
1.2.5 <i>Discusión</i>	22
1.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO	23
1.4. OBJETIVOS	23
1.4.1 <i>Objetivo General</i>	23
1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i>	23
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES	24
1.6. TEMARIO Y METODOLOGÍA	24
CAPÍTULO 2. TECNOLOGÍAS DE BATERÍAS	26
2.1. INTRODUCCIÓN	26
2.2. BATERÍA DE PLOMO – ACIDO	27
2.3. BATERÍA DE NÍQUEL – CADMIO (NiCd)	27
2.4. BATERÍA DE SODIO – AZUFRE	28
2.5. BATERÍA DE ION – LITIO	28
2.6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	29
CAPÍTULO 3. TOPOLOGÍA DEL MMSPC CON TRANSFERENCIA DE ENERGÍA DEL TIPO INDUCTOR CONMUTADO	31
3.1. INTRODUCCIÓN	31
3.2. TOPOLOGÍA	31
3.3. SISTEMA ALTERNO	33
3.4. SISTEMA CONTINUO	36
3.4.1 <i>Convertidor DC – DC reductor</i>	37
3.4.2 <i>Convertidor DC – DC elevador</i>	45
3.4.3 <i>Convertidor DC – DC reductor – elevador</i>	51
3.5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	56
CAPÍTULO 4. MMSPC CON TRANSFERENCIA DE ENERGÍA DEL TIPO INDUCTOR CONMUTADO	57
4.1. INTRODUCCIÓN	57
4.2. FUNCIONAMIENTO	57
4.3. VOLTAJE DE SALIDA AC CON VARIACIÓN DEL NÚMERO DE NIVELES	59
4.4. VOLTAJE DE SALIDA DC	65
4.5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	66
CAPÍTULO 5. BALANCE DEL SOC	68
5.1. INTRODUCCIÓN	68
5.2. ESTRATEGIA DE BALANCE DEL SOC	69
5.3. VOLTAJE DE SALIDA AC CON VARIACIÓN DEL NUMERO DE NIVELES	75
5.4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	78

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES80

6.1. SUMARIO80

6.2. CONCLUSIONES.....81

6.3. TRABAJO FUTURO.....83

BIBLIOGRAFÍA.....84

Lista de Tablas

Tabla 3.1: Estados de conmutación con una relación de tensión (1:2:1).	34
Tabla 3.2: Parámetros del Sistema AC.....	34
Tabla 3.3: Parámetros del convertidor DC - DC	43
Tabla 5.1: Estados de conmutación para el balance del SOC, con una relación de tensión 1:2:1	71
Tabla 5.2: Parámetros del Sistema.	73

Lista de Figuras

Figura 3.1: Topología del MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado. [5].	32
Figura 3.2: Sistema AC del convertidor MMSPC.....	33
Figura 3.3: Formas de onda del MMSPC y baterías	35
Figura 3.4: Circuito del convertidor DC - DC reductor	37
Figura 3.5: Circuito equivalente del convertidor DC – DC reductor con el semiconductor cerrado.	38
Figura 3.6: Circuito equivalente del convertidor DC – DC reductor con el semiconductor abierto..	40
Figura 3.7: Formas de onda del convertidor DC – DC reductor	43
Figura 3.8: Formas de onda del convertidor DC – DC reductor	44
Figura 3.9: Circuito del convertidor DC - DC elevador.....	46
Figura 3.10: Circuito equivalente del convertidor DC – DC elevador con el semiconductor cerrado.	46
Figura 3.11: Circuito equivalente del convertidor DC – DC elevador con el semiconductor abierto.	47
Figura 3.12: Formas de onda del convertidor DC – DC elevador, D igual a 0.5.....	50
Figura 3.13: Circuito del convertidor reductor - elevador.	52
Figura 3.14: Circuito equivalente del convertidor DC – DC reductor - elevador con el semiconductor cerrado.....	52
Figura 3.15: Circuito equivalente del convertidor DC – DC reductor - elevador con el semiconductor abierto.....	53
Figura 3.16: Formas de onda del convertidor DC – DC reductor – elevador.	55
Figura 4.1: Estados de conmutación para la topología del MMSPC con transferencia de energía tipo inductor conmutado con relación de tensión 1:2:1. (a) Nivel de tensión de salida igual a $2V_b$; (b) Nivel de tensión de salida igual a $-2V_b$	58
Figura 4.2: Resultados de la simulación con un ciclo de trabajo D igual a 0. (a) Tensiones DC. (b) Voltaje y corriente de salida.....	61
Figura 4.3: Resultados de la simulación con un ciclo de trabajo D igual a 0.5. (a) Tensiones DC. (b) Señales de salida.....	62
Figura 4.4: Resultados de la simulación con un ciclo de trabajo D variable (a) Tensiones DC. (b) Voltaje y corriente con D igual a 0. (c) Voltaje y corriente con D igual a 0.5.....	63
Figura 4.5: Espectro de Frecuencia (a) Voltaje AC con siete niveles. (b) Voltaje AC con nueve niveles.....	64
Figura 4.6: Resultados de simulación con una salida de naturaleza continua. (a) Tensiones DC. (b) Señales de salida. (c) Perfiles de corriente.....	66
Figura 5.1: Estados de conmutación para la topología del MMSPC con transferencia de energía tipo inductor conmutado con transferencia de energía de la batería 1 a la batería 2 (a) Nivel de tensión de salida igual a $-V_b$; (b) Nivel de tensión de salida igual a $0[V]$; (c) Nivel de tensión de salida igual a V_b	70
Figura 5.2: Diagrama de bloques de la relación del SOC	72
Figura 5.3: SOC de las baterías.....	73
Figura 5.4: Delta del SOC de las baterías	74
Figura 5.5: Error en la estimación del SOC	75
Figura 5.6: Resultados de la simulación (a) Señales de salida AC; (b) Tensiones DC.....	76
Figura 5.7: Resultados del balance del SOC (a) SOC de las baterías; (b) Delta del SOC de las baterías.	77

Nomenclatura

Escalares

ΔI_L	: Variación de la corriente del inductor.
Δt	: Variación del tiempo.
$\Delta V_o/V_o$: Rizado de la tensión de carga.
B_1	: Batería 1.
B_2	: Batería 2.
C	: Capacitancia.
D	: Ciclo de trabajo.
f	: Frecuencia de conmutación de las etapas DC.
f_o	: Frecuencia de salida.
I_b	: Corriente de la batería.
I_L	: Corriente del inductor.
I_o	: Corriente de salida.
I_S	: Corriente suministrada por la fuente.
L	: Inductancia.
L_{min}	: Inductancia mínima.
P_C	: Potencia de descarga del condensador.
P_o	: Potencia absorbida por la carga.
P_S	: Potencia suministrada por la fuente.
R_{load}	: Resistencia de carga.
s	: Segundos.
T	: Periodo del convertidor DC – DC.
t	: Tiempo.
t_{off}	: Tiempo apagado.
t_{on}	: Tiempo encendido.
V_C	: Voltaje del condensador.
V_{b1}	: Voltaje de la batería 1.
V_{b2}	: Voltaje de la batería 2.
V_L	: Voltaje del inductor.

V_o	: Voltaje de salida.
V_R	: Voltaje en la resistencia de carga.
V_S	: Voltaje suministrado por la fuente.
$SOC(t)$: Estado de carga final.
SOC_0	: Estado de carga inicial.
I_{bat}	: Corriente de la batería.
$\Delta Q_{nominal}$: Capacidad nominal de la batería.
ΔT	: Variación del tiempo.

Abreviaciones

Mayúsculas

AC	: Alternating Current (Corriente Continua).
BESS	: Battery Energy Storage System (Sistema de Almacenamiento de Energía en Batería)
BMS	: Battery Management System (Sistema de Gestión de la Batería).
CHB	: Cascade H – Bridge (Puente H en Cascada).
DC	: Direct Current (Corriente Continua).
ESS	: Energy Storage System (Sistema de Almacenamiento de Energía)
IEEE	: Institute of Electrical and Electronic Engineering (Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica).
HVDC	: High Voltage Direct Current (Alto Voltaje en Corriente Continua).
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor (Transistor Bipolar de Puerta Aislada).
MMC	: Modular Multilevel Converter (Convertidor Modular Multinivel).
MMSPC	: Modular Multilevel Series Parallel Converter.
NiCd	: Níquel – Cadmio.
No	: Número.
PWM	: Pulse – Width Modulation (Modulación por ancho de pulso).
SOC	: State of charge (Estado de Carga).

Capítulo 1. Revisión Bibliográfica

1.1. Introducción General

Actualmente, los convertidores de energía eléctrica han tomado un rol fundamental dentro de los procesos industriales, estos equipos están basados en la electrónica de potencia, la cual centra su estudio en los dispositivos y métodos electrónicos para transformar y utilizar la energía eléctrica de modo que se pueda operar y controlar sistemas con altos requerimientos de tensión y corriente [1]. Los convertidores de energía eléctrica son capaces de transformar la energía eléctrica de AC – AC, AC – DC, DC – AC o DC – DC, con el fin de regular la energía suministrada a la carga y tener un consumo eficiente.

En el presente informe, se realizará el estudio de dos tipos de conversión de energía, las cuales son la conversión DC – DC, y DC – AC. Los convertidores DC – DC convierten un nivel tensión continua en otro nivel de tensión continua de igual o distinta polaridad, dependiendo de la topología. Los convertidores DC – AC típicamente llamados inversores, convierten una tensión de naturaleza continua a una tensión de naturaleza alterna, controlando su amplitud, fase y frecuencia, con el fin de transferir energía desde una fuente de potencia continua a una carga de naturaleza alterna [2], [3]. Los inversores se clasifican en inversores convencionales (dos niveles de tensión por fase) los cuales se compone por un puente trifásico controlado y los inversores multinivel (más de dos niveles de tensión por fase). Los inversores multinivel, construyen una tensión alterna a partir de diferentes niveles de tensión continua y brindan una serie de ventajas en comparación a los convertidores convencionales, las cuales son [4]:

- La forma de onda de tensión y corriente obtenida a la salida del inversor es de mejor calidad, lo que trae como resultado una reducción de la distorsión armónica total (THD).
- Operación a baja frecuencia de conmutación.

- Bajo dv/dt , ya que la diferencia de tensión entre los niveles de la tensión de salida se reduce.
- A mayor número de niveles es menor el esfuerzo de los semiconductores de potencia y se reduce significativamente el tamaño de los filtros.
- Bajo voltaje de modo común, este voltaje es producido por los convertidores basados en semiconductores, donde la conmutación genera voltajes de secuencia cero.

Por otra parte, la desventaja que presentan los inversores multinivel es que, a mayor número de niveles en la tensión de salida, mayor será el número de semiconductores, lo que arroja como consecuencia, un elevado costo de construcción del convertidor y un aumento en las pérdidas por conmutación.

La topología del convertidor multinivel a estudiar se le denomina, MMSPC (Modular Multilevel Series Parallel Converter) con transferencia de energía del tipo inductor conmutado [5]. Este convertidor está compuesto por tres módulos, en donde, los módulos de los extremos están compuestos por dos baterías y seis semiconductores de potencia, el módulo central se compone de un condensador y ocho semiconductores de potencia. Adicionalmente, contiene dos inductores, los cuales, permiten la transferencia de energía entre los módulos.

Este convertidor, tiene la capacidad de emular la paralelización entre los módulos, aunque sean de distinto nivel de tensión, para esto, se debe cumplir la condición de corriente permanente en el inductor de las etapas DC – DC [3]. Gracias a esto, presenta ventajas significativas en cuanto al costo de construcción, debido a que, el condensador situado en el módulo central puede ser cargado a un nivel de tensión arbitrario y así emula el funcionamiento de una batería, con el fin de obtener una tensión de salida con un número de niveles deseado, de esta forma, el condensador emula el comportamiento de una batería. Adicionalmente, el MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado es capaz de obtener una tensión de salida alterna con un número de niveles variables o una tensión de naturaleza continua, la cual puede ser de polaridad positiva o negativa. Lo cual le da un gran potencial para aplicaciones como sistemas de almacenamiento de energía en baterías (BESS) y electro movilidad.

Por último, gracias a las etapas DC – DC insertas en la topología del MMSPC propuesto y el control de los estados de conmutación, se puede realizar una transferencia de energía entre los módulos de forma eficiente y controlada, aunque estos tengan diferencias de tensión no despreciables. El objetivo de la transferencia de energía entre los módulos es operar el convertidor con un balance activo del estado de carga, en donde la batería más cargada le transfiere energía a la batería menos cargada, con esto, se logra aumentar considerablemente la vida útil de las baterías.

1.2. Trabajos Previos

Para llevar a cabo los resultados obtenidos en este trabajo, se debe realizar una revisión bibliográfica que contemple distintos documentos de tecnologías de baterías, convertidores DC – DC, estudio del MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado y métodos de obtención del SOC de las baterías. Esta bibliografía ha sido obtenida del sitio oficial de *IEEE Xplore*, libros clásicos de electrónica de potencia y proyectos de título. A continuación, se detalla la bibliografía utilizada para cumplir con los objetivos estipulados.

1.2.1 Tecnología de baterías.

- ♣ J. Haase *et al.*, "Analysis of batteries in the built environment an overview on types and applications," *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Beijing, 2017.

Mediante esta publicación, se puede tener un mayor conocimiento sobre distintos tipos de tecnologías de baterías. Adicionalmente, este documento presenta diferencias entre distintas tecnologías en cuanto a densidad de energía, número de ciclos y aplicaciones, esta información de gran importancia para el análisis que se debe llevar a cabo.

- ♣ Aoxia Chen and P. K. Sen, "Advancement in battery technology: A state-of-the-art review," *2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Portland, OR, 2016.

En esta publicación, se presentan cuatro tecnologías de baterías, las cuales son: Plomo – Acido, Níquel, Ion – Litio y flujo redox. Se propone un análisis que conlleva datos como la longevidad, seguridad, densidad de energía y voltaje por celda, todo esto, con el fin de seleccionar la mejor tecnología para ser utilizada en un sistema de almacenamiento de energía en baterías (BESS).

- ♣ N. Chatrung, "Battery Energy Storage System (BESS) and Development of Grid Scale BESS in EGAT," *2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia)*, Bangkok, Thailand, 2019.

En este documento, se puede obtener información importante de distintas tecnologías de baterías, como la degradación y la seguridad de la batería, además de datos relevantes la batería de Ion – Litio, Sodio – Azufre y la batería de flujo. La finalidad de esta publicación es presentar un piloto del BESS de EGAT, Tailandia.

1.2.2 Convertidor DC – DC.

- ♣ W. Hart Daniel, “Electrónica de Potencia”, capítulo 6, 1997.

Texto introductorio en el estudio de la electrónica de potencia, en este documento se presentan distintas topologías de convertidores DC – DC conmutados por ancho de pulso en donde se realiza el diseño de dichos convertidores y el análisis de corriente permanente en el inductor, lo cual es de vital importancia para los objetivos de este trabajo.

- ♣ Muhammad H. Rashid. “Electrónica de Potencia, Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones”, capítulo 6. México. 3° Edición. Prentice Hall, 2004.

Texto de estudio para la ingeniería eléctrica y electrónica, este documento es introductorio para el estudio de la electrónica de potencia, en el se estudian distintas topologías de convertidores DC – DC y detallan su operación, la cual es una base fundamental para poder comprender el funcionamiento del MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado.

- ♣ Hernán Valencia Gallón, “Fundamentos de la electrónica industrial”, 2013.

El presente texto, fue un apoyo para comprender algunos aspectos introductorios de la electrónica de potencia aplicada en la industria. En este documento se presentan distintas topologías de inversores, tales como el inversor monofásico, trifásico y una introducción del inversor multinivel.

- ♣ A. Ghosh and S. S. Saran, "High gain DC-DC step-up converter with multilevel output voltage," *2018 International Symposium on Devices, Circuits and Systems (ISDCS)*, Howrah, 2018

En este documento, se propone un convertidor DC – DC elevador para aplicaciones de micro – redes, este convertidor tiene la ventaja de tener una alta ganancia de voltaje de salida, lo cual sirve para mitigar problemas como la interferencia electromagnética que poseen algunos convertidores. Mediante esta publicación se logra conocer distintas topologías de los convertidores DC – DC.

- ♣ M. S. Bhaskar Ranjana, N. S. Reddy and R. K. Pavan Kumar, "Non-isolated dual output hybrid DC-DC multilevel converter for photovoltaic applications," *2014 2nd International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS)*, Combiatore, 2014.

En esta publicación, se tiene un convertidor DC – DC de doble salida no aislada, para aplicaciones de plantas fotovoltaicas. Este convertidor es adecuado utilizarlo en aplicaciones donde se necesitan dos voltajes con polaridad opuesta al mismo tiempo. Esta topología es la combinación de dos convertidores DC – DC elevadores, los cuales son, el convertidor elevador multinivel, el cual proporciona un voltaje de salida de positiva y el convertidor cuk multinivel, que proporciona un voltaje de salida de polaridad negativa.

1.2.3 MMSPC con transferencia del tipo inductor conmutado.

- ♣ R. Lizana, S. Rivera, Z. Li, J. Luo, A. V. Peterchev and S. Goetz, "Modular Multilevel Series/Parallel Converter with Switched-Inductor Energy Transfer Between Modules", 2018.

Esta publicación, es la piedra angular de esta investigación, ya que presenta al MMSPC con transferencia de potencia del tipo inductor conmutado, en este documento se detalla la topología del convertidor, su operación y el control para obtener una tensión de salida en corriente alterna o corriente continua, además presenta resultados experimentales los cuales validan el estudio realizado.

- ♣ A. Dekka, B. Wu, R. Lizana and N. R. Zargari, "A comparison of voltage balancing versus energy balancing approach for modular multilevel converters," *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, 2016.

Esta publicación, presenta al convertidor modular multinivel (MMC) como una topología prometedora para sistemas de transmisión en HVDC, se estudia su estructura, operación, aplicación, entre otros tópicos. Esta revisión bibliográfica será de gran apoyo para el estudio del MMSPC, ya que esta topología es una extensión del MMC y la gran diferencia entre ambas topologías, es que el MMC solo permite la conexión en serie entre sus módulos y el MMSPC permite la conexión en serie y paralelo de sus módulos.

- ♣ M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Rodriguez and M. A. Perez, "A Survey on Cascaded Multilevel Inverters," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 7, pp. 2197-2206, July 2010.

Esta publicación tiene una gran importancia en el desarrollo de este trabajo, ya que se presenta la topología, resultados de simulación y el espectro de frecuencia de un convertidor puente H en cascada (CHB) simétrico y asimétrico/híbrido, lo cual es fundamental para comprender el sistema alterno del MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado, ya que en dicho análisis el convertidor opera como un convertidor puente H en cascada.

- ♣ A. Prayag and S. Bodkhe, "A comparative analysis of classical three phase multilevel (five level) inverter topologies," *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, Delhi, 2016.

Este documento, tiene la finalidad de suministrar información sobre distintas topologías de convertidores multinivel, se realiza un análisis de un NPC (Neutral Point Clamped), FC (flying capacitor) y un CHB. Mediante este documento, se puede comentar en base a los convertidores multinivel, además, se analiza un CHB de cinco niveles y se obtiene un THD de 17.1%, por lo tanto, gracias a esta publicación y a los resultados obtenidos en este trabajo se puede confirmar que a mayor número de módulos se obtiene una mejor calidad en la señal de voltaje de salida alterno en cuanto a distorsión armónica.

