



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE TOPOLOGÍAS CONMUTADAS DE CONVERTIDOR
PARA LA ENERGIZACIÓN DE ELECTROLIZADORES**

POR

Danitza Yamilet Urrutia Neira

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción
para optar al título profesional de Ingeniera Civil Eléctrica

Profesor Guía
Leonardo M. Palma F.

Octubre 2023
Concepción (Chile)

© 2023 Danitza Yamilet Urrutia Neira

© 2023 Danitza Yamilet Urrutia Neira

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.



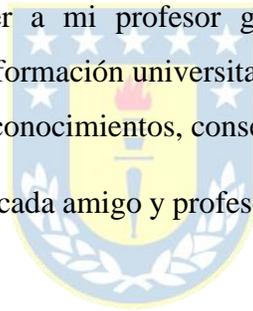
Agradecimientos

Quiero expresar mis agradecimientos a mis padres, Danaes y José, que me han brindado apoyo y me inculcaron los valores de fortaleza y perseverancia que fueron fundamentales para enfrentar la vida y llevar a cabo mi formación personal durante este periodo, a mis hermanos, Vanessa, Alexis y Alejandra, que han estado a mi lado durante casi la mayor parte de mi vida dándome ánimos, comprensión y celebrando juntos cada uno de nuestros triunfos, y quiero agradecer de igual manera a mis abuelos, Norma y Víctor, que han confiado en mí desde pequeña y han estado presente en todo momento.

También quiero expresar mis agradecimientos a mi pareja, Ignacio, que me ha alentado a crecer, a alcanzar mis objetivos y a creer en mis capacidades, además de brindarme siempre su gran apoyo.

También me gustaría agradecer a mi profesor guía, Sr. Leonardo Palma, que ha contribuido durante los años de mi formación universitaria y en la realización de la presente memoria de título con sus amplios conocimientos, consejos y apoyo.

Y finalmente quiero agradecer a cada amigo y profesor que estuvo presente durante todos estos años, a todos muchas gracias.



Sumario

Este trabajo de memoria de título se enmarca en la necesidad existente de encontrar alternativas que disminuyan las emisiones de componentes contaminantes al medio ambiente, que en el área energética se traduce a obtención de energía a partir de fuentes más limpias. Uno de los métodos para obtener energía limpia es a través de electrolizadores, que requieren convertidores para realizar la interface desde las diferentes fuentes de alimentación. La presente memoria se centra en el análisis y comparación de topologías conmutadas de convertidores para la energización de electrolizadores, con el objetivo de identificar aquellas con mejores prestaciones en términos de calidad de corriente de entrada y salida y de eficiencia en la conversión de energía.

Es así que en este trabajo se estudian las topologías convertidor reductor clásico, convertidor reductor intercalado y convertidor de modo de conmutación LLC en el caso de los convertidores de tipo CC a CC, donde tras una comparación en cuanto a calidad de las formas de onda de corriente, eficiencia y complejidad, entre otros aspectos, se determinó que la topología del convertidor reductor intercalado presenta mejores características.

Por otro lado, en la búsqueda de topologías de convertidores de tipo CA a CC se decide estudiar el puente de tiristores de 6 pulsos, rectificador de 12 pulsos, rectificador reductor intercalado de 3 fases y rectificador modular multicelda (MMR). Tras la comparación de las topologías se obtuvo que el MMR posee las mejores características, ya que a plena carga presenta factor de potencia de 0,99, distorsión armónica total de 2,55%, alta eficiencia además de una disminución de costos al usar un transformador de alta frecuencia, también se tienen los beneficios de disponer de una gran cantidad de módulos en paralelo, lo que aporta en la distribución y disminución de pérdidas de potencia entre los módulos de las celdas.

Como resultado de lo anterior, y a partir del análisis y simulaciones de la topología MMR alimentando un electrolizador, se obtiene un factor de potencia prácticamente unitario, distorsión armónica total de 2,54% y una eficiencia de 85,68% en condiciones de carga nominal, confirmando con los resultados arrojados que es una buena opción para la alimentación de plantas electrolizadoras.

Summary

This thesis is situated within the current need to find alternatives to reduce emissions of environmental pollutants, which in the energy sector translates to obtaining energy from cleaner sources. One of the methods to obtain clean energy is through electrolyzers, which require converters to interface with different power sources. The present study focuses on the analysis and comparison of switched converter topologies for powering electrolyzers, with the aim of identifying those with better performance in terms of input and output current quality and energy conversion efficiency.

In this work, the classic buck converter, interleaved buck converter, and LLC resonant converter topologies are studied in the case of DC to DC converters. After comparing aspects such as current waveform quality, efficiency, and complexity, among others, it was determined that the interleaved buck converter topology exhibits superior characteristics.

On the other hand, in the exploration of AC to DC converter topologies, the study includes the 6-pulse thyristor bridge, 12-pulse rectifier, interleaved three-phase rectifier, and the modular multicell rectifier (MMR). Comparing these topologies revealed that the MMR has the best attributes. At full load, it exhibits a power factor of 0.99, total harmonic distortion of 2.55%, high efficiency, along with cost savings by using a high frequency transformer. Additionally, the MMR allows for a large number of parallel modules, contributing to power distribution and reducing losses among the cell modules.

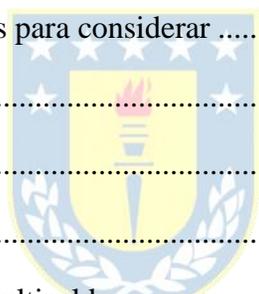
As a result of these findings, coupled with the analysis and simulations of the MMR topology supplying electrolyzing plants, we achieved a power factor of 0.9999, a total harmonic distortion of 2.54%, and an efficiency of 85.68% under nominal load conditions. These outcomes affirm the viability of the MMR topology as a compelling choice for supplying electrolyzing plants.

Tabla de contenidos

Lista de Tablas	8
Lista de Figuras	10
Capítulo 1 Introducción	17
1.1 Problemática actual: Descarbonización de la matriz eléctrica	17
1.2 Retos de los sistemas eléctricos con alto aporte de energías renovables.	17
1.3 Situación del hidrógeno.....	18
1.4 Convertidores para obtención de nuevas energías	19
1.5 Objetivos	20
1.5.1 Objetivo general.....	20
1.5.2 Objetivos específicos	20
1.5.3 Alcances	20
Capítulo 2 Obtención de Hidrógeno	21
2.1 Hidrógeno verde.....	21
2.2 Plantas electrolizadoras	23
2.2.1 Principio de operación del electrolizador	24
2.2.2 Modelo	25
2.3 Impacto de la producción de H_2 en la red eléctrica.....	26
2.3.1 Impacto del convertidor que alimenta a la planta electrolizadora.	26
Capítulo 3 Estudio del principio de funcionamiento de topologías de convertidores a analizar	28
3.1 Convertidores CC a CC.....	31
3.1.1 Convertidor reductor clásico (CBC).....	31
3.1.1.1 Modelo	31

3.1.1.2	Alcances y limitaciones.....	33
3.1.2	Convertidor reductor intercalado (IBC).....	34
3.1.2.1	Modelo y funcionamiento	34
3.1.2.2	Alcances y limitaciones.....	37
3.1.3	Convertidor de modo de conmutación LLC	38
3.1.3.1	Modelo y funcionamiento	38
3.1.3.2	Alcances y limitaciones.....	41
3.2	Convertidores CA a CC.....	42
3.2.1	Puente de tiristores de 6 pulsos (6-TR).....	42
3.2.1.1	Modelo y funcionamiento	42
3.2.1.2	Alcances y limitaciones.....	44
3.2.2	Rectificador de 12 pulsos (12-TR).....	45
3.2.2.1	Modelo y funcionamiento	45
3.2.2.2	Alcances y limitaciones.....	47
3.2.3	Rectificador reductor intercalado de 3 fases (3PIBR)	47
3.2.3.1	Modelo y funcionamiento	47
3.2.3.2	Alcances y limitaciones.....	50
3.2.4	Rectificador Modular Multicelda (MMR)	51
3.2.4.1	Modelo y funcionamiento	51
3.2.4.2	Alcances y limitaciones.....	55
Capítulo 4 Análisis comparativo de topologías y selección de mejor alternativa		56
4.1	Convertidores CC a CC.....	56
4.1.1	Ondulación de corriente.....	56
4.1.2	Eficiencia	56