- ♣ S. M. Goetz, Z. Li, X. Liang, C. Zhang, S. M. Lukic and A. V. Peterchev, "Control of Modular Multilevel Converter With Parallel Connectivity—Application to Battery Systems," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 11, pp. 8381-8392, Nov. 2017.

En esta publicación, se describe una aplicación del MMSPC en un sistema de almacenamiento de energía que incorpora baterías en los módulos, se tiene que la alternancia de las baterías entre la conexión en serie y paralelo permite un sencillo equilibrio de la tensión de las celdas sin la necesidad de utilizar sensores.

- ♣ Mauricio González, "Estudio de un Inversor Multinivel monofásico basado en inversores puente completo conectados en cascada para la realización de un compensador sincrónico estático (STATCOM)", *Habilitación Profesional, Ingeniero Civil Electrónico*, 2006, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

En este documento, se presenta un convertidor multinivel monofásico para aplicaciones de un compensador sincrónico estático. En el desarrollo de este trabajo se presenta una serie de ventajas y desventajas de los convertidores multinivel, además de distintas topologías, tales como el convertidor NPC, FC y el CHB.

1.2.4 SOC de la batería.

- ♣ Ines Baccouche, Sabeur Jemmali, Asma Mlayah, Bilal Manai, Najoua Essoukri Ben Amara, “Implementation of an Improved Coulomb-Counting Algorithm Based on a Piecewise SOC-OCV Relationship for SOC Estimation of Li-Ion Battery”, 2017 International Journal of Renewable Energy Research, 2017.

Esta publicación presenta el método clásico de la estimación del estado de carga mediante el método contable del contador de Coulomb en donde se propone una mejora a la estimación debido a los errores acumulativos que provoca la estimación del SOC inicial. Este documento fue de gran ayuda para lograr el objetivo general de este trabajo, ya que explica detalladamente el método de contador de Coulomb, el cual se implementó en el MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado.

- ♣ A. Nugroho, E. Rijanto, F. D. Wijaya and P. Nugroho, "Battery state of charge estimation by using a combination of Coulomb Counting and dynamic model with adjusted gain," *2015 International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA)*, Bandung, 2015, pp. 54-58.

Debido a que la estimación del SOC mediante el método de contador de Coulomb depende del conocimiento previo del SOC inicial, de realizar una fallida estimación del SOC inicial se puede generar una identificación errónea de las condiciones de sobrecarga y sobre descarga de la batería. Bajo estas condiciones, en este documento, se propone una estimación del SOC basada en el Contador de Coulomb y en el método basado en modelos. De acuerdo con los resultados obtenidos, se tiene que el algoritmo propuesto funciona mejor que el método de Contador de Coulomb.

- ♣ I. Baccouche, A. Mlayah, S. Jemmali, B. Manai and N. Essoukri Ben Amara, "Implementation of a Coulomb counting algorithm for SOC estimation of Li-Ion battery for multimedia applications," *2015 IEEE 12th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD15)*, Mahdia, 2015, pp. 1-6.

En esta publicación se presenta la estimación del SOC de la batería de Ion – Litio para aplicaciones multimedia, este desarrollo se obtiene mediante el método de contador de Coulomb el

cual se incorpora en una plataforma. El método propuesto tiende a superar las limitaciones del método clásico (utilizado en este trabajo), los cuales son, errores acumulativos, el envejecimiento y los efectos de la temperatura en la precisión de la estimación.

- ♣ Y. Xu and T. Zhang, "A Hierarchical Structure Approach of Battery Balancing Based on SOC," *2018 Chinese Automation Congress (CAC)*, Xi'an, China, 2018, pp. 1217-1222.

En esta publicación, se propone un método de equilibrio de baterías basado en la combinación del equilibrio pasivo y equilibrio activo del estado de carga. El método de equilibrio propuesto es comprobado mediante simulación en la herramienta Simulink del software Matlab. Con los resultados obtenidos, se puede concluir que el balance en el SOC de las baterías puede reducir eficientemente el costo de producción de energía y aumentar la vida útil de las baterías.

- ♣ X. Yang, H. Jiang and Z. Deng, "Design of a Battery Management System based on matrix switching network," *2015 IEEE International Conference on Information and Automation*, Lijiang, 2015, pp. 138-141.

Este documento, propone un sistema de gestión de baterías con una arquitectura flexible y energéticamente eficiente para baterías de Polímero de Litio de múltiples celdas, conectadas en serie y paralelo. El objetivo del sistema de gestión de baterías propuesto es mejorar la confiabilidad de la batería y la eficiencia en el equilibrio del SOC. Las principales ventajas de la arquitectura propuesta es la capacidad de equilibrar dinámicamente las celdas de la batería durante los periodos de carga y descarga.

1.2.5 Discusión

A partir de la revisión bibliográfica de los convertidores DC – DC, se establece la condición de la corriente permanente en el inductor, lo que limita a que se le debe realizar este análisis a los componentes que conforman el MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado.

De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada sobre el MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado, en [5] se presenta dicho convertidor y se realiza el estudio de operación, se detalla la manera de obtener un voltaje alterno con número de niveles variables y un voltaje continuo con polaridad positiva o negativa, adicionalmente, se propone que a dicho convertidor se le puede agregar la característica de un balance del SOC de las baterías.

En el desarrollo de este trabajo, se llevará a cabo el estudio del MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado y se le añadirá la característica del balance del SOC de las baterías, este balance del SOC se realizará mediante un equilibrio activo, por lo tanto, las baterías compartirán energía entre ellas.

1.3. Hipótesis de Trabajo

Es posible la transferencia de energía de manera controlada entre los módulos del MMSPC, que permitirá el balance activo del SOC de baterías independientes, con esto logrará una descarga y condición de trabajo simétrica entre ellas.

1.4. Objetivos

El objetivo principal del trabajo a realizar en la presente investigación consiste en proponer y simular un sistema de control para el balance de SOC de baterías por medio del MMSPC con transferencia de energía tipo inductor conmutado.

1.4.1 Objetivo General

Balance de SOC de baterías por medio del MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Comprender y analizar el estado del arte de las distintas tecnologías de baterías y formas de medir el estado de carga SOC.
- Modelamiento energético del MMSPC.

- Estudiar diferentes tipos de convertidores DC – DC, en específico los de Boost/Buck.
- Funcionamiento del convertidor MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado.
- Implementación en simulación de estrategia de balance de los SOCs de las baterías conectadas al MMSPC.

1.5. Alcances y Limitaciones

Para llevar a cabo el objetivo general de este trabajo, se debe considerar que el análisis realizado sobre el MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado presenta los siguientes alcances.

- i- Se utilizan baterías de Ion – Litio.
- ii- Se realiza el estudio del MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado con tres módulos.
- iii- Se consideran semiconductores de potencia ideales.
- iv- Se le conecta una carga RL a la salida del convertidor.
- v- Los parámetros del convertidor cumplen con la condición de corriente permanente en el inductor.

1.6. Temario y Metodología

Los objetivos de este proyecto de título han sido alcanzados mediante la recopilación de bibliografía de convertidores multinivel, tecnologías de baterías y métodos de estimación del estado de carga de las baterías. Luego, se procederá al estudio de la topología del MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado, en donde se debe realizar un análisis de distintos convertidores DC – DC, los cuales serán simulados en MATLAB utilizando la herramienta Simulink/SimPowerSystem, posterior a este análisis se realizara el estudio del funcionamiento del MMSPC propuesto, para finalmente estudiar el contador de Coulomb, el cual es un método de estimación del estado de carga de las baterías, para así realizar el balance del SOC de las baterías del convertidor.

El desarrollo de este trabajo está organizado de la siguiente manera. En el capítulo dos, se

presentan distintas tecnologías de baterías con el fin de seleccionar la mejor alternativa para la simulación y construcción del convertidor. En el capítulo tres, se realiza el estudio del sistema alterno, el cual está compuesto por un convertidor puente H en cascada y del sistema continuo, en donde se estudian distintos convertidores DC – DC. En el cuarto capítulo, se tiene el funcionamiento del MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado y se realiza la simulación para obtener un voltaje alterno con un número de niveles controlable y variable, y de un voltaje continuo con polaridad positiva o negativa. Por último, en el quinto capítulo se presenta un estimador del estado de carga de la batería mediante el método de contador de Coulomb, para así realizar el balance del SOC de las baterías del convertidor.

Capítulo 2. Tecnologías de baterías

2.1. Introducción

La batería es un dispositivo capaz de almacenar energía electroquímica, se clasifican en dos grandes grupos. Las baterías primarias, son aquellas en que la conversión de energía química a energía eléctrica es irreversible, por lo tanto, cuando la batería se ha descargado completamente no puede volver cargarse. También existen las baterías secundarias, las cuales presentan un proceso de conversión de energía química a eléctrica reversible, por ende, son recargables.

Debido a que en este trabajo se pretende realizar el balance del estado de carga de las baterías del convertidor MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado, se estudiarán distintas tecnologías de baterías secundarias, para esto, se debe considerar que existe una serie de factores importantes, los cuales deben considerarse para la selección de una batería, estos factores son [11]:

- Longevidad.
- Seguridad.
- Densidad de potencia [W/kg].
- Costo [\$].
- Densidad de energía [Wh/kg].
- Capacidad de energía [Ah].
- Voltaje por celda.

Como aspecto a considerar, se tiene que el desarrollo de las plantas generadoras de energía renovable y su continua integración a los sistemas de energía, pueden crear dificultades para equilibrar el sistema eléctrico debido a la incertidumbre de la generación de energía que tienen estas plantas. Una solución para mitigar estos problemas, son los sistemas de almacenamiento de energía en baterías (BESS), ya que es el sistema más rápido en comparación a los otros tipos de almacenamiento de energía (ESS). En estos sistemas, la batería es la parte principal y la selección en la tecnología de la batería es muy importante, debido a la alta relación del costo de la batería con el costo del proyecto.

A continuación, se presentan distintas tecnologías de baterías, en donde se detallan sus principales ventajas, desventajas y aplicaciones.

2.2. Batería de Plomo – Acido

Esta tecnología de batería secundaria es la más antigua y común [10], además es la que presenta el menor costo por [kWh], gracias a esto tiene un notable desempeño en el análisis de desempeño – costo en los proyectos. Dentro de sus principales ventajas se destacan su baja auto descarga y el amplio rango de temperatura de operación [10]. Entre sus parámetros se tiene una densidad de energía que bordea los (30 – 50) [Wh/kg], un voltaje por celda de 2[V] y típicamente es una batería de 12[V] y 40[Ah] [11].

Sus aplicaciones son diversas y es la más común es para el arranque de vehículos de combustión interna, además tienen un fuerte impacto trabajando fuentes de alimentación de respaldo (UPS) y su principal aplicación en este ámbito se presenta en las subestaciones eléctricas [11].

Entre sus desventajas se incluye la baja densidad de energía, una vida útil reducida y un lento tiempo de carga.

2.3. Batería de Níquel – Cadmio (NiCd).

Las baterías de Níquel-Cadmio, son una tecnología madura y muy importante, ya que fue la primera batería recargable en formato pequeño, gracias a esto constituyen un estándar con el que suelen compararse otras tecnologías. Esta tecnología es una opción para radios de dos vías, equipos médicos de energía y herramientas eléctricas.

Las ventajas que constituyen el uso de estas baterías son una carga rápida y sencilla, buen rendimiento de carga, larga vida útil, buen rendimiento a bajas temperaturas, precio económico y disponibilidad en una amplia gama de tamaños y rendimiento [12].

Sus desventajas, son una baja densidad de energía, auto descarga relativamente alta y un maltrato al medioambiente, ya que estas baterías contienen metales tóxicos.

2.4. Batería de Sodio – Azufre

La tecnología de Sodio – Azufre es una batería de sal fundida, está se considera una de las más nuevas y eficientes en el ámbito del almacenamiento de energía. Sus principales ventajas son una alta densidad de energía, lo que permite que su transporte e instalación sean de menor complejidad en comparación a otras tecnologías, también tienen una alta eficiencia y sus ciclos de vida alcanzan los 4500.

Estos tipos de las baterías, gracias a su gran capacidad se emplean ampliamente en todo tipo de aplicaciones. Por otra parte, la principal desventaja de esta tecnología de baterías es su alto costo de inversión, debido a que se debe emplear un sistema de seguridad y un sistema de calentamiento para asegurar un funcionamiento seguro.

2.5. Batería de Ion – Litio

La batería de Ion – Litio es una tecnología que está en un constante crecimiento, esto se debe en gran medida a que el litio es el elemento metálico más ligero y también tiene mayor potencial electroquímico, por lo tanto, es la tecnología que proporciona la mayor cantidad de energía específica por peso, llegando a ofrecer una densidad de energía de tres veces a la batería de Plomo – Acido.

Gracias a su característica de alta densidad de energía [10] – [12], estas baterías han tenido un fuerte impacto en aplicaciones de dispositivos electrónicos portátiles como computadores portátiles, celulares, entre otros, así también han sido un gran aporte en el desarrollo del vehículo eléctrico, debido a que en las aplicaciones de electro movilidad un objetivo es disminuir el peso y volumen de sus dispositivos.

Por otra parte, se destaca que esta tecnología cuenta con un voltaje por celda de 3.6[V], con esto se logra energizar la carga deseada con un menor número de celdas en comparación a otras baterías. Entre otras ventajas, se destaca una baja tasa de auto descarga, no tienen efecto memoria, no necesitan ser descargadas por completo para mantenerse en buenas condiciones y una larga vida

útil. Debido a las ventajas descritas, su uso se ha popularizado en aplicaciones de micro – redes y sistemas de almacenamiento de energía en baterías.

Por el contrario, sus desventajas conllevan una rápida degradación y sensibilidad a altas temperaturas, lo que puede resultar en la destrucción o inflamación de la batería, por lo tanto, requiere de dispositivos adicionales de seguridad.

A continuación, se presenta un grafico en donde se tiene la potencia y energía específica de distintas tecnologías de baterías.

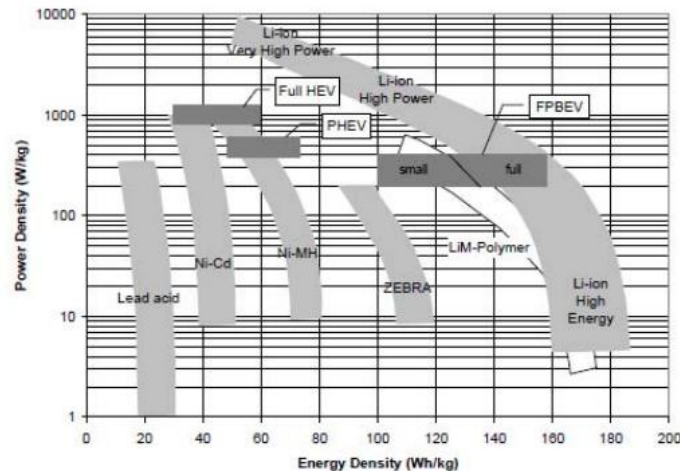


Figura 2.1: Comparación de densidad de potencia y energía de distintas tecnologías de baterías [10].

De acuerdo con el estado del arte realizado en las tecnologías de baterías presentadas y a la Figura 2.1, se tiene que la batería de Ion – Litio es la que posee una mayor potencia y energía específica, estos parámetros son relevantes para aquellas aplicaciones en las que se requiere un bajo peso y volumen.

2.6. Discusión y Conclusiones

Debido a que la batería de Ion – Litio es la que presenta una mayor potencia y energía específica, y de acuerdo con los datos proporcionados, la mejor tecnología de batería que se puede incorporar en la construcción del MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado es la batería de Ion – Litio.

Una de las ventajas del MMSPC propuesto es la capacidad reemplazar una batería por un condensador, lo cual lo hace un convertidor ideal para aplicaciones de electro movilidad. Otra aplicación en donde se aprecia un fuerte potencial, son sistemas de almacenamiento de energía en batería (BESS), ya que el uso del condensador como un batería permite una considerable reducción en el costo de la construcción del convertidor para así realizar la conversión de la energía eléctrica de naturaleza continua a naturaleza alterna.

Como se acaba de mencionar, este estudio apunta en aplicaciones como BEES y electro movilidad, debido a esto, la principal característica que se necesita de una batería es tener una mayor densidad de energía, bajo este contexto en la Figura 2.1 se presenta un gráfico en el que se comparan distintas tecnologías y miden su densidad de potencia y densidad de energía.

Capítulo 3. Topología del MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado

3.1. Introducción

Dentro de la categoría de los convertidores multinivel, el convertidor modular multinivel (MMC) [6] presenta una serie de ventajas, como su operación sin la necesidad de utilizar un transformador, un bus DC común y una estructura completamente modular. Esto permite que su implementación tenga un fuerte impacto en aplicaciones como los sistemas de transmisión de corriente en alto voltaje continuo (HVDC), accionamientos de motores de media tensión y filtros activos. Es por esto, que las extensiones del MMC han llamado fuertemente la atención del mundo académico e industrial, bajo este concepto el MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado aparece como una configuración prometedora [5].

El mayor potencial de la topología propuesta se centra en emular la paralelización entre módulos de distintos niveles de tensión, esto es posible gracias a las etapas DC – DC internas del convertidor, las cuales pueden ser de carácter elevadora o reductora, gracias a ellas se logra la transferencia de energía entre los módulos de manera controlada y eficiente. Con esto, se obtiene una conversión de un voltaje de naturaleza continua a un voltaje de naturaleza alterna multinivel o un voltaje naturaleza continua de polaridad positiva o negativa.

En este capítulo, se llevará a cabo el estudio de la topología del MMSPC propuesto, la cual cuenta con un sistema continuo y uno alterno, que serán estudiados por separado. En el estudio del sistema continuo se analizarán convertidores DC – DC, específicamente, reductor, elevador y reductor – elevador. El análisis del sistema alterno contempla el estudio de un convertidor puente H en cascada compuesto por tres módulos

3.2. Topología

La topología del convertidor propuesto (Figura 3.1), se compone de tres módulos conectados en serie. El módulo del extremo izquierdo está compuesto por una batería de Ion – Litio y cuatro semiconductores (S_{11} , S_{12} , S_{13} y S_{14}), el módulo central se compone de un condensador y cuatro semiconductores (S_{21} , S_{22} , S_{23} y S_{24}) y el módulo del extremo izquierdo está compuesto por una

batería de Ion – Litio y cuatro semiconductores (S_{31} , S_{32} , S_{33} y S_{34}). Adicionalmente, esta topología contiene dos etapas DC – DC, las cuales pueden ser de características elevadoras o reductoras, la etapa DC – DC 1 se compone del inductor L_{s1} y cuatro semiconductores (S_{d1} , S_{d2} , S_{d3} y S_{d4}), mientras que la etapa DC – DC 2 se compone del inductor L_{s2} y cuatro semiconductores (S_{d5} , S_{d6} , S_{d7} y S_{d8}).

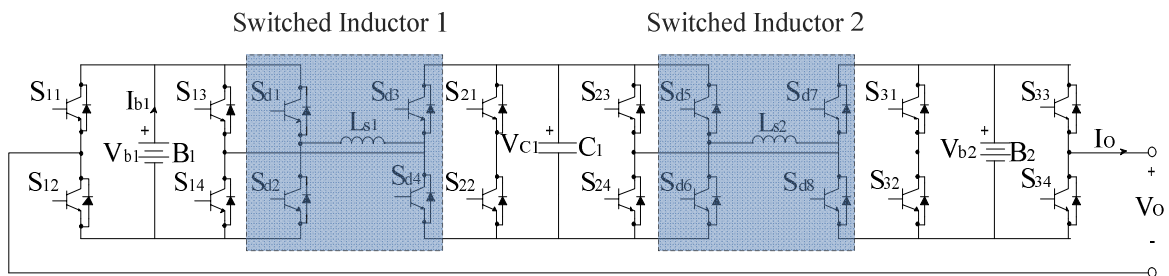


Figura 3.1: Topología del MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado. [5]

Mediante el control de los estados de conmutación, es posible generar un voltaje de salida que puede ser de naturaleza alterna con número de niveles controlable y variable o de naturaleza continua la cual puede ser de polaridad positiva o negativa [5], esto dependiendo de la aplicación que se le desea dar y los estados de conmutación que se le asignan a los semiconductores.

La función de conversión para obtener un voltaje de salida alterno con un número de niveles variables permite la transferencia de energía entre los módulos de manera controlable y eficiente, esto es posible gracias a las etapas DC – DC internas del convertidor, las cuales proporcionan funcionalidades elevadoras y reductoras. Las etapas mencionadas son de vital importancia para comprender el comportamiento de los dos sistemas que se encuentran insertos en la topología del MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado.

Para comprender el sistema alterno se debe realizar el estudio de un CHB, el cual es un convertidor modular, en donde cada módulo está compuesto por un puente H y una batería, la función de este convertidor, es transformar un voltaje de naturaleza continua a uno de naturaleza alterna, controlando su frecuencia y fase [7], [8]. En el sistema continuo, se debe realizar el estudio de convertidores DC – DC elevadores, reductores y elevador – reductor.

3.3. Sistema Alterno

Al realizar el análisis del sistema AC (Figura 3.2), se tiene un CHB compuesto por tres módulos conectados en serie, esta topología permite obtener niveles de tensión positivos y negativos, por lo tanto, en el sistema AC el MMSPC propuesto se comporta como un convertidor multinivel en donde el número de niveles es controlado según la relación de tensión entre las baterías y el condensador ($V_{b1}: V_{b2}: V_{b3}$) y los estados de conmutación.

Para realizar este análisis, se reemplaza el condensador situado en el módulo central por una batería con un nivel de tensión igual a V_{b2} , ya que el condensador se mantiene cargado mediante las etapas DC – DC.

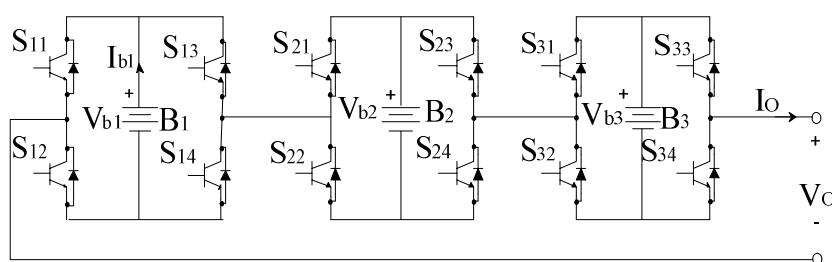


Figura 3.2: Sistema AC del convertidor MMSPC

El sistema propuesto en la Figura 3.2 es capaz de generar un voltaje de salida con un número de niveles deseado, el cual depende de la relación de tensión de las baterías ($V_{b1}: V_{b2}: V_{b3}$), si $V_{b1} = V_{b2} = V_{b3}$, se obtiene un voltaje de salida de siete niveles. Sin embargo, las etapas DC – DC pueden mantener el voltaje del condensador cargado a un nivel deseado, de este modo, si el voltaje del condensador se mantiene al doble del voltaje de las baterías se obtiene una relación de tensión de (1:2:1). Mediante esta relación de tensión, el convertidor es capaz de generar un voltaje salida con nueve niveles. En la Tabla 3.1 se describen los estados de conmutación para lograr un voltaje de salida de nueve niveles.

Tabla 3.1: Estados de conmutación con una relación de tensión (1:2:1).

Nivel	Señales de Conmutación											
L	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{21}	S_{22}	S_{23}	S_{24}	S_{31}	S_{32}	S_{33}	S_{34}
4	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
3	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0
2	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0
0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
-1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
-2	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1
-3	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1
-4	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1

Para obtener una salida con los niveles $L = -1, 0$ y 1 , existe más de una alternativa de configuración en los estados de conmutación y no solo la propuesta en la Tabla 3.1. Estos niveles reciben en nombre de estados redundantes. Por ejemplo, con $L = 0$, el voltaje a la salida del convertidor es 0 [V], al analizar la topología del MMSPC (Figura 3.1) y de acuerdo con lo descrito en la TABLA 3.1, este nivel de tensión se obtiene cuando todos los semiconductores de potencia de la parte inferior de los puentes H están encendidos, pero también se puede obtener el mismo nivel cuando todos los semiconductores superiores están encendidos. Considerando las señales de conmutación descritas en la TABLA 3.1, se presentan los resultados del sistema AC. Los parámetros del sistema se encuentran tabulados en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Parámetros del Sistema AC

Parámetro	Valor
V_{b1}	12.5 V
V_{b2}	25 V
V_{b3}	12.5 V
R_{load}	5.1 Ω
L	115 μ H
frecuencia	50 Hz

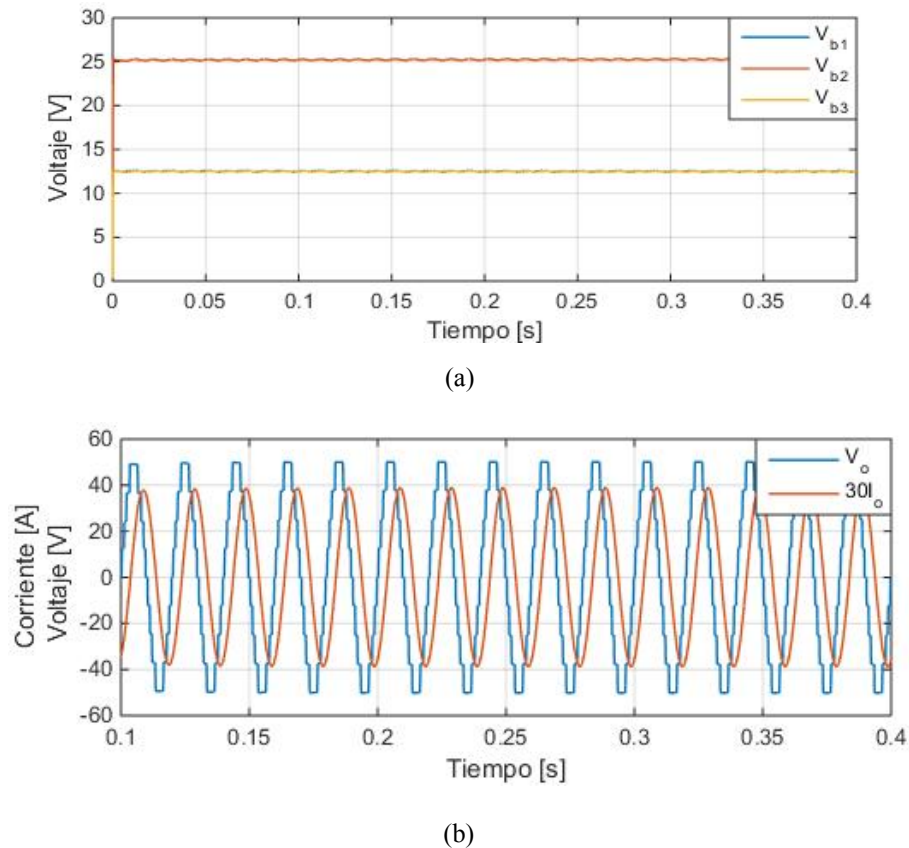


Figura 3.3: Formas de onda del MMSPC y baterías
(a) Voltajes de las baterías; (b) Voltaje y corriente en la salida

Como se mencionó anteriormente, el sistema AC está compuesto por tres puentes H en cascadas. En la Figura 3.3 (a) se presentan las tensiones de las baterías insertas dentro del convertidor, se tiene que la tensión de la batería situada en el módulo central es el doble de la tensión de las baterías situadas en los módulos de los extremos.

Se logra apreciar en la Figura 3.3 (b) que el voltaje de salida generado por el convertidor presenta niveles positivos y negativos, esto es posible gracias a que la configuración de los módulos es de puente H, en caso de tener módulos con una configuración de medio puente solo se podría obtener niveles de tensión positivos.

Al analizar la corriente en la carga (Figura 3.3 (b)), se tiene que la inductancia situada en la carga RL actúa como un filtro pasa bajo, con esto se logra obtener una corriente con una distorsión armónica de 0.68%, en comparación al voltaje de salida (9.32%). En caso de tener una carga puramente resistiva, la forma de onda de la corriente sería similar a la forma de onda de voltaje.

3.4. Sistema Continuo

El sistema DC ha sido añadido al convertidor con la finalidad de mejorar la capacidad de equilibrio, este concepto se basa en utilizar los módulos que no son conectados en serie para estabilizar y regular el nivel de tensión del convertidor. La inclusión de baterías en las interconexiones del MMSPC amplía la flexibilidad del convertidor, ya que presentan una interfaz bidireccional a la cual se le pueden brindar varias aplicaciones [11], [12].

El sistema DC toma gran importancia, ya que es el encargado de mantener constante la relación de tensión entre los módulos, con el fin obtener el número de niveles deseado en la salida. Para lograr un óptimo control sobre la tensión de salida se debe mantener cargado el condensador, debido a que si este se descarga provoca distorsiones en la señal de salida. Si se logra mantener el condensador cargado al doble del voltaje de las baterías, se puede obtener una salida alterna con nueve niveles.

Por lo tanto, manteniendo un óptimo control de los convertidores DC – DC, se puede controlar la tensión del condensador, esto permite que exista un flujo de energía entre los módulos de forma controlada gracias al condensador.

Las etapas DC – DC propuestas, se componen de convertidores de conmutación que utilizan semiconductores de potencia, los cuales son controlados en los estados de encendido y apagado. Estos convertidores se pueden dividir principalmente en dos tipos: convertidores modulados por ancho de pulso (PWM) y convertidores resonantes de conmutación suave, en este estudio se analizarán las topologías de los convertidores DC – DC modulados por ancho de pulso. A continuación, se presentan las condiciones de trabajo de los convertidores DC – DC modulados por ancho de pulso.

Para realizar un análisis sobre un convertidor DC – DC modulado por ancho de pulso se debe tener las siguientes consideraciones:

- El convertidor opera en régimen permanente.
- La corriente en el inductor es permanente.

- El periodo de conmutación es T y D es el ciclo de trabajo; el semiconductor estará cerrado en DT y estará abierto en $(1-D)T$.

En los convertidores DC – DC conmutados por ancho de pulso, el semiconductor está siendo operado con una relación de trabajo D , definida como la relación del tiempo encendido y la suma de tiempo encendido y apagado (relación 3.1)

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} \quad (3.1)$$

Donde,

D : Ciclo de trabajo.

t_{on} : Tiempo en que el semiconductor está encendido.

t_{off} : Tiempo en que el semiconductor está apagado.

T : Periodo

3.4.1 Convertidor DC – DC reductor

En muchas aplicaciones, cuando se tiene una fuente de voltaje continuo se necesita obtener una señal de salida de voltaje reducida, esta aplicación recibe el nombre de convertidor DC – DC Buck o reductor. Esta topología se encuentra representada en la Figura 3.4 y se aprecia que contiene un inductor, el cual cumple la función de almacenar energía y disminuir los peak de corriente, un condensador conectado en paralelo a la carga, un diodo proporciona un camino a la corriente del inductor cuando el semiconductor está abierto y se polariza de forma inversa cuando el semiconductor está cerrado [2], [3].

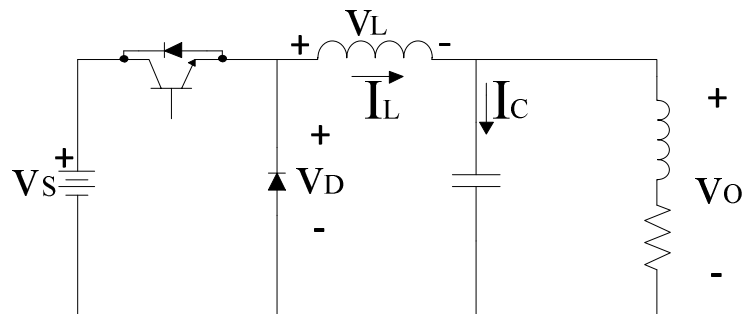


Figura 3.4: Circuito del convertidor DC - DC reductor

En el análisis de este convertidor DC – DC, se debe considerar que la tensión de entrada al filtro inductivo (V_L) es V_s cuando el semiconductor está cerrado y cero cuando el semiconductor está abierto, este análisis es verídico siempre que la corriente del inductor sea positiva y el diodo conduzca. Si el semiconductor se cierra periódicamente con un ciclo de trabajo D , la tensión de entrada al filtro es DV_s , como lo modela la relación (3.9). Para realizar un análisis detallado y demostrar lo explicado se debe estudiar por separado el comportamiento del circuito con el semiconductor abierto y cerrado.

A. *Análisis con el semiconductor cerrado*

Cuando el convertidor DC – DC reductor opera con el semiconductor cerrado, el circuito equivalente se representa mediante la Figura 3.5.

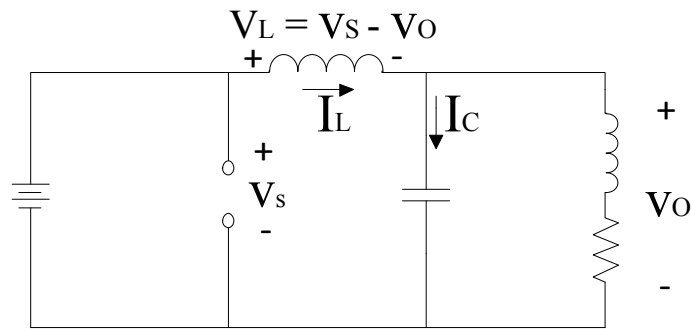


Figura 3.5: Circuito equivalente del convertidor DC – DC reductor con el semiconductor cerrado.

Bajo esta condición, la tensión del inductor se encuentra modelada por la relación (3.2).

$$V_L = V_s - V_o = L \frac{dI_L}{dt} \quad (3.2)$$

Donde,

- V_L : Voltaje del inductor.
- V_s : Voltaje de la fuente.
- V_o : Voltaje de salida.
- I_L : Corriente de inductor.
- L : Inductancia.

De acuerdo con la relación (3.2), se obtiene:

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_S - V_O}{L} \quad (3.3)$$

Debido a que el semiconductor está cerrado durante un ciclo de trabajo D , el convertidor opera un tiempo DT con el semiconductor cerrado, por lo tanto, reescribiendo la relación (3.3)

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{\Delta I_L}{DT} = \frac{V_S - V_O}{L}$$

Donde,

ΔI_L : Variación de la corriente del inductor.

Δt : Variación del tiempo.

Por lo tanto, la variación de la corriente en el inductor cuando el convertidor opera con el semiconductor cerrado es:

$$(\Delta I_L)_{\text{cerrado}} = \left(\frac{V_S - V_O}{L} \right) DT \quad (3.4)$$

Donde,

$(\Delta I_L)_{\text{cerrado}}$: Variación de corriente en el inductor con el semiconductor cerrado.

B. Análisis con el semiconductor abierto

Cuando el convertidor DC – DC reductor opera con el semiconductor abierto, el diodo conduce y permite el flujo de corriente por el inductor. El circuito equivalente para esta condición se presenta en la Figura 3.6.

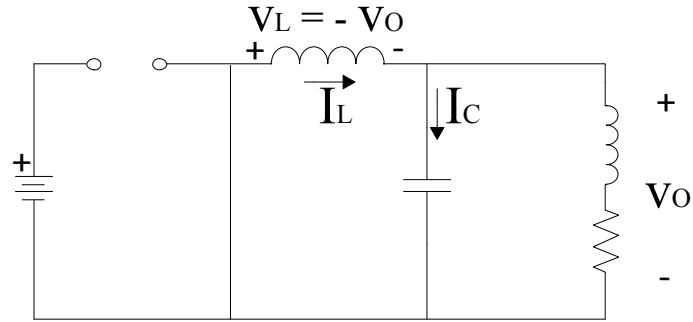


Figura 3.6: Circuito equivalente del convertidor DC – DC reductor con el semiconductor abierto

Bajo esta condición de operación, la tensión en el inductor está dada por:

$$V_L = -V_O = L \frac{dI_L}{dt} \quad (3.5)$$

Al despejar derivada de la corriente del inductor, se obtiene:

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{-V_O}{L} \quad (3.6)$$

La derivada representa la variación de la corriente, ya que el convertidor opera en $(1-D)T$ con el semiconductor abierto, la variación de corriente bajo esta condición se modela en la relación (3.7)

$$(\Delta I_L)_{abierto} = -\left(\frac{V_O}{L}\right)(1-D)T \quad (3.7)$$

Donde,

$(\Delta I_L)_{abierto}$: Variación de corriente en el inductor con el semiconductor abierto.

C. Operación en régimen permanente

Cuando el convertidor opera en régimen permanente, es necesario que la corriente del inductor sea igual al principio y al termino de cada ciclo de conmutación, debido a esto, la variación neta de la corriente del inductor en un periodo debe ser igual a cero.

$$(\Delta I_L)_{\text{cerrado}} - (\Delta I_L)_{\text{abierto}} = 0$$

De acuerdo con el análisis del convertidor con el semiconductor cerrado (relación (3.4)) y el análisis del convertidor con el semiconductor abierto (relación (3.7)), se tiene:

$$\left(\frac{V_s - V_o}{L}\right)DT - \left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T = 0 \quad (3.8)$$

Al despejar V_o , se obtiene la dinámica de la tensión de salida del convertidor DC – DC reductor operando en régimen permanente, la cual se encuentra modelada por la relación (3.9).

$$V_o = V_s D \quad (3.9)$$

Por otra parte, como en régimen permanente la corriente media del condensador debe ser igual a cero, entonces, la corriente media del inductor debe ser igual a la corriente media de la carga.

$$I_L = I_R = \frac{V_R}{R} \quad (3.10)$$

Donde,

V_R : Voltaje en la resistencia de salida.

I_R : Corriente en la resistencia de salida.

Para que el análisis realizado sea válido, se debe verificar que la corriente del inductor sea permanente, por lo tanto, se debe obtener la corriente mínima del inductor y ya que esta presenta una variación, se define de acuerdo con la relación (3.11).

$$I_{\min} = I_L - \frac{(\Delta I_L)_{\text{abierto}}}{2} = \frac{V_o}{R} - \frac{1}{2} \left[\frac{V_o}{L} (1-D)T \right] = V_o \left(\frac{1}{R} - \frac{1-D}{2Lf} \right) \quad (3.11)$$

Donde,

I_{min} : Corriente mínima en el inductor.

f : Frecuencia de la PWM.