4.1.3	Complejidad.....	57
4.1.4	Costo	57
4.1.5	Factores adicionales para considerar	58
4.1.6	Resumen.....	58
4.2	Convertidores CA a CC.....	60
4.2.1	THD	63
4.2.2	Factor de potencia.....	64
4.2.3	Eficiencia	65
4.2.4	Complejidad.....	65
4.2.5	Costo	65
4.2.6	Factores adicionales para considerar	66
4.2.7	Resumen.....	66
Capítulo 5	Simulación	68
5.1	Electrolizador	68
5.2	Rectificador Modular Multicelda.....	69
5.3	Resultados y análisis de simulación.....	71
5.3.1	A condiciones de carga nominal.....	71
5.3.1.1	Salida.....	71
5.3.1.2	THD.....	72
5.3.1.3	Factor de potencia	73
5.3.1.4	Eficiencia.....	74
5.3.2	A condiciones de carga parcial	75
5.3.2.1	Salida.....	75
5.3.2.2	THD.....	76



5.3.2.3	Factor de potencia	77
5.3.2.4	Eficiencia.....	77
5.3.3	Bajo condiciones de desbalance en la red.....	79
5.3.3.1	Salida.....	79
5.3.3.2	THD.....	79
5.3.3.3	Factor de potencia	80
5.3.3.4	Eficiencia.....	81
Capítulo 6 Discusión y conclusiones.....		82
Anexo A: Especificaciones de parámetros utilizados en las simulaciones de las que se recopilaron datos para la comparación de topologías.....		89
Anexo B: Simulación MMR.....		91



Lista de Tablas

Tabla 4.1 Ondulación de corriente de las topologías CC/CC a analizar.	56
Tabla 4.2 Eficiencia de las topologías CC/CC a analizar.....	57
Tabla 4.3 Comparación de topologías CC/CC analizadas.....	59
Tabla 4.4. Resultados simulación de puente de tiristores de seis pulsos a 100% y 20% de la carga nominal.....	60
Tabla 4.5. Resultados simulación de rectificador intercalado de 3 fases a 100% y 20% de la carga nominal.....	60
Tabla 4.6. Resultados simulación de rectificador de tiristores de 12 pulsos sin filtro trampa pasivo a 100% y 20% de la carga nominal.	61
Tabla 4.7. Resultados simulación de rectificador de tiristores de 12 pulsos con filtro trampa pasivo a 100% y 20% de la carga nominal.	61
Tabla 4.8. Resultados simulación de rectificador modular multimodo a 100% y 20% de la carga nominal.....	61
Tabla 4.9. Resultados simulación de 12-DRMC sin filtro trampa a 100% y 20% de la carga nominal.....	62
Tabla 4.10. Resultados simulación de 12-DRMC con filtro trampa a 100% y 20% de la carga nominal.....	62
Tabla 4.11 THD de las diferentes topologías a carga nominal.....	63
Tabla 4.12 THD de las topologías a analizar a 20% de la carga nominal.	63
Tabla 4.13 PF de las topologías a analizar a carga nominal.....	64
Tabla 4.14 PF de las topologías a analizar a 20% de la carga nominal.....	64
Tabla 4.15 Eficiencia de las topologías a analizar a carga nominal.	65
Tabla 4.16 PF de las topologías a analizar a 20% de la carga nominal.....	65
Tabla 4.17 Comparación de topologías CA/CC analizadas.	67
Tabla 5.1: Parámetros y constantes del circuito equivalente de electrolizador SPE.	69

Tabla 5.2 Datos de entrada electrolizador Titan EZ-2000.....	69
Tabla 5.3: Especificaciones del módulo de celdas de MMR.....	70
Tabla 5.4: Parámetros simulación del módulo de celdas de MMR con carga nominal.	75
Tabla 5.5: Parámetros simulación del módulo de celdas de MMR con cargas parciales.....	78
Tabla 5.6: Parámetros simulación del módulo de celdas de MMR con desbalance en la red.....	81
Tabla A.1. Parámetros de simulación de puente de tiristores de seis pulsos y rectificador intercalado de 3 fases.	89
Tabla A.2. Parámetros de simulación de rectificador de tiristores de 12 pulsos.....	89
Tabla A.3. Parámetros de simulación de rectificador modular multimodo.....	89
Tabla A.4. Especificaciones del módulo de celdas MMR.....	90
Tabla A.5. Parámetros de simulación de 12-DRMC.....	90
Tabla B.1 Especificaciones técnicas celda de electrolizador de la serie Titan EZ.....	91
Tabla B.2 Parámetros para simulación del convertidor elevador tótem.....	91
Tabla B.3 Parámetros para simulación del Doble puente activo.....	91
Tabla B.4 Valores transformador de Doble puente activo.	91
Tabla B.5 Valores para los controladores PID en el control de la simulación.	92

Lista de Figuras

Fig. 2.1 Obtención de hidrógeno verde por electrólisis del agua. [10].....	22
Fig. 2.2 Electrolizador SPE. [13].....	24
Fig. 2.3 Circuito equivalente de electrolizador SPE.....	25
Fig. 3.1 Convertidor CA/CC y CC/CA. [18].....	28
Fig. 3.2 Convertidor CC/CC básico. [18].....	29
Fig. 3.3 Voltaje de salida v_0 del convertidor CC/CC básico. [18].....	30
Fig. 3.4 Esquema de conexión de un electrolizador desde la red mediante convertidores.	30
Fig. 3.5 Convertidor reductor clásico. [20]	31
Fig. 3.6 Corriente total de salida del convertidor CC/CC reductor convencional. [20]	33
Fig. 3.7 IBC convencional. [20]	34
Fig. 5.8. Formas de ondas principales de IBC convencional. [20].....	36
Fig. 3.9 Convertidor resonante LLC. [25].....	39
Fig. 3.10 Convertidor resonante LLC. [26].....	39
Fig. 3.11 Puente rectificador de tiristores de seis pulsos. [12]	42
Fig. 3.12 Formas de onda en el puente rectificador de tiristores de seis pulsos [31].	43
Fig. 3.13 Topología del rectificador de 12 pulsos [32].	45
Fig. 3.14 Rectificador reductor intercalado de 3 fases. [12].....	48
Fig. 3.15 Factor de ondulación vs. L_f y C_f para 3PIRB.....	49
Fig. 3.16 Diagrama de circuito de Rectificador Modular Multicelda (MMR).	53
Fig. 3.17 Unidad básica de la topología MMR.	53
Fig. 3.18 Configuración del convertidor elevador sin puente de tótem.	53
Fig. 3.19 Configuración del Doble puente activo.....	54

Fig. 4.1 Gráfico de radar comparativo de topologías CC/CC analizadas.....	59
Fig. 4.2 THD de las diferentes topologías a carga nominal.	63
Fig. 4.3 THD de las diferentes topologías a 20% de la carga nominal.	63
Fig. 4.4 PF de las diferentes topologías a carga nominal.	64
Fig. 4.5 PF de las diferentes topologías a 20% de la carga nominal.	64
Fig. 4.6 Gráfico de radar comparativo de topologías CA/CC analizadas.....	67
Fig. 5.1 Simulación MMR para la energización de electrolizadores.....	70
Fig. 5.2 Resultados de simulación para MMR a carga nominal (salida).....	72
Fig. 5.2 Corriente del lado de la red.	72
Fig. 5.3 Armónicos de la corriente del lado de la red.....	73
Fig. 5.4 Resultados de simulación para MMR a carga nominal (potencia).....	74
Fig. 5.5 Resultados de simulación para MMR con caída a 75% de carga nominal (salida).	75
Fig. 5.6 Resultados de simulación para MMR con caída a 50% de carga nominal (salida).	76
Fig. 5.7 Resultados de simulación para MMR con caída a 25% de carga nominal (salida).	76
Fig. 5.8 Corriente del lado de la red.	76
Fig. 5.9 Eficiencia obtenida versus porcentaje de carga.....	78
Fig. 5.10 Resultados de simulación para MMR a carga nominal con desbalance en la red (salida).	79
Fig. 5.11 Corriente del lado de la red.	80
Fig. 5.12 Resultados de simulación para MMR a carga nominal (potencia).....	80
Fig. B.1 Simulación topología Rectificador Modular Multicelda de una fase.....	92
Fig. B.2 Convertidor elevador tótem.	92
Fig. B.3 Control de convertidor elevador tótem.....	93
Fig. B.4 Doble puente activo.....	93
Fig. B.6 Control de Doble puente activo.....	93



Nomenclatura y abreviaciones

A: Ampere.

C: Coulomb.

cm: centímetro.

°C: Grados Celsius.

F: Faradio.

°F: Grados Fahrenheit.

g: gramo.

H: Henrio.

Hz: Hertz.

hr: hora.

J: Joules.

K: Kelvin.

k: kilo.

L: litro.

M: mega.

min: minuto.

n: nano.

PSI: Libra por pulgada cuadrada.

s: segundo.

S: Siemens.



V : Volts.

VA : Voltampere.

W : Watts.

Ω : Ohms.

μ : micro.

AWE: Electrolisis de agua alcalina.

CA: Corriente alterna.

CBC: Convertidor reductor clásico.

CC: Corriente continua.

COP 21: Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

DAB: Doble puente activo.

DCS: Sistema de control distribuido.

12-DRMC: Rectificador de diodos de 12 pulsos con interruptor multifásico.