De la relación que modela la corriente mínima (relación (3.11)), se puede obtener el valor de la inductancia mínima que puede tener el convertidor DC – DC. Debido a que $I_{min} = 0$ es el límite entre la corriente permanente y la corriente discontinua, se tiene:

$$I_{min} = 0 = V_o \left(\frac{1}{R} - \frac{1-D}{2Lf} \right)$$

Entonces:

$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2f} \quad (3.12)$$

Donde,

L_{min} : Inductancia mínima.

Por último, en la relación (3.13) se presenta el rizado en la tensión de salida, el cual se obtiene a partir de la relación entre la tensión y la corriente en el condensador, se puede apreciar que mientras más grande es el condensador menor será el rizado que se obtiene del convertidor DC – DC reductor.

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{1-D}{8LCf^2} \quad (3.13)$$

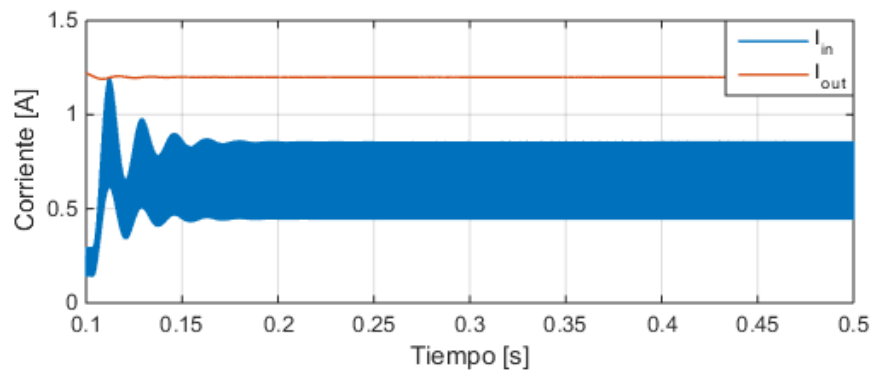
ΔV_o : Variación del voltaje de salida.

$\Delta V_o / V_o$: Rizado del voltaje de salida.

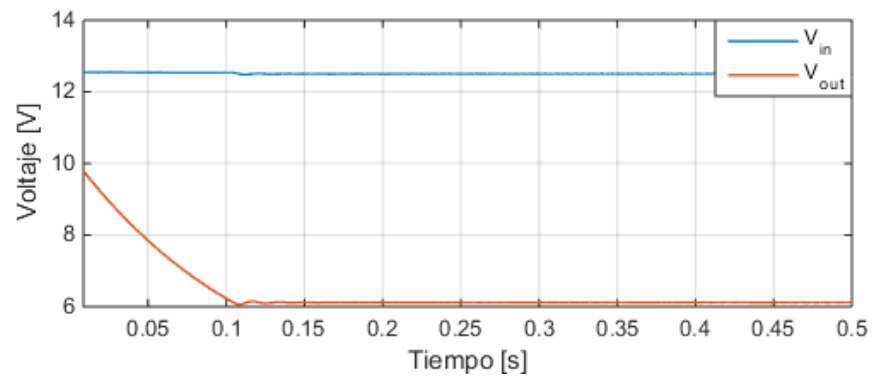
Para finalizar con lo descrito se presentan los resultados de un convertidor DC – DC reductor, en donde sus parámetros han sido obtenidos a través del análisis realizado y se asegura que el convertidor opera en régimen permanente. Los parámetros de dicho convertidor se encuentran tabulados en la TABLA 3.3.

Tabla 3.3: Parámetros del convertidor DC - DC

Parámetro	Valor
V_s	12.5 V
C	33 mF
L	215 μ H
R_{load}	5.1 Ω
L_{load}	115 μ H
f	20 kHz
D	0.5



(a)



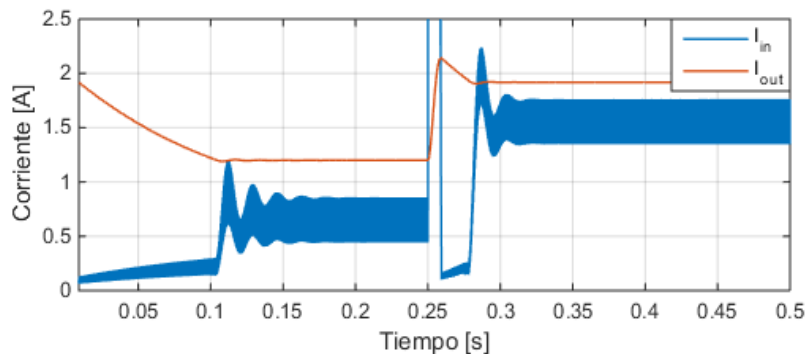
(b)

Figura 3.7: Formas de onda del convertidor DC – DC reductor
(a) Formas de onda de corriente. (b) Formas de onda de voltaje

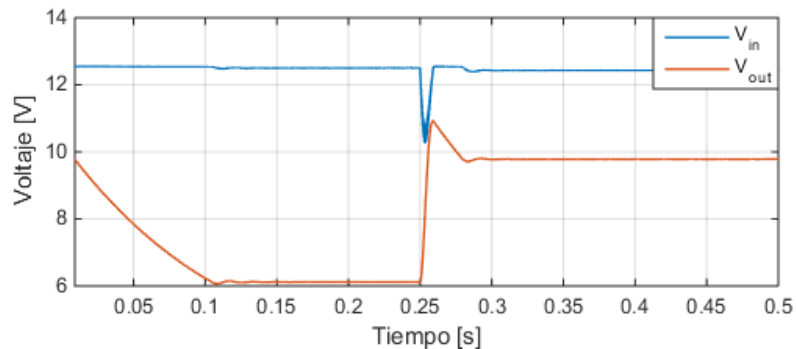
Los resultados del convertidor DC – DC reductor con los parámetros descritos en la Tabla 3.3 se encuentran graficados en la Figura 3.7 (a) y (b).

Se observa que la corriente de entrada representada en la Figura 3.7 (a) siempre es mayor a cero, ya que el inductor propuesto cumple con la condición de inductancia mínima para que el convertidor opere en estado continuo (relación (3.12)). Adicionalmente, se tiene que la corriente de salida es aproximadamente el doble de la corriente de entrada, por lo tanto, ocurre el caso opuesto al del voltaje de salida. Por otra parte, en la Figura 3.7 (b) se tiene que para un ciclo de trabajo igual a 0.5 se cumple con la relación de voltaje de salida propuesta en la relación 3.9, ya que se obtiene un voltaje de salida igual a la mitad del voltaje de entrada.

Dada la relación (3.9), la cual modela el voltaje de salida del convertidor y como se tiene un voltaje de entrada de 12.5 [V], se debe esperar tener un voltaje de salida igual a 6.25 [V]. Debido a que esto se cumple, se puede confirmar que los parámetros propuestos en la Tabla 3.3 son correctos.



(a)



(b)

Figura 3.8: Formas de onda del convertidor DC – DC reductor

(a) Formas de onda de corriente. (b) Formas de onda de voltaje

En la Figura 3.8 se tiene un convertidor DC – DC con los parámetros descritos en la Tabla 3.3, pero en este caso se ha definido inicialmente un ciclo de trabajo igual a 0.5 y en el instante $t = 0.25$ [s] el ciclo de trabajo cambia a 0.8.

En la Figura 3.8 (a), se tiene que inicialmente la corriente de entrada es la mitad que la corriente de salida, al cambiar el ciclo de trabajo de 0.5 a 0.8, la corriente de entrada es aproximadamente un 80% de la corriente de salida, por lo que se define la relación 3.14, que modela la corriente de salida del convertidor DC – DC reductor en función de la corriente de salida y el ciclo de trabajo.

$$I_o = \frac{I_s}{D} \quad (3.14)$$

Donde,

I_o : Corriente de salida.

I_s : Corriente suministrada por la fuente.

Mediante la relación (3.14) se puede corroborar los resultados obtenidos en la Figura 3.4 (a).

Para la Figura 3.8 (b), se tiene en que ambos escenarios se cumple la relación (3.9), la cual modela el voltaje de salida en función al ciclo de trabajo y voltaje de salida. Ya que inicialmente el convertidor opera con un ciclo de trabajo igual a 0.5 se obtiene que el voltaje de salida es igual a la mitad del voltaje de entrada. Luego, con un ciclo de trabajo igual a 0.8, se tiene que el voltaje de salida corresponde a un 80% del voltaje de entrada aproximadamente. Por lo tanto, el análisis desarrollado en este capítulo y los parámetros propuestos en la Tabla 3.3 para el diseño del convertidor DC – DC son verídicos.

3.4.2 Convertidor DC – DC elevador

Existen aplicaciones en donde se tiene una fuente de voltaje continua y se necesita obtener un voltaje de salida continuo y elevado, los equipos encargados de realizar esta conversión reciben

el nombre de convertidor DC – DC Boost o elevador. Esta topología se encuentra representada en la Figura 3.9 y se aprecia que contiene un inductor que cumple la función de almacenar energía y disminuir los peak de corrientes, un condensador conectado en paralelo a la carga, un diodo que bloquea el camino a la corriente cuando el semiconductor está cerrado [2], [3].

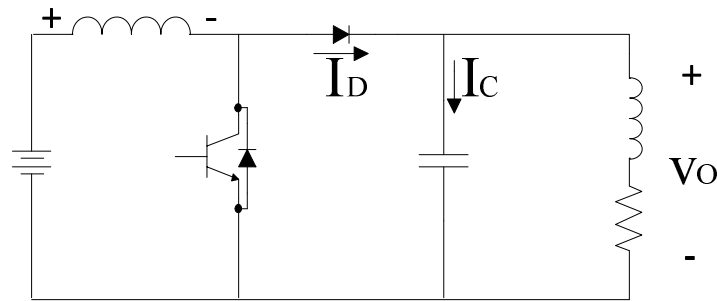


Figura 3.9: Circuito del convertidor DC - DC elevador.

Para asegurar una corriente permanente en la salida del convertidor, se debe considerar que la corriente mínima en el inductor tiene que ser mayor a cero, ya que de lo contrario el convertidor operará en estado discontinuo. Para cumplir con esta condición se debe realizar un análisis del convertidor cuando opera con el semiconductor está cerrado y otro análisis cuando el semiconductor está abierto.

A. Análisis con el semiconductor cerrado

El circuito equivalente cuando el convertidor DC – DC elevador opera con el semiconductor cerrado, se aprecia en la Figura 3.10. Al analizar este circuito, se aprecia que, mediante la ley de voltajes de Kirchhoff, la tensión del inductor es igual a la tensión de la fuente (relación (3.15)).

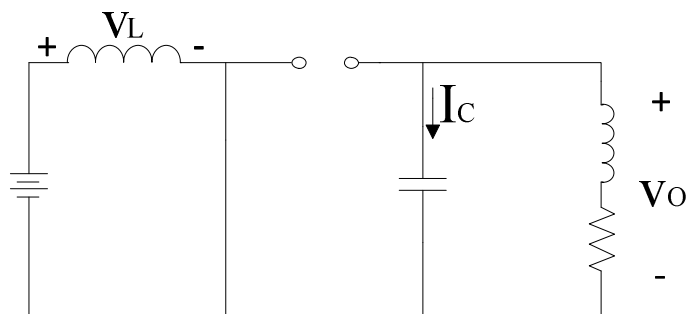


Figura 3.10: Circuito equivalente del convertidor DC – DC elevador con el semiconductor cerrado.

$$V_S = V_L = L \frac{dI_L}{dt} \quad (3.15)$$

De acuerdo con la ley de voltajes de Kirchhoff, se puede obtener la derivada de la corriente en el inductor.

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_S}{L} \quad (3.16)$$

Al igual que en el convertidor DC – DC reductor, el semiconductor está cerrado DT , por lo tanto.

$$\frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{\Delta I_L}{DT} = \frac{V_S}{L}$$

$$(\Delta I_L)_{\text{cerrado}} = \left(\frac{V_S}{L} \right) DT \quad (3.17)$$

B. Análisis con el semiconductor abierto

Cuando el convertidor opera con el semiconductor abierto, el diodo proporciona un camino a la corriente del inductor. El circuito equivalente para el convertidor bajo esta condición se encuentra representado en la Figura 3.11 y al realizar una ley de voltajes de Kirchhoff al circuito equivalente, se tiene:

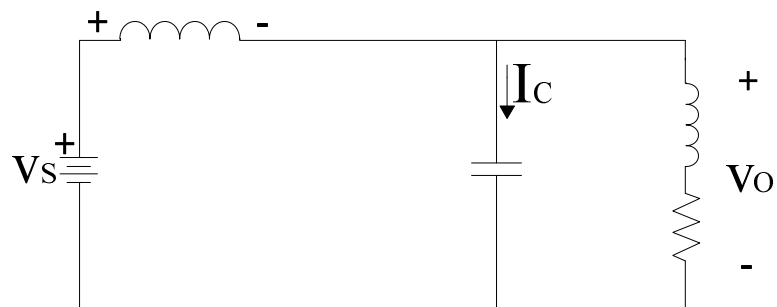


Figura 3.11: Circuito equivalente del convertidor DC – DC elevador con el semiconductor abierto.

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_S - V_O \quad (3.18)$$

De la relación (3.18), se obtiene la derivada de la corriente del inductor.

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_S - V_O}{L} \quad (3.19)$$

Como se definió, el semiconductor está abierto en $(1-D)T$, entonces la variación de la corriente del inductor está dada por:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta I_L}{\Delta t} &= \frac{\Delta I_L}{(1-D)T} = \frac{V_S - V_O}{L} \\ (\Delta I_L)_{abierto} &= \frac{(V_S - V_O)(1-D)T}{L} \end{aligned} \quad (3.20)$$

C. *Operación en régimen permanente*

Cuando el convertidor opera en régimen permanente, la variación neta de la corriente del inductor debe ser igual a cero.

$$(\Delta I_L)_{cerrado} - (\Delta I_L)_{abierto} = 0 \quad (3.21)$$

Por lo tanto, al desarrollar la expresión descrita se obtiene:

$$\frac{V_S DT}{L} + \frac{(V_S - V_O)(1-D)T}{L} = 0 \quad (3.22)$$

Al despejar el voltaje de salida del convertidor se obtiene la dinámica de este.

$$V_o = \frac{V_s}{1-D} \quad (3.23)$$

Se debe asegurar que el convertidor opere en régimen permanente, para esto se debe obtener la corriente media en el inductor, la cual se calculara a partir de un balance de potencia y asumiendo que los dispositivos del convertidor son ideales. Por lo tanto, la potencia entregada por la fuente debe ser igual a la potencia absorbida por la carga.

$$V_s I_L = \frac{V_o^2}{R} \quad (3.24)$$

Al desarrollar la expresión de balance de potencia.

$$V_s I_L = \frac{V_o^2}{R} = \frac{\left(\frac{V_s}{1-D}\right)^2}{R} = \frac{V_s^2}{(1-D)^2 R} \quad (3.25)$$

A través de la expresión obtenida en la relación (3.25) se logra despejar la corriente media en el inductor.

$$I_L = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} \quad (3.26)$$

Ahora, para asegurar que el convertidor opere en régimen permanente, se debe obtener la corriente mínima del inductor.

$$I_{\min} = I_L - \frac{(\Delta I_L)_{\text{cerrado}}}{2} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} - \frac{V_s DT}{2L} \quad (3.27)$$

Ya que el límite entre la corriente permanente y la discontinua se obtiene igualando la corriente mínima a cero, se puede obtener el valor de la inductancia mínima para que el convertidor opere en régimen permanente.

$$\frac{V_s}{(1-D)^2 R} - \frac{V_s DT}{2L} = 0$$

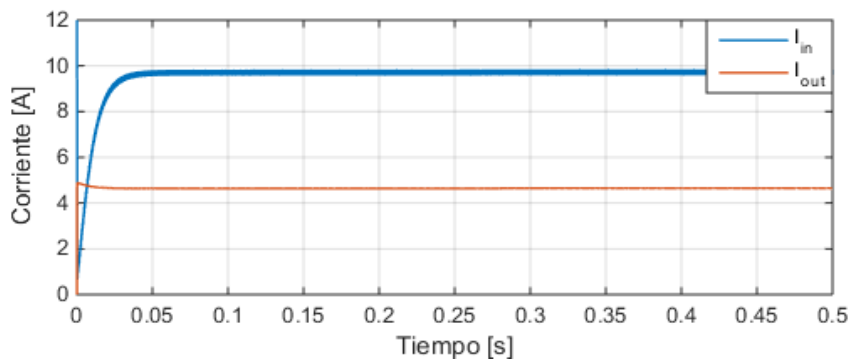
$$\frac{V_s}{(1-D)^2 R} = \frac{V_s DT}{2L}$$

Ya que el periodo es inversamente proporcional a la frecuencia de conmutación ($T=1/f$).

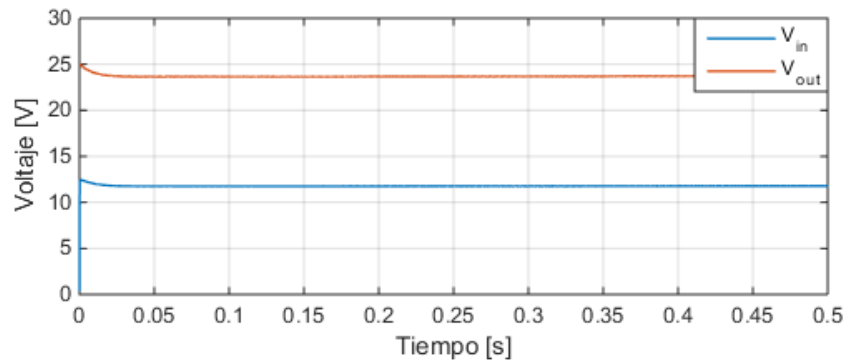
$$\frac{V_s}{(1-D)^2 R} = \frac{V_s D}{2Lf}$$

$$L_{\min} = \frac{(1-D)^2 R}{2f} \quad (3.28)$$

A partir del análisis realizado, se presentan los resultados de simulación de un convertidor DC – DC elevador con los parámetros propuestos en la Tabla 3.3. Estos parámetros cumplen con el diseño para que el convertidor opere en régimen permanente. En la Figura 3.12 se presentan los resultados obtenidos.



(a)



(b)

Figura 3.12: Formas de onda del convertidor DC – DC elevador, D igual a 0.5.

(a) Formas de onda de corriente. (b) Formas de onda de voltaje

Al analizar el gráfico propuesto en la Figura 3.12 (a), la corriente de entrada es el doble de la corriente en la carga, esto se debe a que el ciclo de trabajo $D = 0.5$, además, se aprecia que la corriente de entrada siempre es mayor a cero, ya que el inductor está conectado en serie a la fuente se comprueba que el convertidor se encuentra operando en régimen permanente.

Por otra parte, comparar el gráfico que contiene las corrientes del convertidor DC – DC elevador con las corrientes del convertidor DC – DC reductor (Figura 3.7 (a)), se aprecia que la corriente de entrada del convertidor DC – DC elevador tiene menores peak, esto se debe a que este convertidor posee una inductancia en serie a la fuente.

Con respecto al fenómeno que ocurre en el voltaje de salida, se aprecia en la Figura 3.12 (b) que se cumple la relación (3.23), dado que para un ciclo de trabajo igual a 0.5, la tensión de salida alcanza el doble de la tensión de entrada. Debido a esto, la implementación de este convertidor en el MMSPC propuesto, propone mantener el condensador situado en modulo central cargado al doble del voltaje de las baterías, con el fin de obtener una salida de nueve niveles.

Se concluye, que los parámetros propuestos en la Tabla 3.3 son aplicables para el convertidor DC – DC, ya que opera en estado continuo y se obtuvieron los resultados esperados, por lo tanto, estos parámetros son aplicables al MMSPC con transferencia de energía tipo inductor conmutado.

3.4.3 Convertidor DC – DC reductor – elevador

En la Figura 3.13 se presenta la topología que describe al convertidor DC – DC Buck – Boost o reductor – elevador. Este convertidor se compone de una fuente de voltaje de corriente continua, un semiconductor controlado, un inductor, condensador y la carga RL. Mediante esta topología se puede obtener un voltaje de salida mayor o menor al de entrada, esto se obtiene controlando el ciclo de trabajo, dependiendo la aplicación que se le desea dar al convertidor (de reductor o elevador), se realizara un análisis con el semiconductor cerrado y otro con el semiconductor abierto [2], [3].

El convertidor DC – DC reductor – elevador (Figura 3.13) cumple la función de suministrar un voltaje en la salida continuo el cual puede ser mayor o menor en comparación al voltaje de entrada, además, otra característica de esta topología es entregar una tensión de salida con polaridad opuesta a la tensión de entrada.

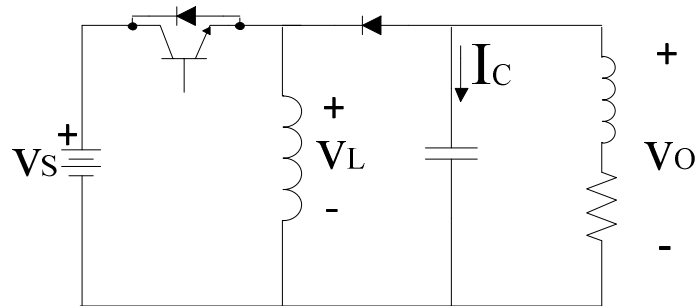


Figura 3.13: Circuito del convertidor reductor - elevador.

Se debe realizar el mismo análisis hecho en los convertidores DC – DC ya estudiados, esto para asegurar una corriente permanente en la salida. Se debe considerar que la corriente mínima en el inductor (relación (3.35)) tiene que ser cero, ya que al tener una corriente negativa se obtiene una corriente discontinua en la salida.

A. Análisis con el semiconductor cerrado

En la Figura 3.14, se tiene el circuito equivalente del convertidor DC – DC reductor – elevador operando con el semiconductor cerrado, en donde se aprecia que, al realizar una ley de voltajes de Kirchhoff, la tensión del inductor es igual a la tensión de la fuente.

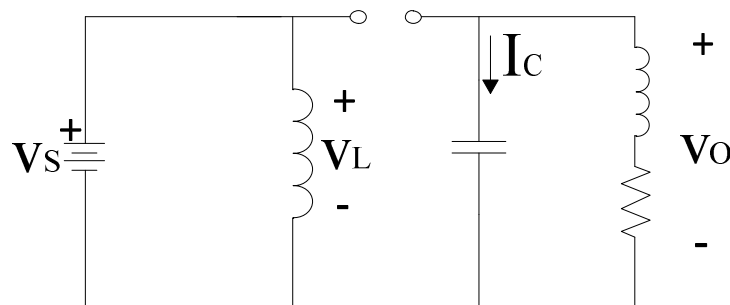


Figura 3.14: Circuito equivalente del convertidor DC – DC reductor - elevador con el semiconductor cerrado.

$$V_L = V_S = L \frac{di_L}{dt} \quad (3.29)$$

Además, la variación de la corriente del inductor es constante debido a que está siendo alimentada por una tensión continua, por lo que la corriente aumenta linealmente, lo cual se puede expresar en función del ciclo de trabajo, periodo y voltaje de entrada (relación (3.30)).

$$\Delta i_{L(\text{cerrado})} = \frac{DTV_L}{L} \quad (3.30)$$

B. Análisis con el semiconductor abierto

En este análisis, cuando el semiconductor está abierto, la corriente del inductor no puede variar instantáneamente debido a que está alimentado por una fuente de voltaje continuo. El circuito equivalente bajo esta condición se encuentra representado en la Figura 3.15.

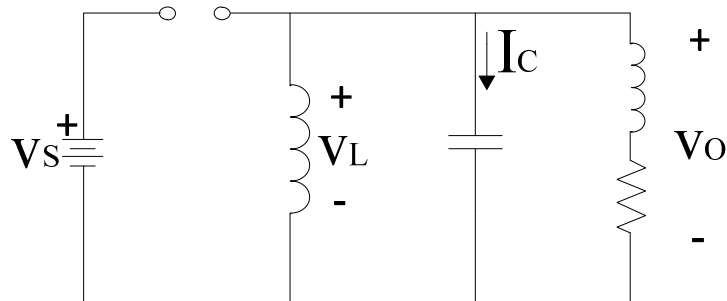


Figura 3.15: Circuito equivalente del convertidor DC – DC reductor - elevador con el semiconductor abierto.

Bajo estas condiciones, la tensión en el inductor está dada por la relación dada en la relación (3.31)

$$V_L = V_O = L \frac{di_L}{dt} \quad (3.31)$$

De acuerdo con la relación propuesta, se obtiene la variación de la corriente en el inductor, la cual está dada por la relación (3.32)

$$\Delta i_{L(\text{abierto})} = \frac{V_O(1-D)T}{L} \quad (3.32)$$

C. *Operación en régimen permanente*

Cuando el convertidor opera en régimen permanente, la variación total de la corriente del inductor debe ser nula, por lo tanto, a partir de la variación de la corriente en el inductor cuando el semiconductor está abierto y cuando está cerrado, se obtiene la relación del voltaje de salida y voltaje de entrada del convertidor DC – DC reductor – elevador.

$$\Delta i_L = \Delta i_{L(\text{abierto})} + \Delta i_{L(\text{cerrado})} \quad (3.33)$$

$$\Delta i_L = \frac{V_o(1-D)T}{L} + \frac{DTV_L}{L}$$

La relación del voltaje de salida y voltaje de entrada está dada en la relación (3.34)

$$V_o = \frac{D}{1-D} V_s \quad (3.34)$$

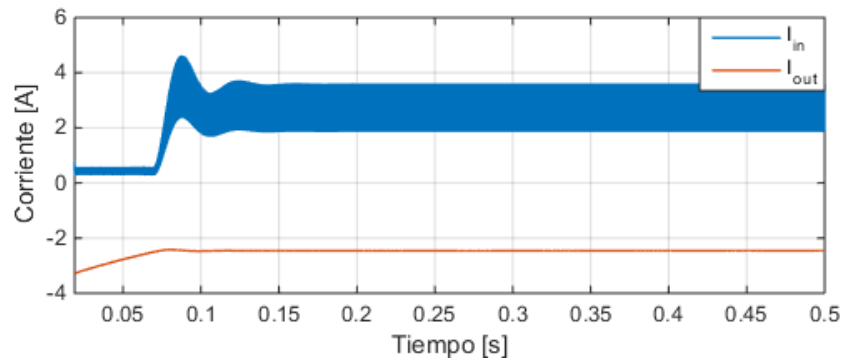
Además, para que el convertidor opere en régimen permanente la corriente del inductor tiene que ser mayor a cero en todo el periodo, la corriente mínima para asegurar que el convertidor opere en régimen permanente está dada por:

$$I_{\min} = \frac{V_s}{(1-D)^2 R} - \frac{V_s DT}{2L} \quad (3.35)$$

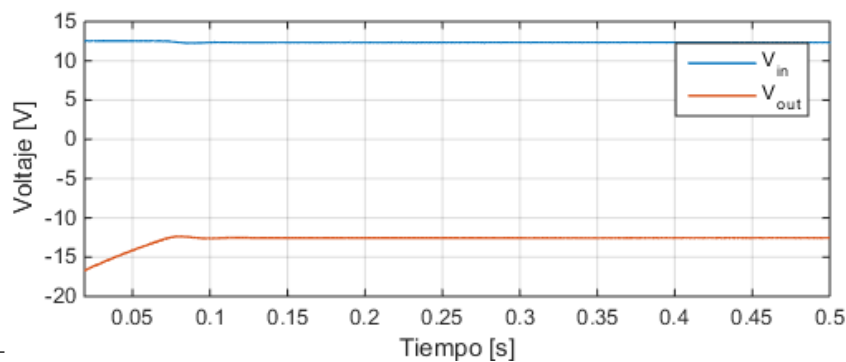
A partir de la corriente mínima, se puede obtener la inductancia mínima (relación (3.36)) para generar una corriente permanente.

$$L_{\min} = \frac{(1-D)^2 R}{2f} \quad (3.36)$$

De acuerdo con lo descrito, se presentan los resultados de simulación de un convertidor DC – DC reductor – elevador, en donde sus parámetros se encuentran tabulados en la Tabla 3.3.



(a)



(b)

Figura 3.16: Formas de onda del convertidor DC – DC reductor – elevador.

(a) Formas de onda de corriente. (b) Formas de onda de voltaje

A través de la Figura 3.16 (a), se puede apreciar que la corriente de salida y de entrada tienen la misma amplitud, pero con distinta polaridad. Para la corriente de entrada se tiene una señal triangular con una frecuencia de 20[kHz], ya que como se observa en el circuito equivalente del convertidor DC – DC reductor – elevador (ver Figura 3.13), se tiene un filtro inductivo en la carga, pero no en la entrada. Por lo tanto, la corriente de entrada tendrá una forma de onda triangular con una frecuencia igual a la frecuencia de conmutación del semiconductor y el inductor de la carga RL actúa como filtro, disminuyendo los peak de corriente.

Como se aprecia en la Figura 3.16 (b), el voltaje de entrada y salida tienen la misma amplitud, pero con distinta polaridad, esto se debe a que para un ciclo de trabajo igual a 0.5 se obtiene el mismo nivel de tensión y de corriente en la salida, pero ambas señales tienen polaridad invertida. En la relación (3.34) se define el voltaje de salida en función del ciclo de trabajo y el

voltaje de entrada.

3.5. **Discusión y Conclusiones**

Mediante el estudio de un convertidor puente H en cascada clásico [7], [8], se logró comprobar que para obtener un voltaje de salida de nueve niveles se necesita una batería de dos veces el nivel de tensión de las otras dos baterías o simplemente agregar otro modulo y así tener un convertidor puente H en cascada compuesto por cuatro módulos, en donde todos los elementos almacenadores de energía tienen el mismo nivel de tensión. Por lo tanto, de acuerdo con la Figura 3.1, la cual representa la topología del MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado, se le hace hincapié a que el condensador emula el funcionamiento de mínimo una batería, lo cual es una ventaja muy importante en el aspecto de costos construcción del sistema.

Mediante el estudio de los convertidores DC – DC, se afirma su importancia en la elección de la magnitud de los parámetros que se incluirán en la construcción del convertidor, debido a que se debe realizar este estudio para confirmar que la corriente del inductor es permanente, de no ser así, no se puede asegurar el funcionamiento del convertidor, ya que bajo esa condición el convertidor opera en régimen discontinuo y no se validarían los parámetros propuestos del sistema.

A partir del estudio realizado sobre los convertidores DC – DC, se concluye que los parámetros con los que se llevaron a cabo las simulaciones son compatibles con la condición de corriente permanente, ya que en el MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado se requieren etapas DC – DC elevadoras y reductoras con el fin de realizar una transferencia de energía entre los módulos de manera eficiente y controlada, se mantendrán los parámetros expuestos en esta sección.

Se destaca el comportamiento de los convertidores DC – DC, ya que estos tienen cumplen un papel importante en la renovación de la matriz energética, ya que son de vital importancia en proyectos de energía solar fotovoltaica [13], [14], por otra parte, existen diversos tipos de convertidores DC – DC en la literatura, los cuales tienen distintas aplicaciones y configuraciones.

Capítulo 4. MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado

4.1. Introducción

En este capítulo, se llevará a cabo el estudio del funcionamiento del MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado, para llevar a cabo este estudio se analizarán dos casos. El primer caso consta del funcionamiento del convertidor cuando se necesita obtener un voltaje de salida alterno, en donde, dependiendo de la secuencia de los estados de conmutación, se puede obtener un voltaje de salida con un número de niveles variable y controlable. Obtener un voltaje con un mayor número de niveles es positivo, ya que se disminuye el THD tanto en el voltaje como en la corriente.

En el segundo caso de estudio, se analizará el convertidor bajo la condición de obtener un voltaje de salida continuo, el cual puede ser de nivel y polaridad distinta al de las baterías, con esto se logra demostrar una mayor versatilidad en la topología propuesta, ya que como se verá a continuación, se puede obtener una tensión de salida alterna con un número de niveles variables o una tensión continua con polaridad positiva o negativa.

En la Figura 3.1 se muestra las dos etapas DC – DC del tipo inductor conmutado del MMSPC propuesto: la primera está compuesta por los semiconductores S_{d1} , S_{d2} , S_{d3} y S_{d4} y el inductor L_{s1} , mientras que la segunda se compone de los semiconductores S_{d5} , S_{d6} , S_{d7} y S_{d8} y el inductor L_{s2} . Estas etapas brindan funciones elevadoras o reductoras, por lo tanto, se puede ajustar la tensión del condensador de forma arbitraria, con esto se logra realizar una transferencia de energía controlable y eficiente entre los módulos, aunque estos tengan una diferencia de tensión no despreciable.

4.2. Funcionamiento

Para comprender el funcionamiento de la topología propuesta, se debe comparar el circuito del convertidor DC – DC elevador (Figura (3.8)) con el MMSPC con transferencia de energía tipo

inductor conmutado (Figura (3.1)). Se tiene que para la etapa DC – DC 1, S_{d4} reemplaza al semiconductor que controla el ciclo de trabajo, S_{d3} reemplaza al diodo, S_{d1} representa la salida positiva de la batería y el retorno de la batería se obtiene mediante el sistema AC, esto se logra al mantener encendidos los semiconductores S_{14} y S_{22} . Esta configuración de los estados de conmutación se realiza con el fin de mantener el condensador cargado en el semiciclo positivo. Para el mantener cargado el condensador en el semiciclo negativo, se debe realizar el mismo análisis, pero, en la etapa DC – DC 2. A continuación, se presenta la secuencia de los estados de conmutación para obtener los niveles $L = 2$ y -2 .

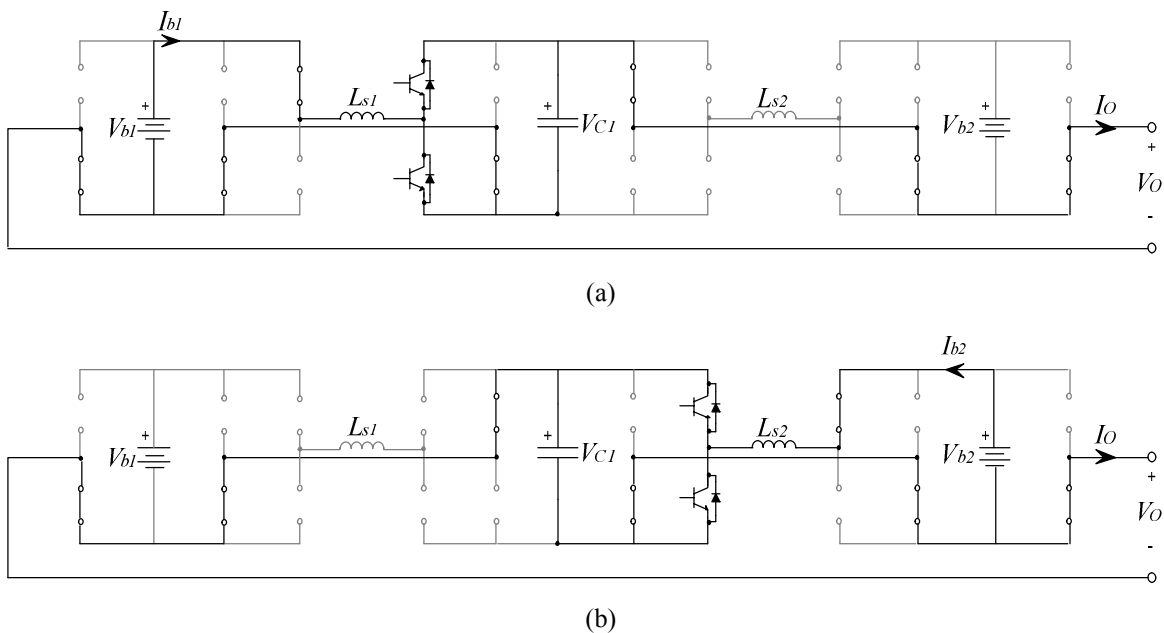


Figura 4.1: Estados de conmutación para la topología del MMSPC con transferencia de energía tipo inductor conmutado con relación de tensión 1:2:1. (a) Nivel de tensión de salida igual a $2V_b$; (b) Nivel de tensión de salida igual a $-2V_b$.

En la Figura 4.1, se corrobora lo descrito en el funcionamiento, en donde de las etapas DC – DC se complementan con el sistema AC, con el fin de tener el retorno mediante la interconexión de ambos sistemas. Se observa que, para el semiciclo positivo la batería 1 está encargada de cargar el condensador y para el semiciclo negativo la batería 2 está encargada de cargar el condensador.

Para una relación de tensión (1:2:1) entre los módulos del MMSPC con transferencia de energía tipo inductor conmutado, se presenta la Tabla 4.5, la cual contiene la secuencia de los

estados de conmutación para cada nivel. Mediante esta tabla, se puede apreciar que las etapas DC - DC tienen funciones elevadoras, la batería 1 está encargada de cargar el condensador para los niveles 1, 2 y 3, mientras que la batería 2 carga el condensador para los niveles -1, -2 y -3. Para los niveles $L = -4$ y 4 se desconectan las etapas DC - DC, ya que las baterías y el condensador se encargan de suministrar energía a la carga.

Tabla 4.1: Estados de conmutación para una relación de tensión de 1:2:1

L	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{d1}	S_{d2}	S_{d3}	S_{d4}	S_{21}	S_{22}	S_{23}	S_{24}	S_{d5}	S_{d6}	S_{d7}	S_{d8}	S_{31}	S_{32}	S_{33}	S_{34}
4	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0
3	0	1	0	1	1	0	0	d_1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0
2	0	1	0	1	1	0	0	d_1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1
1	0	1	0	1	1	0	0	d_1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0
0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1
-1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	d_2	1	0	0	1	0	1
-2	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	d_2	1	0	0	1	0	1
-3	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	d_2	1	0	0	1	0	1
-4	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1

Ya que cada etapa DC es un convertidor DC - DC elevador, entonces, el voltaje del condensador estará dado por la relación representada en la relación 4.1.

$$V_C = \frac{V_{bn}}{1-d_n} \quad (4.1)$$

Donde,

- n : Batería ($n = 1$ o 2).
- V_{bn} : Voltaje en la batería n .
- d_n : Ciclo de trabajo de la etapa DC - DC n .

4.3. Voltaje de salida AC con variación del número de niveles

Como se indicó anteriormente, el convertidor propuesto tiene la ventaja de generar un voltaje de salida con un número de niveles variables, lo cual depende de la relación de tensión entre las

baterías y el condensador. Por ejemplo, si las baterías y el condensador (V_{b1} : V_c : V_{b2}) tienen una relación (1: 1: 1), es posible generar un voltaje de salida de siete niveles. Sin embargo, si mediante las etapas DC – DC se mantiene cargado el condensador al doble de la tensión de las baterías, tienen una relación (1: 2: 1) y con esto es posible obtener un voltaje de salida de nueve niveles.