EAL: Electrolizador alcalino.

FFT: Transformada rápida de Fourier.

GEI: Gases de efecto invernadero.

HFT: Transformador de alta frecuencia.

IBC: Convertidor reductor intercalado.

IGBT: Transistor bipolar de puerta aislada.

LFT: Transformador de baja frecuencia.

MFT: Transformador de media frecuencia.



MMR: Rectificador modular multicelda.

MOSFET: Transistor de efecto de campo metal-óxido semiconductor

η_A : Sobrepotencial del ánodo.

η_C : Sobrepotencial del cátodo.

η_{SPE} : Sobrepotencial de la membrana.

η_I : Resistencia de interfaz.

η : Eficiencia.

P: Potencia activa.

PEM: Membrana de intercambio de protones.

PEMWE: Electrolisis de agua con membrana de polímero.

PF: Factor de potencia.

3PIBR: Rectificador reductor intercalado de 3 fases.

PWM: Modulación por ancho de pulsos.

Q: Potencia reactiva.

RF: Factor de ondulación.

RMS: Raíz cuadrada media.

S: Potencia aparente.

SINTEF: Fundación para la investigación industrial y técnica.

SOEC: Celda de electrólisis de óxido sólido.

SPE: electrolito de polímero sólido.

THD: Distorsión armónica total.

6-TR: Puente de tiristores de 6 pulsos.



12-TR: Rectificador de 12 pulsos.

t_{off} : Tiempo de apagado.

t_{on} : Tiempo de encendido.

V_0 : Potencial de Nernst de la celda.

α : Ángulo de retardo de disparo de los tiristores.



Capítulo 1 Introducción

1.1 Problemática actual: Descarbonización de la matriz eléctrica

En la actualidad es conocido el gran problema que existe en relación con la contaminación ambiental y los daños que le ha estado causando al planeta. La emisión de gases de efecto invernadero, como por ejemplo CO₂, es una de las principales problemáticas que se están abordando hoy en día, esto debido a las grandes cantidades de este componente que se emiten diariamente por distintas entidades.

En el marco de la situación en la que se encontraba el planeta, en 2015 durante la XXI Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP 21) se negoció y adoptó el Acuerdo de París por parte de los 195 países miembros, el cual presenta un plan para combatir el calentamiento global, mantenerlo en bajos niveles y promover la reducción de emisiones a largo plazo [1]. En base a todo esto la UE busca ser climáticamente neutra para el año 2050 [2]. Es por lo antes mencionado, que uno de los objetivos que se han estado fijando cada vez más países y sectores económicos es la neutralidad de carbono, sobre todo en los sectores de energía y transporte.

Por otro lado, en la Ruta Energética 2018-2022, Chile se propuso la descarbonización de la matriz eléctrica, ya que según datos del Ministerio de Energía el 78% [3] de las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI) del país corresponden al sector energético.

En Chile las centrales eléctricas a carbón comprenden la principal fuente de generación eléctrica del país, siendo de un 40% [3], por lo que fue necesario realizar un Cronograma de retiro o reconversión de centrales a carbón, con el objetivo de lograr el retiro total antes del 2024 de las centrales a carbón que no cuenten con sistemas de captura y almacenamiento de carbono o algunas otras tecnologías equivalentes.

1.2 Retos de los sistemas eléctricos con alto aporte de energías renovables.

El principal reto que tienen los sistemas eléctricos que cuentan con un alto porcentaje de energía proveniente de fuentes renovables es lograr tener un balance entre la energía que es demandada y la

que es generada, ya que la energía proveniente de fuentes renovables puede cambiar en cualquier instante al depender de por ejemplo el viento y el sol, lo cual causa una disminución en la certeza y también aumenta la variabilidad de la operación.

En vista de que la inserción de fuentes de energías renovables sigue en aumento, en la actualidad se buscan tecnologías que cumplan con los atributos que se mencionan a continuación para que así puedan ser un aporte a los sistemas eléctricos [4].

1. Variar rápidamente su generación.
2. Tener la capacidad de conectarse y desconectarse de forma rápida, además de poder mantenerse en stand-by.
3. Incremento rápido de su consumo eléctrico y que se pueda interrumpir.
4. Almacenamiento de energía durante periodos prolongados de tiempo.

Es por lo antes mencionado que ha ido en aumento el interés por la inserción de tecnologías relacionadas con el hidrógeno, el cual puede ser almacenado y distribuido para posteriormente ser convertido en energía eléctrica ya que corresponde a un vector energético.



1.3 Situación del hidrógeno.

En la actualidad según el presidente de la Asociación Española del Hidrógeno, Javier Brey "La electrólisis es el segundo método de producción de hidrógeno a escala industrial de todo el mundo. Además, es un método limpio, cuyo coste resulta proporcional al de la energía eléctrica empleada en su producción", sin embargo, Nils Anders Røkke, ingeniero mecánico y líder de SINTEF asegura que tan solo el 5% de la producción total de hidrógeno procede de la electrólisis.

La mayor parte del hidrógeno generado para ser utilizado en los sectores industriales, de transporte y energéticos es a partir de gas natural por medio de un proceso llamado reformado de metano, esto debido principalmente a su costo inferior en comparación con los otros tipos de hidrógeno. A julio de 2020 la producción de hidrógeno verde tenía un costo entre 3,0 a 7,5 USD/ kg, por lo que no es considerado aún competitivo si se tiene en cuenta que el costo de producir de hidrógeno a partir de gas natural es de entre 0,9 a 3,2 USD/ kg, lo cual resulta bastante más económico [5].

En vista de lo mencionado no se percibe muy conveniente la inserción del hidrógeno verde en producción a gran escala. Sin embargo, ya que para los años próximos la mayoría de los expertos estiman que el costo de producción de hidrógeno verde disminuirá en un 70% o más [6], entra a ser una excelente opción.

La inserción de hidrógeno, principalmente hidrógeno verde se ha convertido en una de las mejores alternativas y soluciones en cuanto a disminución de contaminación ambiental y con ello la descarbonización de la matriz energética, ya que esta se produce por electrólisis del agua, lo cual no emite gases de efecto invernadero y además se realiza con energía provenientes de fuentes de energía renovables.

En la actualidad el hidrógeno tiene variados usos, dentro de los cuales destaca su utilización en la industria química, refinería y en la producción de amoníaco, que a 2019 correspondía al 89% del hidrógeno producido a nivel internacional [4].

1.4 Convertidores para obtención de nuevas energías

En la búsqueda de lograr un mix energético que en lo posible tenga cero emisiones, ha ido en aumento la utilización de fuentes de energías renovables y también la idea de usar electrolizadores para producir hidrógeno que sea limpio y eficiente.

El hidrógeno, en particular el hidrógeno verde se obtiene a través de electrolizadores, los cuales deben ser conectados por medio de convertidores. Los convertidores que se utilizan para conectar a los electrolizadores por lo general corresponden a convertidores reductores (convertidores buck), ya que los electrolizadores requieren de un voltaje más bajo para realizar la electrólisis del agua.

El problema actualmente radica en las tecnologías de convertidores existentes, ya que no todos cumplen con lo necesario para ser combinados con electrolizadores y además deben poseer ciertas características mínimas en cuanto a por ejemplo eficiencia energética, reducción de la ondulación de corriente de salida y relación de conversión.

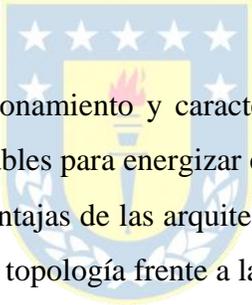
En el presente estudio se abordan las topologías de convertidores para alimentación de electrolizadores, específicamente se realiza una investigación respecto a topologías conmutadas de convertidor y se lleva a cabo una comparación entre estas.

1.5Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Realizar un análisis comparativo de topologías de convertidores para su aplicación en la energización de electrolizadores y seleccionar aquella que de mejores prestaciones para uso en plantas de gran escala.

1.5.2 Objetivos específicos

- 
- i) Investigar principio de funcionamiento y características de operación de topologías de conversión de potencia aplicables para energizar electrolizadores de gran potencia.
 - ii) Analizar las ventajas y desventajas de las arquitecturas de los convertidores y determinar ventajas comparativas de una topología frente a la otra.
 - iii) En base al análisis comparativo seleccionar la topología que presenta mayores ventajas.
 - iv) Modelar convertidor seleccionado y simular su comportamiento energizando planta electrolizadora de alta potencia.

1.5.3 Alcances

- i) La propuesta se realiza en base a modelos obtenidos de la literatura estándar.
- ii) Las pruebas se realizarán en MatLab/Simulink.
- iii) El análisis y comparación de topologías de convertidores se realiza para plantas electrolizadoras con potencias del orden de 1 [MW].
- iv) La simulación se realiza para una planta electrolizadora con potencia de 30.456 [W].