Se comienza el análisis sobre el convertidor con un ciclo de trabajo igual a cero, por lo tanto, el voltaje del condensador será igual al de las baterías. A continuación, se presenta la Tabla 4.2, la cual presenta los parámetros que se llevarán a cabo en la simulación.

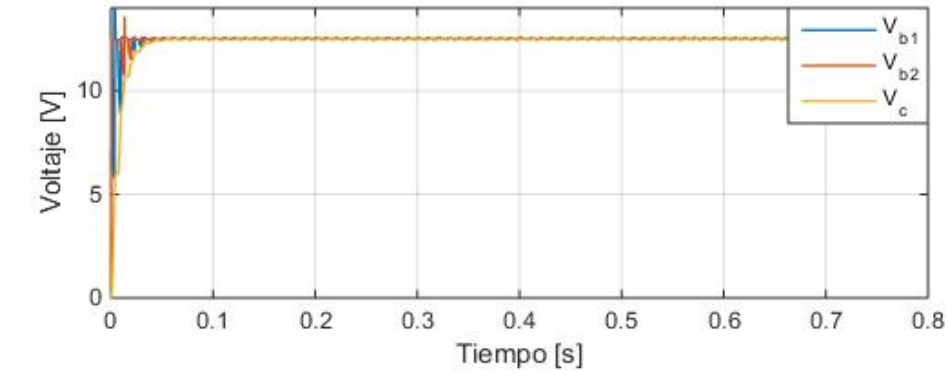
Tabla 4.2: Parámetros del sistema

Parámetro	Valor	
Frecuencia de la señal portadora de las etapas DC – DC.	20	kHz
Condensador	33	mF
Resistencia de carga	5.1	Ω
Inductancia de carga	115	mH
Inductancia L_{SM}	215	μ H
D	0	
Voltaje de baterías	12.5	V

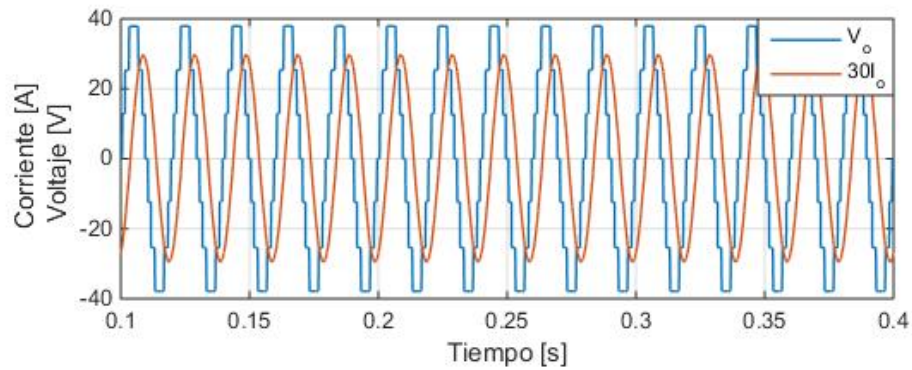
El estudio realizado en este trabajo consta de baterías de 12.5 [V] en condiciones nominales, cada batería incorpora en paralelo un condensador de 0.4 [mF]. Los resultados obtenidos a partir del MMSPC con transferencia de energía tipo inductor conmutado se presentan en la Figura 4.2.

Como se aprecia en la Figura 4.2 (a), para un ciclo de trabajo igual a cero se corrobora la relación propuesta para la tensión del condensador (relación 4.1), ya que el voltaje del condensador es igual al de las baterías. En la Figura 4.2 (b) se obtiene un voltaje de salida de siete niveles, con esto se ratifica lo señalado anteriormente.

Con respecto a la corriente, en la Figura 4.2 (b) se presenta la corriente de salida, se aprecia que es de mayor calidad en cuanto a THD en comparación al voltaje de salida, respectivamente el THD de corriente es de 1.13% y el de voltaje es de un 12.65%. Esto es posible gracias a la carga RL, ya que el inductor situado en la carga actúa como filtro, disminuyendo los peak de corriente.



(a)



(b)

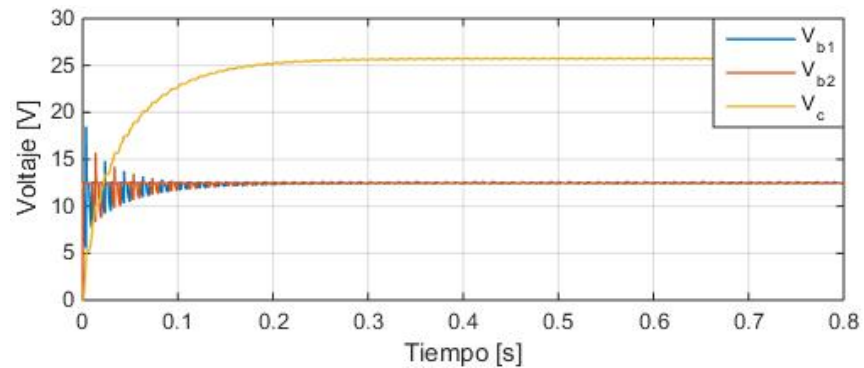
Figura 4.2: Resultados de la simulación con un ciclo de trabajo D igual a 0.
(a) Tensiones DC. (b) Voltaje y corriente de salida

A continuación, se realiza el análisis para una relación de tensión de (1:2:1), para lograr esto se debe controlar las etapas DC del convertidor con un ciclo de trabajo igual a 0.5, ya que de acuerdo con la relación propuesta en la relación (4.1), con este ciclo de trabajo se obtiene un voltaje en el condensador del doble del voltaje de las baterías. En la Tabla 4.3 se presentan los parámetros del sistema.

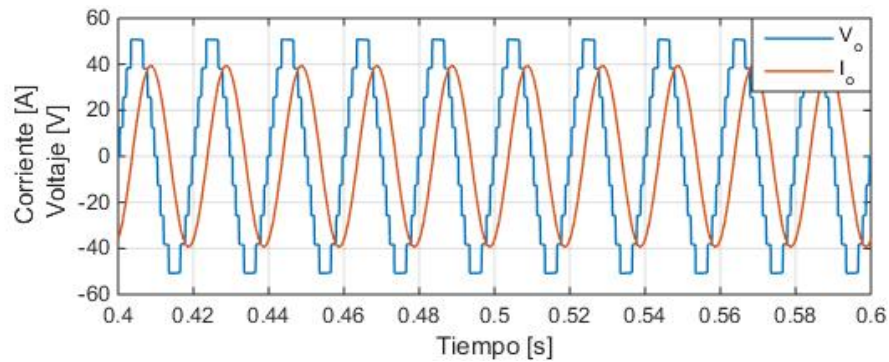
Cabe mencionar que las baterías utilizadas en este apartado tienen un condensador en paralelo de 0.4 [mF] , con el fin de filtrar corrientes de alta frecuencia. Los resultados de la simulación se presentan en las Figura 4.3 (a) y (b).

Tabla 4.3: Parámetros del sistema

Parámetro	Valor	
Frecuencia de la señal portadora de las etapas DC – DC.	20	kHz
Condensador	33	mF
Resistencia de carga	5.1	Ω
Inductancia de carga	115	mH
Inductancia L_{SM}	215	μ H
D	0.5	
Voltaje de baterías	12.5	V



(a)



(b)

Figura 4.3: Resultados de la simulación con un ciclo de trabajo D igual a 0.5.
(a) Tensiones DC. (b) Señales de salida

En la Figura 4.3 (a) se corrobora la relación propuesta en la relación 4.1, en donde se aprecia que para un ciclo de trabajo igual a 0.5 el voltaje del condensador es dos veces el voltaje de las baterías, por lo tanto, mediante la topología del MMSPC con transferencia de energía tipo inductor conmutado se logra aumentar número de niveles con la misma cantidad de semiconductores,

baterías y condensador. Para estos parámetros se consiguió obtener nueve niveles con dos baterías y un condensador, lo cual se logra mediante cuatro baterías en un CHB tradicional.

En la Figura 4.3 (b), se tiene una corriente de salida con una forma de onda similar a la obtenida con un voltaje de salida de siete niveles, pero contiene una menor distorsión armónica, ya que el voltaje de salida presenta una menor distorsión armónica.

A continuación, se lleva a cabo el análisis para un ciclo de trabajo variable, el cual inicialmente es de 0 y en el instante $t = 0.2$ [s] pasar a un ciclo de trabajo igual 0.5. Los resultados de esta simulación se presentan en las Figura 4.4 (a) y (b).

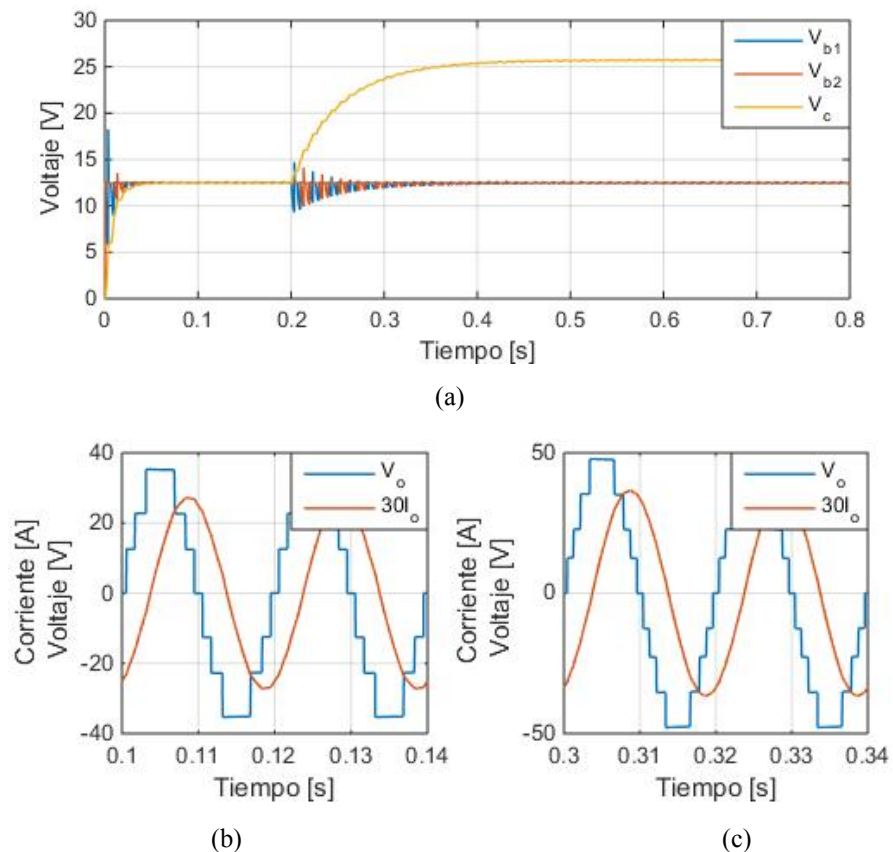


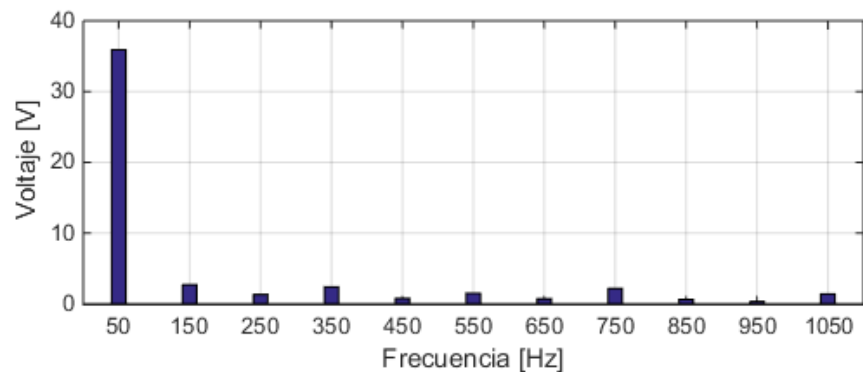
Figura 4.4: Resultados de la simulación con un ciclo de trabajo D variable
(a) Tensiones DC. (b) Voltaje y corriente con D igual a 0. (c) Voltaje y corriente con D igual a 0.5.

En el nivel 4 y -4 se pierde el control de las etapas DC – DC sobre el condensador, ya que ambas baterías y el condensador están suministrando energía a la carga, por lo que se deben abrir los semiconductores que componen dichas etapas, pero como se aprecia en la Figura 4.3 (a), en ningún

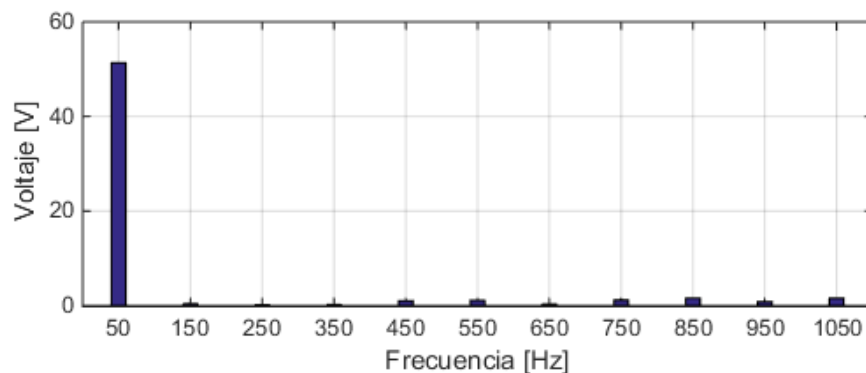
instante el condensador tiende a descargarse cuando se realiza el salto del nivel 3 al 4 o del nivel -3 al -4.

Una desventaja que presenta esta topología es que al operar con fuentes DC asimétricas, los semiconductores que bloqueen el voltaje del condensador están sometidos a un mayor estrés que los semiconductores que bloqueen el voltaje de las baterías.

Mediante estos resultados, se puede apreciar una de las grandes ventajas de este convertidor con respecto a los convertidores tradicionales, ya que presenta un voltaje de salida con una variación del número de niveles que depende del ciclo de trabajo del convertidor DC – DC elevador y de secuencia de los estados de conmutación, además puede operar con fuentes asimétricas y el concepto de paralelización se reemplaza por las etapas DC, ya que pueden controlar el flujo de energía. A continuación, se presentan los espectros de frecuencia del voltaje de salida del convertidor cuando presenta siete y nueve niveles.



(a)



(b)

Figura 4.5: Espectro de Frecuencia
(a) Voltaje AC con siete niveles. (b) Voltaje AC con nueve niveles

Mediante la Figura 4.5, se logra confirmar que un voltaje alterno con mayor número de niveles tiene una mejor calidad en cuanto a forma de onda [8], ya que para un voltaje de salida alterno con siete niveles se obtiene un THD de 16.44% y para un voltaje de salida de nueve niveles se obtiene un THD de 9.28%.

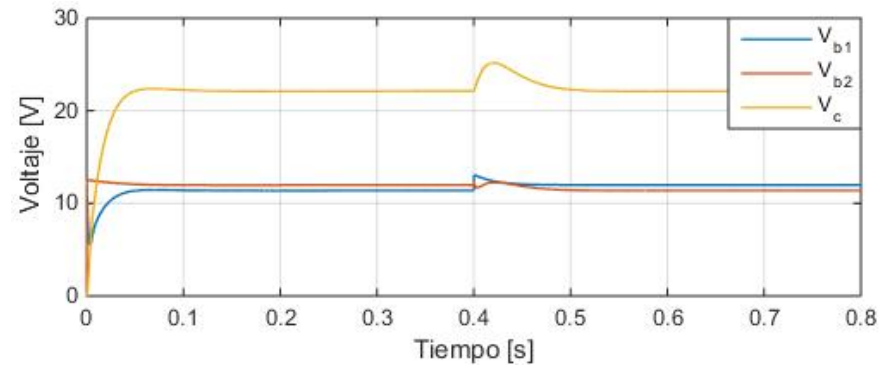
4.4. Voltaje de salida DC

Como se ha mencionado en el desarrollo de este documento, una de las grandes ventajas del MMSPC propuesto, es la posibilidad de obtener una salida de naturaleza alterna o continua, en este apartado se llevará a cabo el estudio del convertidor operando bajo la condición de obtener la salida de naturaleza continua, la cual puede ser de polaridad positiva o negativa [5], dependiendo la aplicación que se le desee dar.

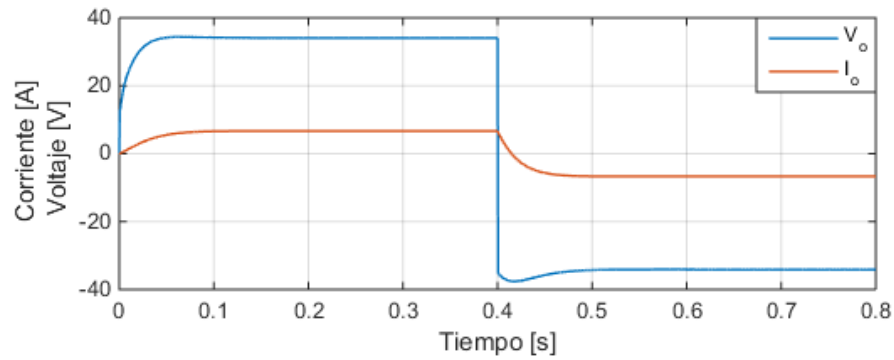
En la Figura 4.6 (a) y (b) se presentan los resultados obtenidos bajo la condición mencionada y los parámetros del sistema se encuentran tabulados en la Tabla 4.3.

En los resultados obtenidos, se aprecia que el condensador se mantiene cargado en toda la operación al doble del voltaje de las baterías y gracias a la configuración de los estados de conmutación, la tensión de salida inicialmente es de 37 [V] hasta $t = 0.4$ [s] y posterior a ese instante, se tiene una tensión de -37 [V], con esto se comprueba la capacidad de obtener una tensión de salida de naturaleza continua que puede ser de polaridad positiva o negativa.

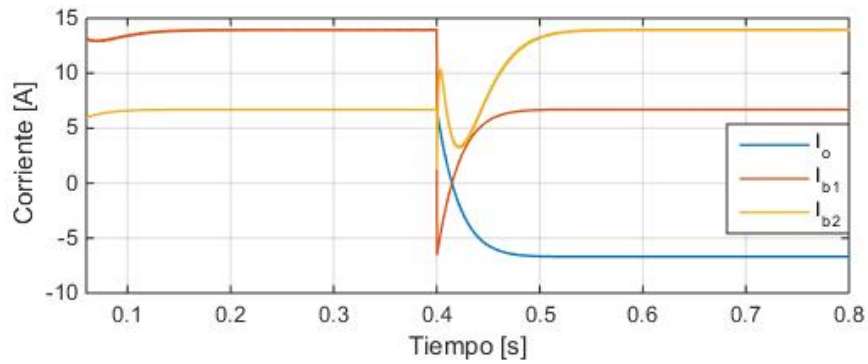
Al analizar los perfiles de corriente, se tiene que para el nivel $L = 3$ la batería 1 opera como fuente de tensión para un convertidor DC – DC elevador con el fin de mantener cargado el condensador, mientras que la batería 2 se encarga de suministrar energía a la carga RL. Para el nivel $L = -3$, la batería 1 se encarga de suministrar energía a la carga RL, mientras que la batería 2 actúa como fuente de tensión de un convertidor DC – DC elevador, con el fin de mantener cargado el condensador. Mediante la configuración de los estados de conmutación y gracias a la topología de puente H de los módulos, se logra obtener una corriente de salida positiva o negativa.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.6: Resultados de simulación con una salida de naturaleza continua.
 (a) Tensiones DC. (b) Señales de salida. (c) Perfiles de corriente

4.5. Discusión y Conclusiones

Al realizar la interconexión del sistema alterno y el sistema continuo, se logra ratificar las características del convertidor mencionadas en el desarrollo del trabajo, en donde la energía se transfiere entre los módulos de manera eficiente a pesar de que los dispositivos almacenadores de

energía tengan distintos niveles de tensión, esto se realiza con el fin de cargar el condensador a un nivel de tensión arbitrario. Con los resultados obtenidos, se ratifica que mientras se cumpla la condición de corriente permanente en el inductor conmutado, el MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado permite el uso de configuraciones asimétricas de los módulos.