Capítulo 2 Obtención de Hidrógeno.

El hidrógeno es un gas incoloro e inodoro, altamente reactivo y el elemento químico más simple y ligero de la tabla periódica, además, no genera emisiones contaminantes por sí mismo.

El hidrógeno se encuentra presente en la mayor parte de la materia del universo, ya que constituye aproximadamente un 75% de esta [7], no obstante, su estabilidad se logra en forma de molécula diatómica (H_2) y solo es posible encontrarlo combinado con otros elementos, como por ejemplo en los hidrocarburos y en el agua.

El hidrógeno actúa como unidad de almacenamiento y para poder producir energía es necesario utilizar más energía para poder producir ese mismo hidrógeno, por lo que se le designa como vector energético, término que hace referencia a un instrumento que permite almacenar la energía generada en un determinado momento para aprovecharla posteriormente cuando se necesite [8].

Como se menciona, el hidrógeno no se encuentra en su estado puro en la naturaleza, por lo cual es necesario realizar un proceso para separarlo de las moléculas en donde se encuentra presente. Dependiendo de la forma en que se lleva a cabo este proceso de producción de hidrógeno con fines energéticos, la materia prima y fuentes de energía que se utilicen, se categoriza a modo general en tres distintos tipos, los cuales son hidrógeno negro, hidrógeno azul e hidrógeno verde. Sin embargo, en la actualidad se dividen en más categorías que estas tres principales y se designan con otras tonalidades de colores. Para el presente estudio el hidrógeno que tiene relevancia es el verde, ya que se estudian topologías conmutadas de convertidores que se utilizan para la alimentación de electrolizadores, por lo que se aborda su modo de obtención.

2.1 Hidrógeno verde

El hidrógeno en este caso es producido a partir de la electrólisis del agua, la cual consiste en un proceso donde se suministra corriente eléctrica para lograr separar las moléculas de H_2O en hidrógeno y oxígeno, llevándose a cabo con la utilización de electricidad proveniente de fuentes de energía

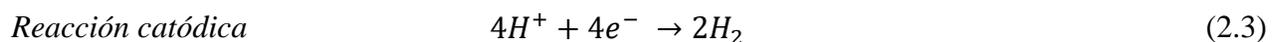
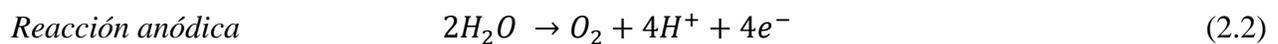
renovables. En la producción de este tipo de hidrógeno no se emite dióxido de carbono ni ningún otro gas de efecto invernadero.

El hidrógeno verde puede ser obtenido a partir de dos tipos de electrólisis, la primera es a bajas temperaturas por medio de electrólisis de agua alcalina (AWE) o electrólisis de agua con membrana de polímero (PEMWE) y la segunda es a alta temperatura a partir de celda de electrólisis de óxido sólido de alta temperatura (SOEC) [9].

La electrólisis del agua consiste en que se sumergen dos electrodos conductores en agua, uno funciona como ánodo y el otro como cátodo, luego se aplica una corriente desde la fuente de alimentación conectada a los electrodos provocando que los iones de carga opuesta sean atraídos hacia los electrodos y se rompa la molécula de agua. En el ánodo se libera hidrógeno proveniente del agua además de electrones y en el cátodo se libera oxígeno que proviene también del agua y se absorben electrones, en este proceso el hidrógeno es capturado y el oxígeno es liberado. La reacción producida durante la electrólisis del agua es una reacción oxidación reducción, la cual se puede apreciar en la Fig. 2.1 y se encuentra descrita en las ecuaciones 2.2 y 2.3.



Fig. 2.1 Obtención de hidrógeno verde por electrólisis del agua. [10]



2.2 Plantas electrolizadoras

Una planta electrolizadora corresponde a una planta de producción de hidrógeno, donde este hidrógeno es obtenido a través de la electrólisis de agua por medio de electrolizadores.

Se revisaron diversos modelos elaborados para distintos tipos de electrolizadores, donde se opta por seleccionar una celda de electrólisis con electrolito de polímero sólido, cuyas siglas en inglés son SPE (Solid polymer electrolyte). Los criterios utilizados para la selección del modelo del electrolizador son principalmente dos, el primero corresponde a la menor complejidad que presenta este modelo considerando a su vez aquellos factores relevantes y fundamentales para su modelación, mientras que el segundo criterio corresponde a las características que posee el electrolizador SPE en comparación con los otros tipos de electrolizadores, las cuales son explicadas en la presente sección.

El primer electrolizador de agua basado en el concepto de electrolito de polímero sólido se desarrolló en la década de 1960 por General Electric. Este concepto se debe a que la membrana es de SPE, sin embargo, es conocido en mayor medida como electrólisis de agua con membrana de intercambio de protones o membrana de electrolito de polímero, ambas utilizan el acrónimo PEM [4].

La tecnología del electrolizador PEM consiste en un dispositivo donde de forma controlada se lleva a cabo el proceso electroquímico de la electrólisis. Sus ventajas comparativas frente a otros electrolizadores se describen a continuación.

- Produce hidrógeno de alta pureza (99,99 %), ya que la membrana tiene una baja tasa de cruzamiento de gas [4][11].
- Alta tasa de producción de hidrógeno.
- Adaptabilidad a fuentes de energía dinámica, como por ejemplo solar y eólica [12].
- Capacidad de trabajar a densidades de corrientes más altas que en una electrólisis alcalina [4].
- Capacidad de trabajar a presiones elevadas (de hasta 350 bar en algunos modelos comerciales [4]), por lo cual requiere una menor cantidad de energía para realizar la compresión y almacenamiento del hidrógeno.
- Respuesta rápida ante variaciones de potencia, lo cual los vuelve idóneos para trabajar en conjunto con energías renovables.
- Diseños de sistema más compactos que los de un EAL.

Cabe mencionar que los costos de fabricación son elevados, debido principalmente a los altos valores de los componentes, como lo son los metales preciosos que utilizan para los electrodos y la membrana. Sin embargo, aún con esta desventaja sigue siendo una muy buena opción para la producción de hidrógeno verde.

2.2.1 Principio de operación del electrolizador

La electrólisis del agua con un electrolizador SPE se lleva a cabo de manera similar a como fue explicado en el punto 2.1, pero utilizando una membrana de electrolito de polímero sólido. Comúnmente se utiliza como membrana Nafion, el cual corresponde a un polímero de ácido perfluorosulfónico. Por otra parte, para el ánodo suele utilizarse platino (*Pt*) o platino-iridio (*Pt – IrO₂*) y para el cátodo se utiliza platino.

Para llevar a cabo la electrólisis con un electrolizador SPE se introduce agua en la cámara del ánodo y se aplica un potencial a través de la celda electroquímica para que en los electrodos se induzcan reacciones electroquímicas, provocando así que esta misma se disocie en oxígeno, electrones y protones (reacción 2.2). Luego los protones pasan al cátodo a través del electrolito de polímero sólido, donde forman hidrógeno gas, al combinarse con los electrones provenientes del circuito externo (reacción 2.3). De esta forma, se tiene que la reacción neta es la siguiente.



Una imagen de la sección transversal de un electrolizador SPE se puede observar en la Fig. 2.2.

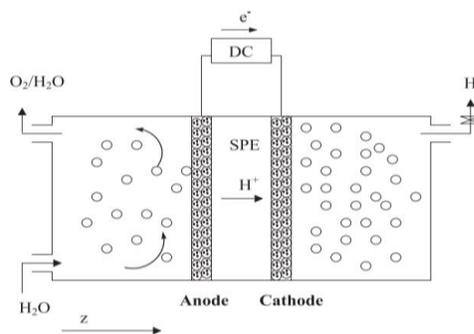


Fig. 2.2 Electrolizador SPE. [13]

2.2.2 Modelo

La operación de la celda descrita en el punto anterior puede ser caracterizada de acuerdo a [13] a partir de un modelo matemático simplificado basado en balances de masa apropiados, transporte y cinética electroquímica aplicada a la celda de electrólisis SPE.

El potencial de la celda general aplicado (ecuación 2.5) para el modelo está compuesto por el sobrepotencial del ánodo (η_A), sobrepotencial del cátodo (η_C), sobrepotencial de la membrana (η_{SPE}), la resistencia de interfaz (η_I) y el potencial de Nernst de la celda (V_0).

$$V = V_0 + \eta_A - \eta_C + \eta_{SPE} + \eta_I \quad (2.5)$$

A partir de esto la relación de voltaje-corriente de la celda queda expresada en la ecuación (2.6).

$$V = V_0 + \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{i}{i_{AO}} \right) \right] + \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{i}{i_{CO}} \right) \right] + \left(\frac{L_B}{\sigma_B} \right) i + R_I i \quad (2.6)$$

Donde V_0 puede ser considerada como una fuente de alimentación interna de la celda y se calcula de la siguiente manera.

$$V_0 = 1,23 - 0,9 \times 10^{-3} (T - 298) + 2,3 \frac{RT}{4F} \log(P_{H_2}^2 P_{O_2}) \quad (2.7)$$

Esta ecuación puede ser representada mediante un circuito equivalente desarrollado para el proceso de electrólisis y que se puede apreciar en la Fig. 2.3, en donde se considera una fuente de alimentación interna V_0 y una resistencia equivalente R_{cell} que contempla la resistencia del ánodo, resistencia de la membrana y resistencia del cátodo. La resistencia de interfaz se considera insignificante, por lo que fue definida como 0 en el modelo.

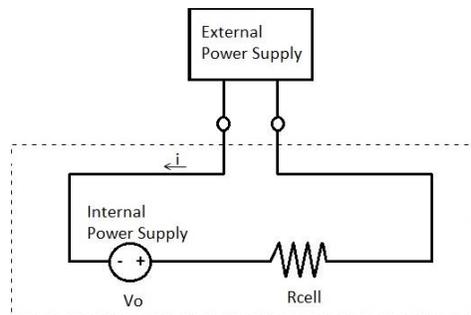


Fig. 2.3 Circuito equivalente de electrolizador SPE.

2.3 Impacto de la producción de H_2 en la red eléctrica

Como ha sido mencionado, la inserción del hidrógeno como vector energético es considerada una muy buena alternativa, ya que trae consigo beneficios significativos, tales como la capacidad de almacenamiento y transporte para generación de energía, contribución a una mayor inserción de energías renovables y gran versatilidad, siendo posible comprimirlo, licuarlo y transformarlo en otros combustibles.

Algunos de los aspectos positivos que la producción de hidrógeno con electrolizadores presenta son la posibilidad de reducir costos de administración de la red en situaciones de alta energía eólica, si se ocupa un esquema de conexión on grid, el electrolizador tiene la capacidad de hacer uso de mercados de energías liberados, permitiendo fluctuaciones considerables en cuanto al precio de la energía [14]. Además, de utilizar excedentes de energía provenientes de fuentes de energía renovables para la producción del hidrógeno, se puede suministrar posteriormente esta energía en los horarios de mayor demanda, mejorando la confiabilidad de la red.

Sin embargo, también hay aspectos que pueden afectar de otra manera a la red eléctrica, lo cual se encuentra referido a temas de consumo de energía proveniente de la red. Con esto se hace referencia a que la principal consecuencia de incluir electrolizadores para producir hidrógeno es el aumento en la necesidad de suministro eléctrico y de la demanda eléctrica, que por consiguiente significa un incremento en el consumo total de electricidad [15].

2.3.1 Impacto del convertidor que alimenta a la planta electrolizadora.

Las plantas electrolizadoras de gran potencia tienen altos niveles de producción diaria de hidrógeno y un consumo de energía bastante elevado, que puede provenir de la red eléctrica o directamente de fuentes de energía renovables.

Para el caso de plantas electrolizadoras conectadas a la red eléctrica se requiere contar con convertidores CA a CC para realizar la interfase, por lo que la demanda de energía de la planta productora de hidrógeno está sujeta en gran medida al tipo de convertidor que se encuentra

energizándola, ya que dependiendo de las características que presente se puede demandar mayor o menor cantidad de energía para producir la misma cantidad de hidrógeno.

Por otra parte, como los electrolizadores y convertidores son sistemas no lineales, inyectan armónicos a la red eléctrica [16], pero en la actualidad existen diferentes formas para atenuar la magnitud de estos armónicos. Para el caso del convertidor un ejemplo es a través de la implementación de filtros.

Alguna información adicional recopilada desde la literatura que se considera puede ser destacada, es mencionada a continuación.

En la investigación realizada en [17] demuestran que las formas de onda de corriente de baja frecuencia (10-60 Hz) conllevan un impacto a la producción de hidrógeno y pérdida de energía, además, las ondas de corrientes de alta frecuencia pueden ser causa de degradación en el electrolizador.

Un artículo que investiga la relación entre la demanda de energía y distintas topologías de convertidores rectificadores convencionales [14], entrega como resultado, en base a simulaciones realizadas, que se produce un consumo de energía adicional desde la red eléctrica debido a aumentos en la ondulación de corriente y que los perfiles con un alto factor de ondulación (RF) muestran una demanda mayor de energía para la operación del electrolizador, lo cual se puede ver presente principalmente cuando se trabaja en escenarios de baja carga (25% - 50% de la nominal), por lo que es de suma importancia escoger una topología de convertidor con buenas características para la realización de la electrólisis del agua. Como información complementaria mencionan que las fuertes fluctuaciones de corriente continua aumentan las impurezas de oxígeno en el gas hidrógeno, la cual es bastante considerable principalmente en las etapas de baja carga para algunas topologías de convertidores CA/CC.

Capítulo 3 Estudio del principio de funcionamiento de topologías de convertidores a analizar

Un convertidor corresponde a un módulo básico de cualquier sistema de electrónica de potencia, el cual utiliza dispositivos semiconductores de potencia que pueden o no ser controlados por medio de señales electrónicas y en ocasiones también hace uso de elementos que almacenan energía [18].

Los convertidores pueden ser clasificados según la forma de energía de entrada y de salida como:

1. CA a CC
2. CC a CA
3. CC a CC
4. CA a CA

La palabra convertidor es empleada para referirse a una etapa de conversión de potencia donde se lleva a cabo una de las funciones mencionadas.

Para la conversión de CA a CC se acostumbra a utilizar el término rectificador para referirse al convertidor de este tipo, mientras que para la conversión de CC a CA se utiliza el término de inversor para el convertidor, lo cual se encuentra descrito en la Fig. 3.1.

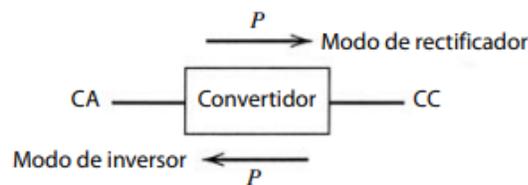


Fig. 3.1 Convertidor CA/CC y CC/CA. [18]

La tarea principal de un rectificador es la conversión de un voltaje CA monofásico o trifásico proporcionado a un voltaje continuo [14]. En el caso del uso para alimentación de un electrolizador, el convertidor CA a CC entrega una cierta forma de voltaje directo al electrolizador.

Dentro de las topologías no controladas se encuentran:

1. Rectificador de media onda.
2. Rectificador de onda completa.

3. Rectificador de 6 pulsos

Con estas topologías se pueden realizar modificaciones para dar lugar a convertidores con características diferentes. Cambiando los diodos por dispositivos controlados como MOSFET o IGBT se pueden obtener voltajes de salida adecuados para una determinada aplicación, así como la posibilidad de recuperación ante posibles contingencias, como un cambio en la carga o desbalance en el voltaje de entrada.

Por otro lado, los convertidores del tipo CC a CC son utilizados para la conversión de una entrada de corriente continua no regulada a una salida de corriente continua controlada con el voltaje que se desee. Dentro de los convertidores CC/CC se pueden encontrar los siguientes:

1. Convertidor reductor.
2. Convertidor elevador.
3. Convertidor reductor/elevador.

De las topologías enumeradas se pueden realizar combinaciones y adaptaciones que den lugar a distintos tipos de convertidores. Cabe destacar que las primeras dos topologías, es decir, las del convertidor reductor y convertidor elevador son las topologías básicas de este tipo de convertidor.

Un convertidor CC/CC que cuenta con un voltaje de entrada dado, es capaz de controlar el voltaje medio de salida de acuerdo con lo que se busque. Esto se logra por medio del control de los tiempos de encendido (t_{on}) y tiempos de apagado (t_{off}).

En la Fig. 3.2 se puede observar un convertidor CC/CC básico que funciona en conversión por modo de conmutación y en la Fig. 3.3 el voltaje de salida v_o del convertidor antes mencionado. En el gráfico del voltaje de salida v_o se puede ver como depende del tiempo de encendido y apagado.