Dependiendo de la secuencia de los estados de conmutación, es posible obtener una tensión de naturaleza alterna de buena calidad en cuanto a forma de onda o una tensión de salida de naturaleza continua. Debido al creciente uso del vehículo eléctrico, se abre un abanico de aplicaciones para este convertidor, ya que con la misma configuración y sin realizar ningún cambio se puede obtener una salida alterna o continua.

En este trabajo, los convertidores DC – DC se controlan en lazo abierto, mientras que en la AC se realizó un control mediante la tabla de estados propuesta. Gracias a esto, no fue necesario la implementación de controladores PI para lograr un óptimo control en el convertidor.

Capítulo 5. Balance del SOC

5.1. Introducción

Para obtener un mayor aprovechamiento de la energía de la batería, es primordial obtener su estado de carga (SOC), este parámetro indica la carga disponible y necesita ser controlado con precisión mediante algoritmos para ser incorporados al sistema de gestión de la batería (BMS) con el fin de asegurar un mejor uso. En la literatura existen distintos métodos de la estimación del SOC, entre los que destacan los métodos electroquímicos, contables, basados en modelos y orientado a datos.

Para realizar el balance del SOC de las baterías del MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado se realiza la estimación del SOC mediante el método contable, también conocido como contador de Coulomb [15] – [17], el cual consiste en una integración de la corriente durante el proceso de carga y descarga. Este método tiene una precisión media, ya que depende en gran medida de la precisión de los sensores de corriente y la estimación del SOC inicial, además es de una fácil implementación.

Tener una precisa estimación del SOC proporciona la energía precisa que tiene la batería y así facilita el control que se le debe realizar a la aplicación, evitando daños irreversibles en la estructura interna de la batería y asegurando una utilización óptima. Por otra parte, una mala estimación en el SOC afecta directamente la autonomía operativa de la batería y reduce su vida útil.

El equilibrio de las baterías por medio del SOC se divide principalmente en equilibrio pasivo y equilibrio activo. El equilibrio pasivo descarga directamente la batería con mayor SOC y su ventaja radica en la simplicidad de su estructura, pero trae como consecuencia un desprendimiento de energía, por ende, este método de equilibrio no presenta una gran eficiencia. El equilibrio activo consta en transferir energía desde la batería con el SOC más alto a la batería que tiene un menor SOC [18]. Para cumplir los objetivos de este trabajo, se realiza el balance del SOC de las baterías mediante el equilibrio activo, por lo tanto, mediante la topología del MMSPC con transferencia de

energía del tipo inductor conmutado, se propone que las baterías compartan energía de tal forma que se produzca un balance inherente.

5.2. Estrategia de balance del SOC

En las aplicaciones donde se busca almacenar energía en baterías, los paquetes de baterías son conectados en serie y paralelo para lograr un voltaje y potencia deseable. Sin embargo, las características de las baterías se ven afectadas por diversos factores, como la diferencia en la degradación por la edad. Debido a esta diferencia en las baterías, algunas de ellas se tienden a cargar o descargar más rápido. En cada ciclo de carga/descarga, la batería con menor capacidad se debilitará más rápido hasta que falle [19], lo que compromete la confiabilidad del sistema. Es por esto, que es crítico mantener las baterías operando con un estado de carga uniforme.

Bajo este contexto, una de las características destacadas del MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado, es que permite que el balance del SOC de las baterías sea inherente, ya que en los estados redundantes ($L = -1, 0, 1$), las baterías pueden compartir energía entre ellas, de tal modo que la batería que tiene una mayor carga sea capaz de suministrar energía a la batería que tiene una menor carga. Por lo tanto, mediante esta topología se propone un balance del SOC eficiente, ya que las únicas pérdidas que se tienen en la transferencia de energía entre módulos se deben a la eficiencia de los convertidores DC – DC.

De este modo, en la Figura 5.1 se presenta la técnica de control para la transferencia de energía de la batería 1 a la batería 2 [5].

En la Figura 5.1, se propone que la batería 1 tiene un mayor estado de carga que la batería 2, bajo esta condición, el primer convertidor DC – DC actúa como elevador, ya que eleva la tensión del condensador al doble (25 [V]), y el segundo convertidor DC – DC actúa como reductor, reduciendo a la mitad la tensión de salida de este condensador. Estos niveles de tensión se obtienen cuando los ciclos de trabajo de las etapas DC – DC son igual a 0.5.

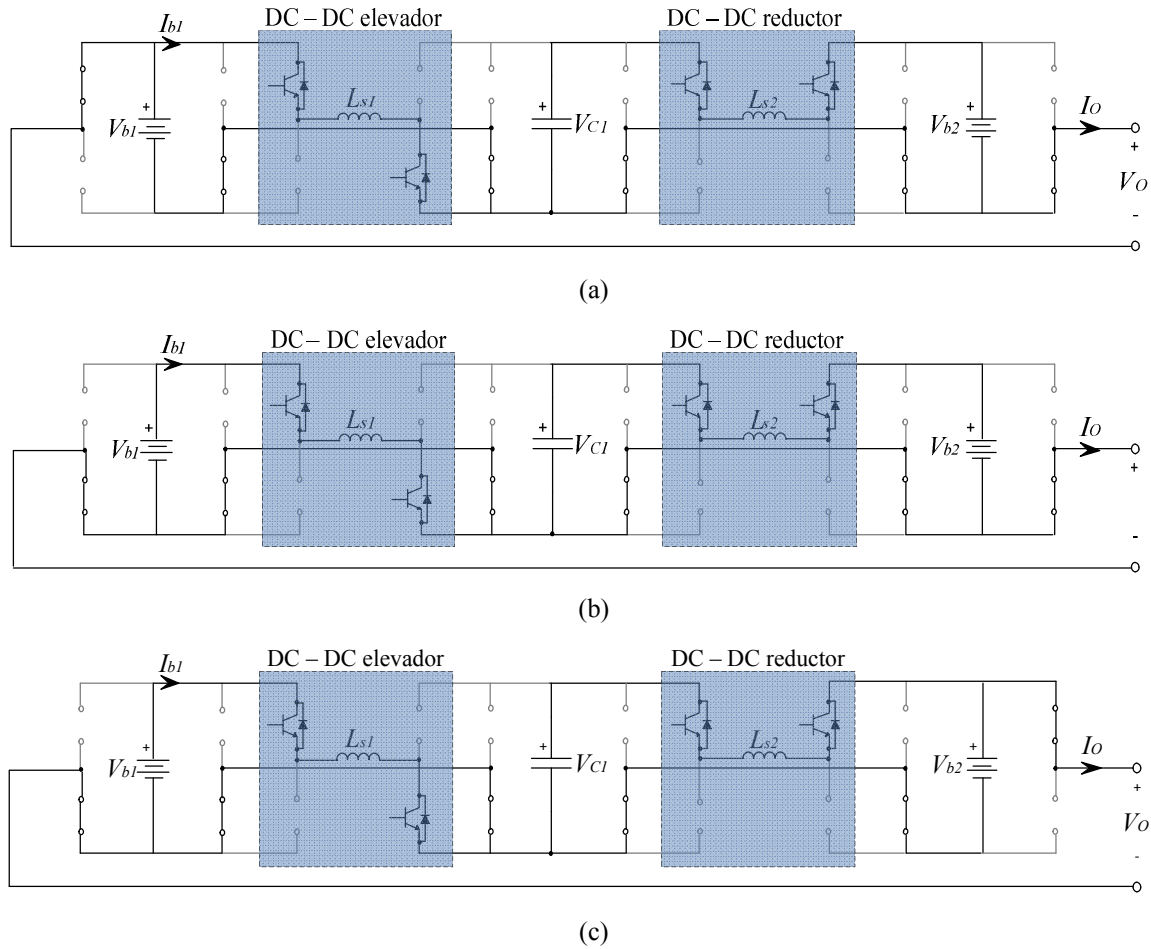


Figura 5.1: Estados de conmutación para la topología del MMSPC con transferencia de energía tipo inductor conmutado con transferencia de energía de la batería 1 a la batería 2 (a) Nivel de tensión de salida igual a $-V_b$; (b) Nivel de tensión de salida igual a $0[V]$; (c) Nivel de tensión de salida igual a V_b .

Con las características descritas de las etapas DC – DC, ocurre un fenómeno en la corriente, el cual tiene un efecto en la corriente de salida del condensador desde la etapa DC – DC 2 hacia la batería 2. Debido a que la etapa DC – DC 2 actúa como reductora, la corriente de salida aumenta al doble de la corriente de entrada (en este caso, la corriente de salida es la que entra a la batería 2), de esta forma se logra una transferencia de energía entre los módulos 1 y 3 respectivamente utilizando el condensador como interfaz.

La operación del MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado, con un estado de carga uniforme entre las baterías, se logra mediante la configuración de las etapas DC – DC descritas (bajo la condición que el SOC de la batería 1 es mayor al de la batería 2) y el control de los estados de conmutación.

En la Tabla 5.1, se presentan los estados de conmutación, para obtener un balance en el estado de carga de las baterías.

Tabla 5.1: Estados de conmutación para el balance del SOC, con una relación de tensión 1:2:1

L	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{d1}	S_{d2}	S_{d3}	S_{d4}	S_{21}	S_{22}	S_{23}	S_{24}	S_{d5}	S_{d6}	S_{d7}	S_{d8}	S_{31}	S_{32}	S_{33}	S_{34}
4	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0
3	0	1	0	1	1	0	0	d_1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0
2	0	1	0	1	1	0	0	d_1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1
1	0	1	0	1	1	0	0	d_1	0	1	0	1	d_2	0	1	0	0	1	1	0
0	0	1	0	1	1	0	0	d_1	0	1	0	1	d_2	0	1	0	0	1	0	1
-1	1	0	0	1	1	0	0	d_1	0	1	0	1	d_2	0	1	0	0	1	0	1
-2	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	d_2	1	0	0	1	0	1
-3	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	d_2	1	0	0	1	0	1
-4	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1

En la Tabla 5.1 se presentan los estados de conmutación, con los cuales se logra una transferencia de energía desde la batería del primer módulo hacia la batería del tercer modulo, con el fin de obtener un balance en el estado de carga de las baterías. Una vez que se haya realizado el balance del estado de carga, el convertidor operará con los estados de conmutación propuestos en la Tabla 4.1.

Por otra parte, mediante la herramienta Simulink del software Matlab se puede obtener directamente el SOC de la batería. Debido a que el objetivo de este trabajo es realizar el balance del SOC de las baterías, se procede a obtener el estado de carga mediante el método de contador de Coulomb [15], [16], el cual se basa la relación (5.1).

$$SOC(t) = SOC_0 + \frac{\int_{t_0}^{t_0+\tau} I_{bat} \Delta\tau}{Q_{nominal}} * 100 \quad (5.1)$$

Donde,

$SOC(t)$: Estado de carga final.

SOC_0 : Estado de carga inicial.

- I_{bat} : Corriente de la batería.
 $\Delta Q_{nominal}$: Capacidad nominal.
 ΔT : Variación del tiempo.

Al analizar la relación propuesta, por el método de contador de Coulomb se logra apreciar que si la batería tiene una corriente igual a 0 [A], el SOC final será igual al SOC inicial, además, si la corriente de la batería es positiva el SOC final será mayor al SOC inicial, por lo tanto, la batería está en modo carga, entonces, mediante la relación (5.1), una corriente positiva significa que está ingresando corriente a la batería. Por otra parte, una corriente negativa trae como consecuencia que el SOC final sea menor que el SOC inicial, por lo tanto, la batería está en modo descarga, entonces, mediante la relación (5.1), una corriente negativa será la que está saliendo de la batería en dirección a la carga o hacia el módulo en que la batería tiene un menor SOC.

La relación que modela el estado de carga se puede representar de mejor forma mediante la Figura (5.2).

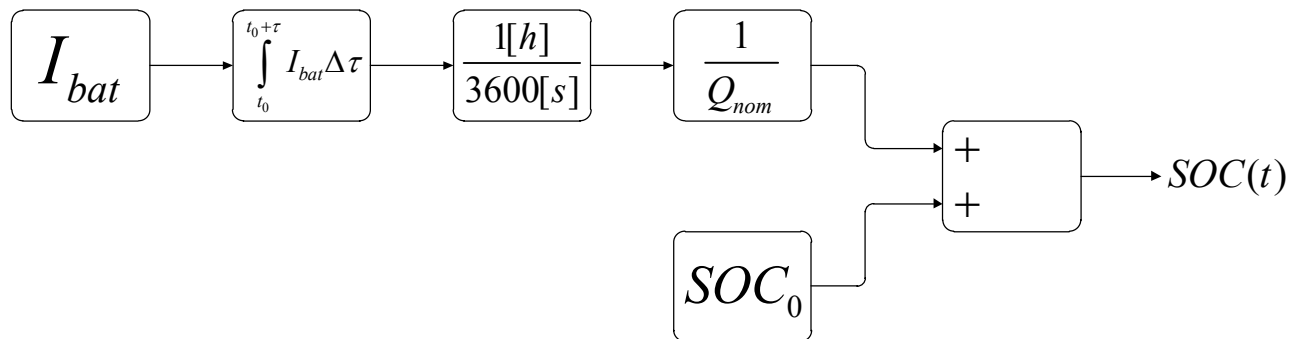


Figura 5.2: Diagrama de bloques de la relación del SOC

En la Figura 5.2 y la relación (5.1), se logra comprender que tener una batería con una capacidad nominal alta es una ventaja desde el punto de vista de la descarga, ya que con esta característica la batería tardara más en descargarse, pero desde el punto de vista de la carga, tener una capacidad alta trae como consecuencia que la batería tarde en cargar, para realizar una carga más rápida se debe cargar la batería con una corriente mayor a la corriente nominal de la batería.

A continuación, se presenta los resultados de una simulación en donde se propone la transferencia de energía entre baterías de Ion – Litio desde el módulo 1 al módulo 3 utilizando el condensador como interfaz, en donde la carga corresponde a una resistencia conectada en serie con un inductor (carga RL). Los parámetros del sistema se encuentran tabulados en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Parámetros del Sistema.

Parámetro	Valor	
Frecuencia de la señal portadora de las etapas DC – DC.	20	kHz
Condensador	33	mF
Resistencia de carga	5.1	Ω
Inductancia de carga	115	mH
Inductancia L_{gr1}	215	μ H
D	0.5	
Voltaje de baterías	12.5	V
SOC de batería 1	90	%
SOC de batería 2	87	%
Capacidad nominal de batería 1	0.05	Ah
Capacidad nominal de batería 1	0.05	Ah

Mediante los parámetros tabulados en la Tabla 5.2, se presentan los resultados de la operación del MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado. Con estos parámetros se busca realizar un equilibrio en las baterías y que estas procedan a descargarse en una banda del 2% en el SOC. Cuando se obtiene el balance del SOC entre las baterías, el convertidor operará con los estados de conmutación presentados en la Tabla 4.1, ya que estos estados de conmutación promueven una descarga simétrica entre las baterías, lo que aumenta la vida útil de ellas.

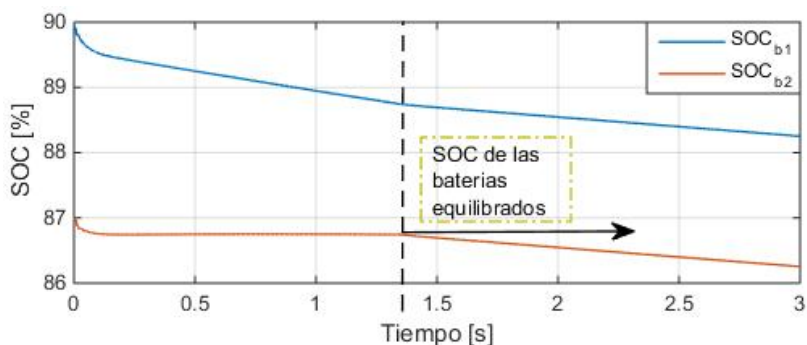


Figura 5.3: SOC de las baterías.

En la Figura 5.3 se tiene el SOC de cada batería, mediante este gráfico se puede apreciar la importancia del equilibrio activo del SOC, ya que este método de equilibrio promueve la transferencia de energía entre las baterías sin la necesidad de descargar la batería que tiene un estado de carga más alto. La transferencia de energía entre los módulos se realiza mediante el control de las etapas DC – DC y los estados de conmutación, específicamente, en este caso se transfiere energía desde la batería del módulo del extremo izquierdo al módulo del extremo derecho, con el fin de promover una descarga simétrica de las baterías del MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado

Se aprecia que la batería 2 mantiene un estado de carga estable hasta que la batería 1 se descargue a tal punto de que exista una banda del 2% entre los SOC de las baterías, una vez que se obtiene esta diferencia, ambas baterías presentan un uso simétrico. Por otra parte, cabe recalcar que la transferencia de energía del tipo inductor conmutado entre las baterías se realiza en los estados redundantes del convertidor ($L = -1, 0, 1$), como se aprecia en la Tabla 5.1.

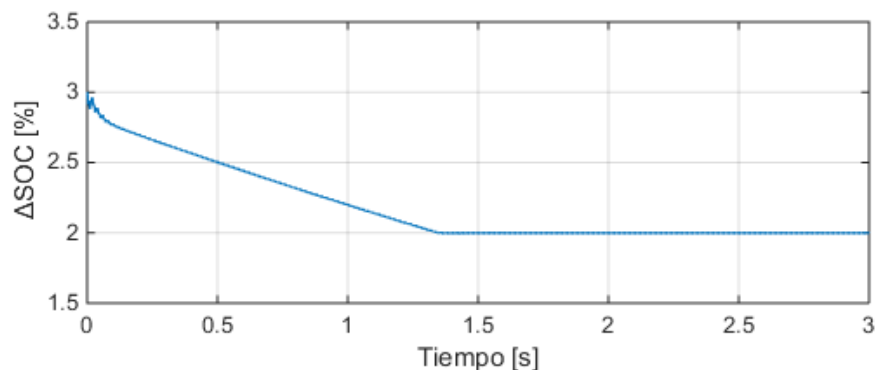


Figura 5.4: Delta del SOC de las baterías

En la Figura 5.4 se aprecia la diferencia del estado de carga entre las baterías, se tiene que posterior a que se logra el balance del SOC de las baterías, la configuración del MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado promueve el uso simétrico de las baterías, por lo tanto, se prolonga la vida útil de las baterías y se les da un uso eficiente.