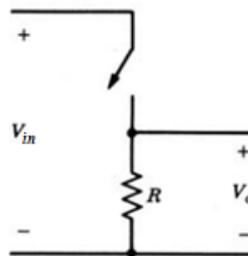


Fig. 3.2 Convertidor CC/CC básico. [18]

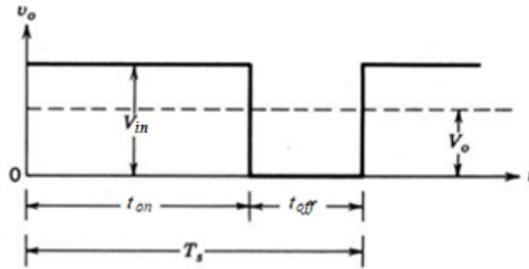


Fig. 3.3 Voltaje de salida v_o del convertidor CC/CC básico. [18]

Dada las características de operación de los electrolizadores, requieren de convertidores para realizar la parte de interface desde las diferentes fuentes de alimentación. Si la fuente de alimentación es alterna es necesario un convertidor del tipo CA a CC y si la fuente de alimentación es continua es necesario un convertidor del tipo CC a CC. También se puede utilizar una combinación de ambos convertidores, es decir, de CA a CC y de CC a CC, si es que se considera necesario debido a la magnitud de la tensión de alimentación. A continuación, se presenta un típico esquema de la conexión desde la red hacia el electrolizador, alimentado mediante convertidores del tipo CA/CC y CC/CC.

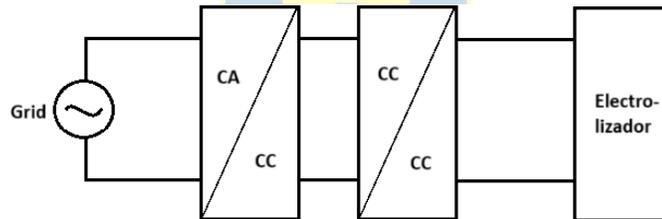


Fig. 3.4 Esquema de conexión de un electrolizador desde la red mediante convertidores.

Para que un convertidor sea utilizado para energizar un electrolizador debe cumplir con algunos requerimientos, los cuales son [19]:

1. Alta eficiencia energética.
2. Alta densidad de potencia.
3. Bajas interferencias electromagnéticas.
4. Bajo costo.
5. Alto índice de conversión.
6. Baja distorsión armónica total en la corriente de entrada.
7. Fiabilidad en caso de falla del interruptor de alimentación.

Para efectos de la presente memoria de título se busca investigar topologías de convertidores que cumplan principalmente dos de las características enumeradas, las cuales son baja distorsión armónica total en la corriente de entrada y alta eficiencia energética, pero también se tendrán en consideración aspectos relevantes como factor de potencia y complejidad.

3.1 Convertidores CC a CC

3.1.1 Convertidor reductor clásico (CBC)

3.1.1.1 Modelo

El convertidor CC/CC reductor convencional, cuyas siglas en inglés son CBC (Conventional Buck DC/DC Converter) produce un voltaje de salida promedio V_0 más bajo que el voltaje de suministro V_{in} , lo cual es una parte fundamental para la alimentación de electrolizadores ya que se requiere que el voltaje que llega al electrolizador sea menor al que es suministrado desde la red eléctrica. Otras características que posicionan al convertidor reductor convencional entre las alternativas de convertidores CC a CC para la alimentación de un electrolizador son, que posee un modelo bastante simple en comparación con otras topologías existentes en la actualidad (ver Fig. 3.5) y su bajo costo, esto debido a la cantidad reducida de componentes que lo forman. Además, este convertidor dio paso a la creación de nuevas topologías de convertidores reductores con diferentes características.

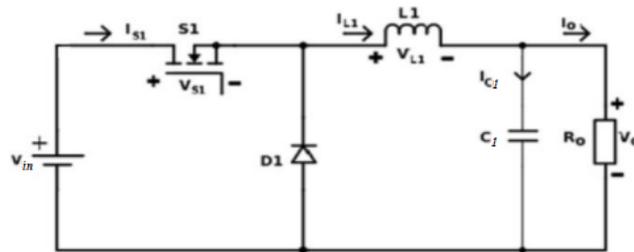


Fig. 3.5 Convertidor reductor clásico. [20]

El CBC se encuentra constituido por un voltaje de alimentación V_{in} que está en serie con un inductor L_1 , el cual actúa como fuente de corriente ya que son elementos lineales y pasivos capaces de almacenar y liberar energía. Cuando se cierra el semiconductor S_1 se almacena energía en el inductor y una vez que S_1 se abre la corriente puede continuar circulando gracias a esto por L_1 hacia

la resistencia de carga R_0 . En el diagrama del circuito también se pueden ver un diodo D_1 y un condensador de filtro C_1 [20].

La frecuencia de conmutación del semiconductor es

$$f_s = \frac{1}{T} \quad (3.1)$$

La relación de conversión (G) del CBC es la expresada en la ecuación 3.2, la cual también puede definirse como se describe en la ecuación 3.3.

$$G = \frac{t_{on}}{T} \quad (3.2)$$

$$G = \frac{V_o}{V_{in}} = D \quad (3.3)$$

La corriente de salida se puede obtener mediante la ecuación 3.4.

$$I_0 = \frac{P_0}{V_o} \quad (3.4)$$

La ondulación de corriente de salida y la corriente de operación en los semiconductores quedan expresadas en las ecuaciones 3.5 y 3.6 respectivamente.

$$\Delta I_{L1} = \frac{V_{in} - V_o}{L_1} \cdot DT \quad (3.5)$$

$$I_{switch} = I_{in} \quad (3.6)$$

La corriente total de salida I_o se puede observar en la Fig. 3.6.

Además se puede mencionar que para aplicaciones en alta potencia el estrés de voltaje y corriente del único MOSFET y del diodo son altos, por lo que el costo del semiconductor es bastante mayor que si el estrés de voltaje y de corriente fueran más bajos, lo que incrementa significativamente el costo del convertidor. Además, en alta potencia los transientes de encendido y apagado durante la operación de conmutación de la topología CBC provocan pérdidas de energía significativas. En caso de falla del semiconductor se ve comprometido el funcionamiento del convertidor y con ello no se podría suministrar energía al electrolizador.

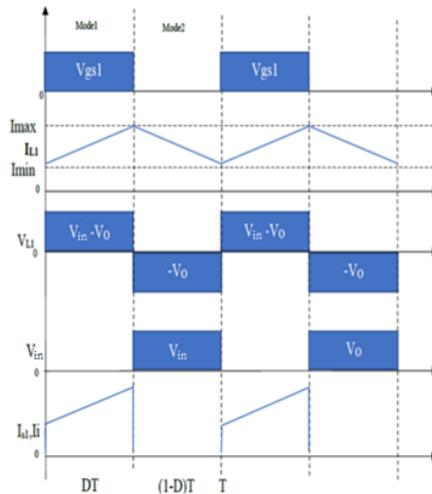


Fig. 3.6 Corriente total de salida del convertidor CC/CC reductor convencional. [20]

3.1.1.2 Alcances y limitaciones

A pesar de que esta topología es ampliamente utilizada en aplicaciones con electrolizadores por su simplicidad y bajo costo [19][21], el convertidor reductor clásico presenta una serie de inconvenientes, tales como:

- Limitaciones en cuanto a relación de voltaje.
- Uso para aplicaciones que precisan relación de conversión media.
- Si se busca conservar un volumen y valor de inductor reducido se tendría una ondulación de corriente de salida alta.
- Para lograr una ondulación de corriente de salida baja, que es una característica fundamental que debe tener el convertidor CC/CC, las opciones que hay disponibles son tener un valor alto de inductancia, lo que se traduce en mayor volumen y costo del inductor y consigo del convertidor, e incrementar la frecuencia de conmutación del convertidor, lo que significaría una disminución en la eficiencia energética.
- Limitación del número de celdas para una mayor fiabilidad.
- No es posible la operación después de una falla debido a que posee tan solo un MOSFET.

3.1.2 Convertidor reductor intercalado (IBC)

3.1.2.1 Modelo y funcionamiento

La topología reductora intercalada consiste en conectar varios convertidores reductores clásicos compartiendo un bus de CC en común. Las señales de control de puerta de PWM se desplazan entre sí para que la ondulación de la corriente de salida sea la menor posible y con ello también el volumen del componente pasivo.

El convertidor reductor intercalado, cuyas siglas en inglés son IBC (Interleaved Buck Converter) en algunas literaturas es también mencionado como convertidor CC/CC reductor intercalado polifásico, ya que pueden ser n convertidores conectados en paralelo.

El IBC convencional tiene una estructura simple y baja complejidad de control [22]. El modelo del convertidor reductor intercalado convencional estudiado en este caso (ver Fig. 3.7) posee dos convertidores convencionales que se encuentran conectados en paralelo y funcionan de modo intercalado. El primer convertidor está compuesto por un semiconductor S_1 , un inductor L_1 y un diodo D_1 , mientras que el segundo convertidor se compone del semiconductor S_2 , inductor L_2 y diodo D_2 , donde ambos convertidores tienen los mismos parámetros y comparten el capacitor de filtro C_o en la salida.