Mediante los resultados presentados en las Figuras 5.3 y 5.4, se obtiene una operación uniforme para todo el sistema después de 1.4 [s] aproximadamente. Se debe considerar que las baterías tienen una capacidad muy pequeña, esto con el fin de apreciar de forma rápida el efecto de

la transferencia de energía y el balance del SOC, ya que como se mencionó, mientras mayor es la capacidad de la batería, el tiempo de carga/descarga es más lento.

Para brindarle validez a la estimación del SOC de las baterías propuesto, se presenta el error producido por la implementación del diagrama de bloques del contador de Coulomb en comparación al SOC obtenido directamente desde Simulink.

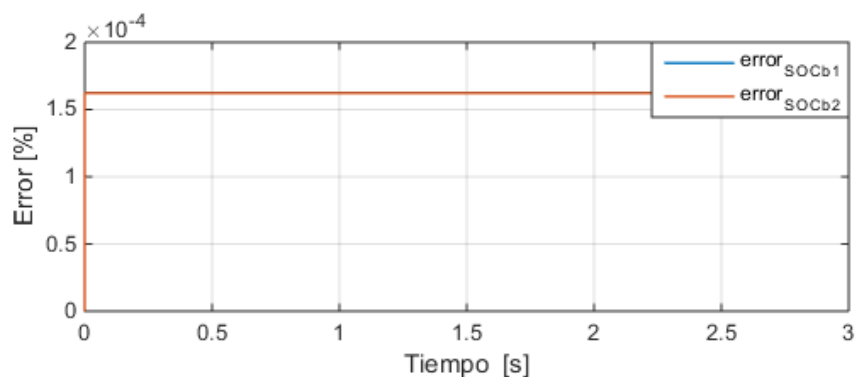
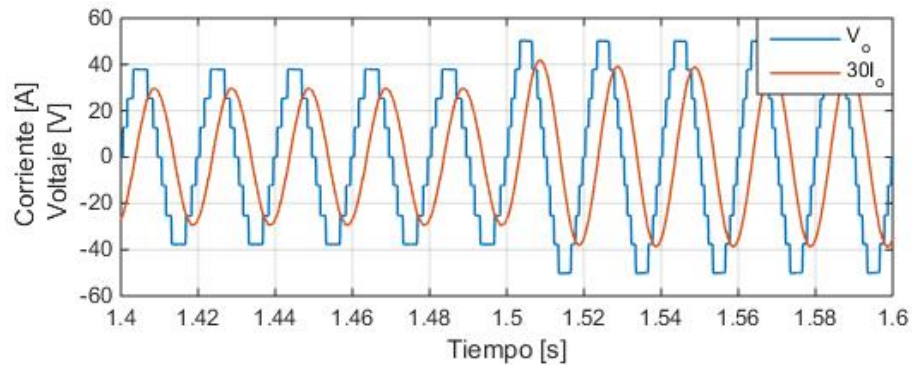


Figura 5.5: Error en la estimación del SOC

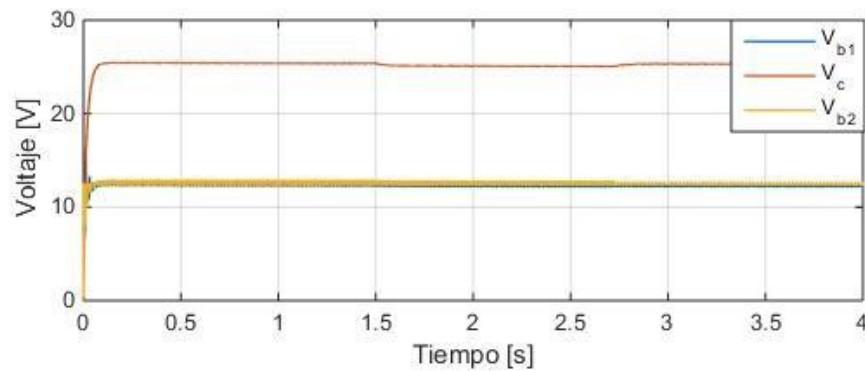
Mediante la Figura 5.5, se comprueba que el método de estimación del SOC implementado en el MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado es válido, ya que presenta un error despreciable en todo el tiempo de operación.

5.3. Voltaje de salida AC con variación del número de niveles

Como se mencionó anteriormente, una de las grandes ventajas de la configuración que se ha estudiado, es la posibilidad de obtener un voltaje de salida alterno con un número de niveles controlable y variable. En esta sección, se pretende demostrar la capacidad del MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado para obtener un voltaje alterno con un número de niveles variables y al mismo tiempo realizar el balance activo del SOC de las baterías, lo cual le brinda una mayor solidez al convertidor. Los parámetros del sistema se presentan en la Tabla 5.1



(a)

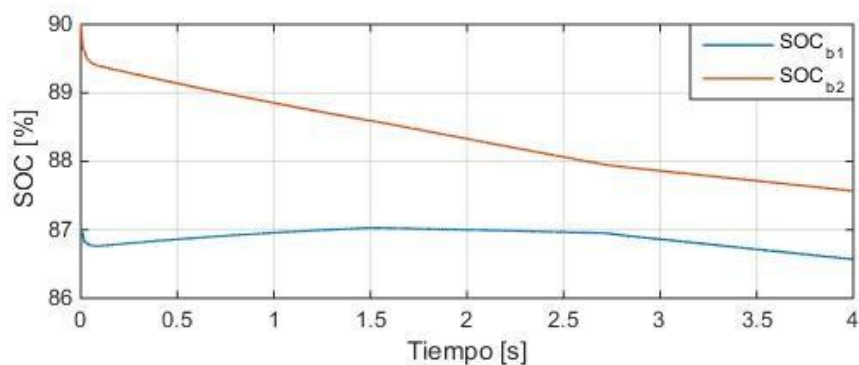


(b)

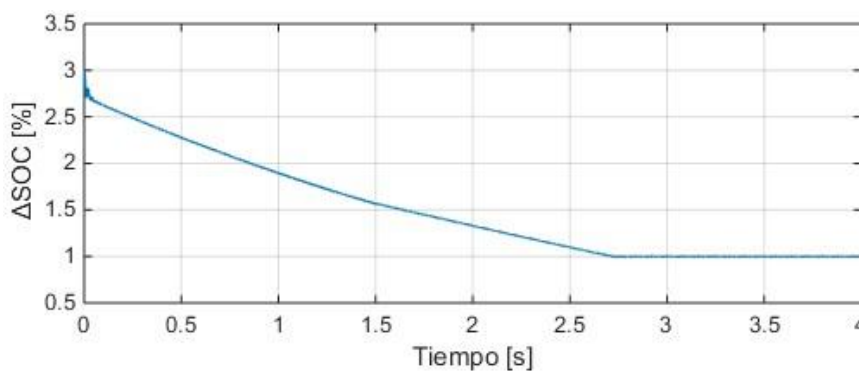
Figura 5.6: Resultados de la simulación
(a) Señales de salida AC; (b) Tensiones DC.

Mediante los resultados obtenidos en la simulación del sistema, se logra apreciar que se obtiene un voltaje de salida con el número de niveles variables, en donde en un primer instante el voltaje de salida tiene siete niveles y luego, en $t \geq 1.5$ [s] se tiene un voltaje de salida de nueve niveles, de tal forma se obtiene una corriente de salida de muy buena calidad en cuanto a THD.

A continuación, se presentan los estados de carga de las baterías.



(a)



(b)

Figura 5.7: Resultados del balance del SOC
(a) SOC de las baterías; (b) Delta del SOC de las baterías.

De acuerdo con los resultados presentados, se logra confirmar que el MMSPC puede obtener un voltaje de salida con un número de niveles variables y controlable y al mismo tiempo realizar la transferencia de energía entre los módulos del convertidor, con el fin de obtener un balance del SOC de las baterías.

En los resultados presentados en la Figura 5.7 (a) se logra apreciar que el SOC de la batería 2 se carga hasta $t = 1.5$ [s], lo cual se debe a que en tres de los siete niveles de tensión que se tiene hasta ese instante, la batería 1 está siendo cargada, luego el número de niveles del voltaje de salida aumenta y el balance del SOC se realiza más lento, esto se debe a que ahora en tres de los nueve niveles se está cargando la batería 1. Por lo tanto, para un voltaje de salida de siete niveles el balance del SOC se realiza más rápido debido a que la batería que tiene menor carga está siendo cargada un mayor tiempo.

Por otra parte, se destaca que, en el balance activo del SOC de las baterías, el delta al que se desea realizar el equilibrio es controlable y arbitrario, ya que, para los resultados obtenidos en este

apartado, se definió un delta de 1%. Reducir el delta del SOC en las baterías tiene la ventaja de que las baterías tendrán un mayor equilibrio al momento de descargarse, pero esto trae como consecuencia un mayor uso de las etapas DC – DC, por lo tanto, se obtienen mayores pérdidas por conmutación. Al operar el convertidor con un balance del SOC de las baterías con un mayor delta, las etapas DC – DC presentan una menor conmutación, por lo tanto, disminuyen las pérdidas por conmutación.

5.4. Discusión y Conclusiones

Si se compara la estimación del SOC mediante Simulink y la estimación del SOC propuesta, se comprueba que el método propuesto es válido debido a que tiene un error despreciable. Se debe considerar que la relación (5.1) depende del SOC inicial, por ende, este parámetro debe ser exacto, ya que de no ser así, puede arrojar errores de acumulativos [15] – [17].

La estrategia de control que se utilizó para balancear los SOC de las baterías, fue bajo la condición que el SOC de la batería 1 es mayor al SOC de la batería 2, para el caso opuesto, se debe considerar que el convertidor DC – DC 2 debe operar como elevador para mantener la tensión del condensador elevada y el convertidor DC – DC 1 debe operar como reductor.

Con respecto al voltaje de salida DC, solo es posible realizar el balance del SOC y obtener un voltaje de salida DC para los niveles $L = -1, 0, 1$ ya que para los demás niveles no se logra realizar la transferencia de energía entre los módulos debido a que no tienen estados redundantes en los cuales se puede controlar dicha transferencia de energía.

En conclusión, la estructura del MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado añade la característica de una descarga simétrica de las baterías, gracias al control de los estados de conmutación y las etapas DC – DC. Con esto, se logra obtener un equilibrio activo del SOC de las baterías.

Se destaca la flexibilidad del MMSPC propuesto, ya que mediante el control del ciclo de trabajo de las etapas DC – DC y los estados de conmutación, se puede obtener un voltaje de salida

alterno con un numero de niveles variable y controlable. Adicionalmente, la transferencia de energia entre los modulos se puede controlar mediante el delta al que se desea realizar el equilibrio del SOC, ya que, este parametro es completamente arbitrario.

Capítulo 6. Conclusiones

6.1. Sumario

En este trabajo se realizó una revisión al estado del arte de distintas tecnologías de baterías como Plomo – Acido, Sodio – Azufre, Níquel – Cadmio e Ion – Litio, esta revisión se llevó a cabo con el fin de determinar la mejor alternativa para construir y simular el MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado, y debido a las buenas características en cuanto a densidad e energía, voltaje por celda y número de ciclos se tomó la determinación de escoger la batería de Ion – Litio, por lo tanto, todos los resultados obtenidos fueron con esta tecnología inserta en el convertidor [10] – [12].

Posterior a lo descrito, se llevó a cabo un estudio de la topología del MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado [5], para esto se debe comprender el sistema alterno (compuesto por un convertidor puente H en cascada de tres módulos) [7], [8] y el sistema continuo (compuesto por convertidores DC – DC conmutados, especialmente, elevador y reductor) [2], [3] con el fin de que los parámetros MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado cumplan con el requisito de corriente permanente en el inductor.

Luego de comprender el sistema alterno y continuo del convertidor, se realiza una interconexión de los sistemas mencionados con el fin de estudiar el funcionamiento del MMSPC con voltaje de salida alterno, el cual tiene la característica de tener un número de niveles controlado y variable, y un voltaje de salida continuo el cual puede ser positivo o negativo. Obtener un voltaje de salida con mayor número de niveles ofrece obtener señales de salida de corriente y voltaje de mayor calidad y menor distorsión armónica, por otra parte, obtener un voltaje de salida DC abre las puertas a distintas aplicaciones y nuevos estudios a esta configuración.

En el capítulo final de este trabajo, se implementa un contador de Coulomb para estimar el estado de carga de las baterías y se logró comprobar la validez de este método. Luego se presenta la estrategia que se implementó para lograr la transferencia de energía entre los módulos y así obtener el balance activo del SOC de las baterías.

6.2. Conclusiones

Ya que en las aplicaciones de electro movilidad se necesita tener baterías con buenas características de energía y potencia específica, debido a que unas de las principales virtudes de dichas aplicaciones son asegurar el suministro de energía permanente y tener un peso ligero, y ya que en el MMSPC el condensador emula el funcionamiento de una batería. Bajo estas condiciones y el estudio del arte realizado a distintas tecnologías de baterías, se tiene que la mejor tecnología de batería para la implementación del MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado es la batería de Ion – Litio.

Mediante el estudio de los convertidores DC – DC, se logra comprobar que para la construcción del MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado, primeramente, se debe realizar el análisis de la corriente permanente en el inductor, de no cumplirse esa condición, el convertidor no va a operar de forma deseada, ya que no se cumpliría la relación del voltaje y la corriente de salida del convertidor DC – DC. Es por esto, que toma gran importancia la elección de los parámetros que constituyen el MMSPC estudiado.

En el modelo del MMSPC se debe destacar que las etapas DC – DC pueden actuar de forma elevadoras o reductoras, esto es controlado mediante los estados de conmutados propuestos para cada nivel y el monitoreo que se tiene sobre el estado de carga de las baterías, ya que si la diferencia del estado de cargas de las baterías es mayor a la que se desea tener, una etapa DC – DC actuara de forma elevadora y la otra como reductora, pero si la diferencia del estado de carga de las baterías es menor o igual a la deseada, ambas etapas DC – DC actuaran como elevadoras. Adicionalmente, se destaca la ventaja de obtener un voltaje de salida con numero de niveles variables y controlables, ya que con un voltaje de salida de nueve niveles se obtiene una señal de corriente y voltaje con menor distorsión armónica que con un voltaje de salida de siete niveles.

La implementación del balance del SOC del MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado ha sido realizada mediante el método de contador de Coulomb y el equilibrio activo de las baterías, esta implantación ha sido validada en los resultados obtenidos en la sección 5.2, ya que el error obtenido bordea el $1.6 \times 10^{-4}\%$, lo cual es despreciable para el SOC que se obtuvo.

Gracias a esto, se logra añadirle una fuerte característica de equilibrio al MMSPC propuesto, ya que promueve una condición de trabajo y descarga simétrica para ambas baterías, a pesar de que las baterías son independientes. Por otra parte, si se desea llevar a cabo la construcción del MMSPC con transferencia de energía del tipo inductor conmutado se debe tener precaución con la estimación del SOC inicial, ya que una mala estimación puede arrojar errores acumulativos en la estimación del SOC final, lo que puede traer como consecuencias daños irreversibles en la estructura interna de las baterías.

6.3. Trabajo Futuro

Estudiar la posible extensión módulos del MMSPC con transferencia de energía del tipo conmutado y realizar el balance del SOC de las baterías, ya que al ser un convertidor que presenta un voltaje salida alterna con numero de niveles controlable y variables o un voltaje de salida continuo demuestra que es una topología que tiene un gran potencial tanto en investigación como en aplicaciones.

Por otro lado, sería interesante modelar el balance del SOC de las baterías con un método de estimación que no dependa del SOC inicial, para evitar errores acumulativos.

Bibliografía

- [1] Hernán Valencia Gallón, “Fundamentos de la electrónica industrial”, 2013.
- [2] Muhammad H. Rashid. “Electrónica de Potencia, Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones”. México. 3° Edición, capítulo 6. Prentice Hall, 2004.
- [3] W. Hart Daniel, “Electrónica de Potencia”, capítulo 6, 1997.
- [4] Mauricio González, “Estudio de un Inversor Multinivel monofásico basado en inversores puente completo conectados en cascada para la realización de un compensador sincrónico estático (STATCOM)”, Habilitación Profesional, Ingeniero Civil Electrónico, 2006, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- [5] R. Lizana, S. Rivera, Z. Li, J. Luo, A. V. Peterchev and S. Goetz, "Modular Multilevel Series/Parallel Converter with Switched-Inductor Energy Transfer Between Modules", 2018.
- [6] H. Zhang, L. Luo, L. Jia, L. Yang and S. Yang, "An Improved Sub-Module Topology for Protecting MMC Power Devices under DC-side Short Circuit Fault," 2018.
- [7] A. Prayag and S. Bodkhe, "A comparative analysis of classical three phase multilevel (five level) inverter topologies," 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), Delhi, 2016.
- [8] M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Rodriguez and M. A. Perez, "A Survey on Cascaded Multilevel Inverters," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 7, pp. 2197-2206, July 2010.
- [9] S. M. Goetz, Z. Li, X. Liang, C. Zhang, S. M. Lukic and A. V. Peterchev, "Control of Modular Multilevel Converter With Parallel Connectivity—Application to Battery Systems," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 11, pp. 8381-8392, Nov. 2017.
- [10] J. Haase et al., "Analysis of batteries in the built environment an overview on types and applications," IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Beijing, 2017.
- [11] Aoxia Chen and P. K. Sen, "Advancement in battery technology: A state-of-the-art review," 2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Portland, OR, 2016.
- [12] N. Chatrung, "Battery Energy Storage System (BESS) and Development of Grid Scale BESS in EGAT," 2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD

- Asia), Bangkok, Thailand, 2019.
- [13] A. Ghosh and S. S. Saran, "High gain DC-DC step-up converter with multilevel output voltage," 2018 International Symposium on Devices, Circuits and Systems (ISDCS), Howrah, 2018.
- [14] M. S. Bhaskar Ranjana, N. S. Reddy and R. K. Pavan Kumar, "Non-isolated dual output hybrid DC-DC multilevel converter for photovoltaic applications," 2014 2nd International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS), Combiatore, 2014.
- [15] Ines Baccouche, Sabeur Jemmali, Asma Mlayah, Bilal Manai, Najoua Essoukri Ben Amara, "Implementation of an Improved Coulomb-Counting Algorithm Based on a Piecewise SOC-OCV Relationship for SOC Estimation of Li-Ion Battery", 2017 International Journal of Renewable Energy Research, 2017.
- [16] A. Nugroho, E. Rijanto, F. D. Wijaya and P. Nugroho, "Battery state of charge estimation by using a combination of Coulomb Counting and dynamic model with adjusted gain," 2015 International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA), Bandung, 2015, pp. 54-58.
- [17] I. Baccouche, A. Mlayah, S. Jemmali, B. Manai and N. Essoukri Ben Amara, "Implementation of a Coulomb counting algorithm for SOC estimation of Li-Ion battery for multimedia applications," 2015 IEEE 12th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD15), Mahdia, 2015, pp. 1-6.
- [18] Y. Xu and T. Zhang, "A Hierarchical Structure Approach of Battery Balancing Based on SOC," 2018 Chinese Automation Congress (CAC), Xi'an, China, 2018, pp. 1217-1222.
- [19] X. Yang, H. Jiang and Z. Deng, "Design of a Battery Management System based on matrix switching network," 2015 IEEE International Conference on Information and Automation, Lijiang, 2015, pp. 138-141.