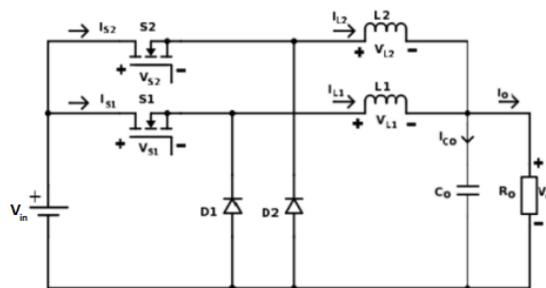


Fig. 3.7 IBC convencional. [20]

Las formas de ondas principales del IBC convencional se muestran en la Fig. 3.8. En ella se puede notar como debido a la suma de las corrientes de los inductores L_1 y L_2 se presenta una reducción de la ondulación de la corriente de salida y que las señales de activación de los semiconductores S_1 y S_2 , que corresponden a V_{gS1} y V_{gS2} respectivamente, son idénticas, pero se encuentran desfasadas en 180° .

El ángulo de desfase (δ) con que se envían las señales PWM a los MOSFET se obtiene por medio de la ecuación (3.7).

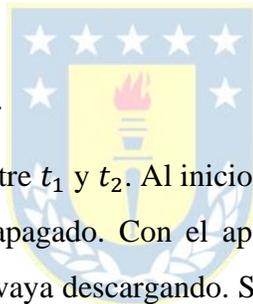
$$\delta = \frac{360^\circ}{n_c} \quad (3.7)$$

Donde n_c corresponde al número de celdas intercaladas/paralelas.

A continuación, se explican las etapas de operación del convertidor [23]. Cabe destacar que el convertidor funciona con una relación de trabajo inferior a 0,5, es decir, $0 < D < 0,5$.

A. Modo 1 – Intervalo de tiempo T1.

Comprende el intervalo de tiempo entre t_0 y t_1 . El semiconductor S_1 se encuentra conduciendo por lo que a su vez se va cargando el inductor L_1 debido a la diferencia existente entre el voltaje de entrada y de salida (V_{in} y V_o). Aquí se encuentra el diodo D_2 en polarización directa, por lo que el inductor L_2 se puede ir descargando.



B. Modo 2 - Intervalo de tiempo T2.

Comprende el intervalo de tiempo entre t_1 y t_2 . Al inicio de este modo se apaga el semiconductor S_1 y el semiconductor S_2 permanece apagado. Con el apagado de S_1 el diodo D_1 es polarizado directamente, lo que permite que L_1 se vaya descargando. Se transfiere la energía almacenada en L_2 hacia la carga por medio de D_2 .

C. Modo 3 - Intervalo de tiempo T3.

Comprende el intervalo de tiempo entre t_2 y t_3 . Al inicio de este modo se enciende el semiconductor S_2 y se comienza a cargar el inductor L_2 , además, el inductor L_1 sigue transfiriendo energía a la carga ya que el semiconductor S_1 permanece apagado.

D. Modo 4 - Intervalo de tiempo T4.

Comprende el intervalo de tiempo entre t_3 y t_4 . En este modo ambos semiconductores se encuentran apagados (S_1 y S_2), por lo que los inductores L_1 y L_2 se van descargando hacia la carga.

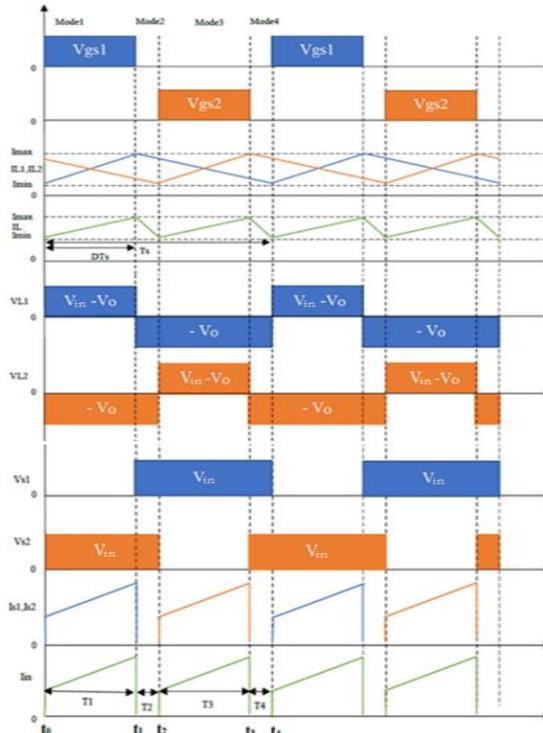


Fig. 5.8. Formas de ondas principales de IBC convencional. [20]

La relación de conversión es igual a la del convertidor reductor clásico, por lo tanto,

$$G = D \tag{3.8}$$

La corriente de salida y la corriente de entrada se encuentran definidas como

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} \tag{3.9}$$

$$I_{in} = I_o \cdot D \tag{3.10}$$

Por medio de la ecuación 3.11 se puede obtener la potencia de entrada, la cual corresponde a la suma de la potencia de salida y de las pérdidas.

$$P_{in} = P_o + P_{switch} + P_{diode} + P_{inductor} \tag{3.11}$$

Donde P_{switch} son las pérdidas en los semiconductores por resistencia drain-source R_{NMOS} , P_{diode} corresponden a las pérdidas en el diodo debido a la resistencia en serie del diodo R_D y $P_{inductor}$ son las pérdidas en el inductor debido a resistencia en serie interna R_L . El cálculo de las pérdidas se puede llevar a cabo con las siguientes ecuaciones.

$$P_{switch} = 2 \cdot R_{NMOS} \cdot (I_{o1})^2 \quad (3.12)$$

$$P_{diode} = R_D \cdot (I_{o1}(1 - D))^2 + V_F \cdot I_{o1}(1 - D) \quad (3.13)$$

$$P_{inductor} = 2 \cdot R_L \cdot (I_{o1})^2 \quad (3.14)$$

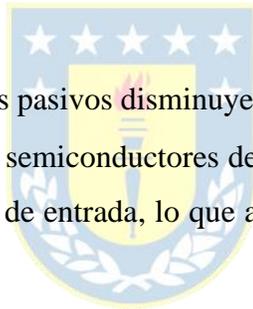
La eficiencia del convertidor (η) se obtiene como sigue.

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} \cdot 100 \quad (3.15)$$

3.1.2.2 Alcances y limitaciones

Los investigadores han comenzado a tener un mayor interés en las topologías de convertidores de CC/CC intercalados debido a lo prometedora que puede resultar. El caso del convertidor reductor intercalado convencional presenta las siguientes características [19][22][24]:

- Cancelación de ondulación de corriente.
- Respuesta transitoria rápida.
- El tamaño de los componentes pasivos disminuye.
- Se deben utilizar dispositivos semiconductores de alto voltaje (por encima del de entrada) ya que estos sufren el voltaje de entrada, lo que aumenta su costo y sus características no son muy buenas.
- Baja eficiencia debido al trabajo en condiciones de conmutación complicadas como lo es la conmutación de voltaje cero (ZVS), ya que para esta topología en la realidad no se logra una conmutación de los semiconductores cuando el voltaje de salida pasa por cero, sino que se trabaja alrededor del cruce por cero, lo que produce transientes y, en consecuencia, un aumento en las pérdidas y disminución de la eficiencia.
- Al tener que trabajar a frecuencias de conmutación altas para poder alcanzar densidades de potencias mayores, las pérdidas de conmutación que se encuentran relacionadas al encendido y apagado aumentan, además de incrementarse también las pérdidas por recuperación inversa del diodo. Para estas frecuencias operaría con ciclos de trabajo muy pequeños.
- Relación de conversión igual a la del CBC, por lo que se encuentra limitada.



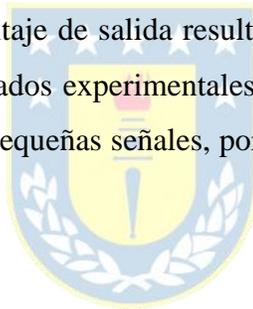
El inconveniente principal del IBC convencional es su baja relación de voltaje, por lo que han estado investigando modificaciones en su arquitectura para obtener mejores características.

En [20] realizan el diseño, modelado y análisis de un convertidor CC/CC reductor intercalado de dos fases buscando satisfacer las demandas que existen en la actualidad para un convertidor, como por ejemplo ondulación de baja corriente, alta eficiencia, dinámica más rápida y mayor densidad de potencia. En este documento se obtuvo que:

La ondulación de la corriente del inductor individual varía respecto a la relación de trabajo y es menor que en el convertidor reductor convencional.

Para $D = 0,5$ la ondulación total de la corriente del inductor es 0, lo cual resulta sumamente bueno, sin embargo, eso depende de que el ciclo de trabajo se encuentre en ese valor y que no varíe de un ciclo a otro.

Variando el voltaje de entrada el voltaje de salida resultante seguía siendo cercano al voltaje de salida deseado. Sin embargo, los resultados experimentales y de simulación fueron en un rango de pequeña escala (de laboratorio) y para pequeñas señales, por lo que no es seguro su comportamiento para plantas de gran potencia.



3.1.3 Convertidor de modo de conmutación LLC

3.1.3.1 Modelo y funcionamiento

El convertidor LLC resonante es un tipo de convertidor CC a CC utilizado en diversas aplicaciones, entre ellas incluida la de una planta electrolizadora tipo PEM, su nombre proviene de las iniciales utilizadas para denominar al inductor L y condensador C.

Este convertidor opera en modo resonante, es decir, que se utiliza la resonancia entre los inductores y el condensador para minimizar las pérdidas de conmutación y alcanzar una alta eficiencia. La resonancia es lograda seleccionando los componentes de manera tal que a la frecuencia de conmutación estos posean una impedancia cero. Su configuración puede ser de puente completo (4 elementos conmutadores) o de medio puente (2 elementos conmutadores), a continuación, dos figuras que los detallan.

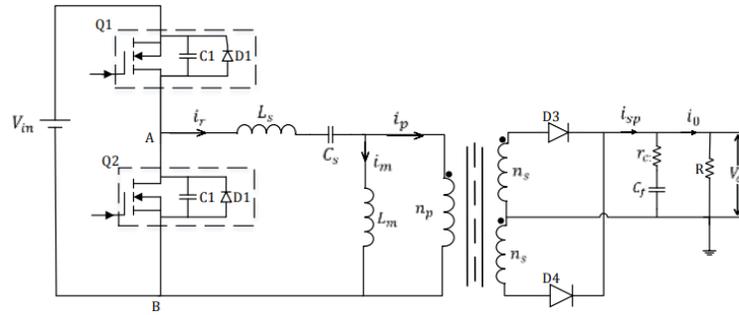


Fig. 3.9 Convertidor resonante LLC. [25]

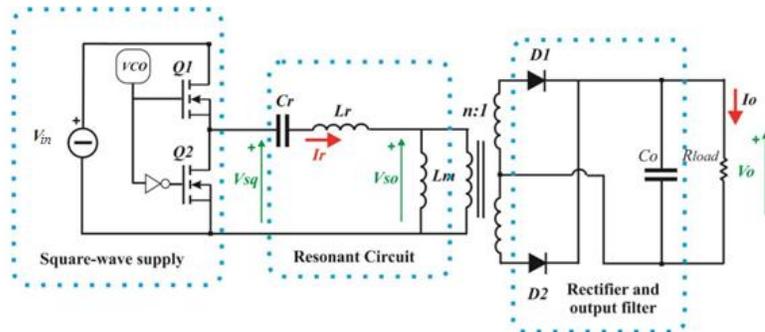


Fig. 3.10 Convertidor resonante LLC. [26]

En un convertidor LLC se tienen dos frecuencias características f_o y f_p , donde esta última toma en cuenta la magnetización del transformador L_m . Sus ecuaciones quedan esbozadas a continuación.

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r \cdot C_R}} \quad (3.16)$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_m + L_r) \cdot C_R}} \quad (3.17)$$

A medida que la carga varía, la frecuencia de resonancia cambia desde f_p a f_o . Particularmente sin carga la frecuencia de resonancia f_{co} es igual a f_p , mientras que en corto circuito se tiene un valor de f_o .

En los MOSFET se aplica una técnica llamada conmutación de voltaje cero, la cuál es utilizada para disminuir las pérdidas por conmutación y mejorar la eficiencia del sistema. Para llevar a cabo la técnica de conmutación de voltaje cero se realiza la conmutación cuando la tensión atraviesa el valor cero. En particular en este modelo se hace uso de los ciclos de carga y descarga del inductor y el condensador de manera que cuando se abra un conmutador, por ejemplo Q1, ocurra que, en algún

punto el valor de la corriente resonante circulando por el circuito mostrado sea igual al de la corriente de magnetización en el transformador, por lo que en ese preciso punto no existe transferencia de potencia, en lo que entraría otro conmutador (Q2).

Para el caso de medio puente la función de transferencia es la siguiente:

$$H = \frac{V_o \cdot n}{\frac{V_d}{2}} = \frac{V_{so}}{V_{sq}} \approx \frac{V_o}{V_{in}} \quad (3.18)$$

Donde n es el número de vueltas del transformador. Su ganancia se modela como sigue.

$$G = \frac{V_o}{V_{in}} = \left| \frac{j\omega L_m // R_e}{j\omega L_m // R_e + j\omega L_r + \frac{1}{j\omega C_r}} \right| \quad (3.19)$$

Luego de la ecuación anterior y de acuerdo con [27] se utilizan los valores normalizados para describir la ecuación, esto es:

$$f_n = \frac{f_{sw}}{f_o} \quad (3.20)$$

$$L_n = \frac{L_m}{L_r} \quad (3.21)$$

$$Q_e = \frac{\sqrt{L_r / C_r}}{R_e} \quad (3.22)$$

Por último, las ecuaciones normalizadas para ganancia y voltaje quedan como sigue.

$$G = \left| \frac{L_n \cdot f_n^2}{[(L_n + 1) \cdot f_n^2 - 1] + j[(f_n^2 - 1) \cdot f_n \cdot Q_e \cdot L_n]} \right| \quad (3.23)$$

$$V_o = G \cdot \frac{1}{n} \cdot \frac{V_{dc}}{2} \quad (3.24)$$

Con ello se tienen los parámetros necesarios para diseñar un convertidor de esta naturaleza (las ecuaciones son las mismas para las configuraciones de medio puente y puente completo).

Para la etapa de conversión CC/CC responsable de energizar al electrolizador se puede comentar que efectivamente tienen las capacidades para ser utilizados en la industria debido a las características que posee, tales como, alta conversión de voltaje, ondulación de corriente menor a 1%, alta corriente de salida y alto rango de operación.

En [28] construyeron un modelo de simulación y prototipo experimental de 6 kW para una planta electrolizadora que utilice un convertidor de modo de conmutación LLC, en el cual simularon y aplicaron valores que cumplen con las características mencionadas en el párrafo anterior. Los resultados experimentales obtenidos tienen una diferencia cercana al 5% con respecto a los valores simulados. Sin embargo, la ondulación de corriente fue cercana a un 0,98%, lo cual es inferior al 2% la de las fuentes de alimentación comerciales de hidrógeno existentes, por lo tanto, se tiene una mayor pureza en el hidrógeno obtenido, confirmando la viabilidad del esquema que utiliza un convertidor de modo de conmutación LLC y tiene valores de aplicaciones prácticas.

3.1.3.2 Alcances y limitaciones

De lo presentado y en base a la literatura [27][29][30] se pueden resumir las siguientes características respecto a los convertidores LLC resonantes.

- Gran eficiencia debido a su modo de operación resonante, en valores típicos del 95%.
- Nivel de interferencia electromagnética reducida.
- Proporciona un diseño compacto y ligero, al trabajar con mayores frecuencias es posible utilizar inductores y condensadores más pequeños.
- Incluso con considerables variaciones en la carga, la topología presenta el voltaje de salida con cambios suaves, por ello ofrecen un ripple de voltaje y corriente menores a 1% y 5% respectivamente.
- Tienen un nivel complejo de control, ya que se debe trabajar a frecuencia de conmutación variable y en un área lo más cercana posible a la frecuencia de resonancia, esto para aprovechar las ventajas del convertidor.
- La cantidad de componentes puede ser mayor a otras topologías, esto debido a la presencia de inductores, capacitores, transformadores, condensadores de acoplamiento, entre otros.

3.2 Convertidores CA a CC

3.2.1 Puente de tiristores de 6 pulsos (6-TR)

3.2.1.1 Modelo y funcionamiento

El modelo de un puente rectificador de tiristores de 6 pulsos consta de dos circuitos de punto medio de tres pulsos conectados en serie, el cual se puede observar en la Fig. 3.11. La configuración de puente en la que se disponen los tiristores se realiza con el objetivo de tener control de la rectificación y una forma de onda de salida suavizada.

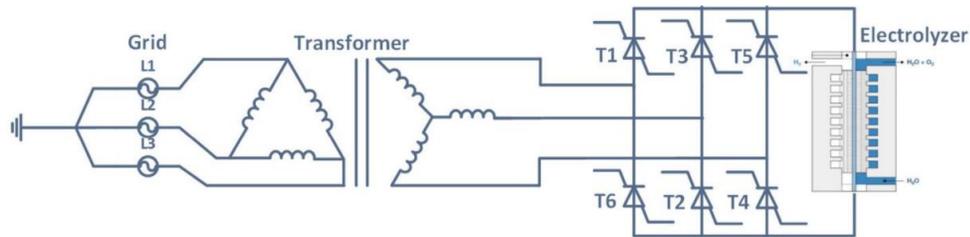


Fig. 3.11 Puente rectificador de tiristores de seis pulsos. [12]

La conmutación en este sistema se efectúa cuando cambia la corriente entre las fases, mientras que la activación de los tiristores para un momento en concreto se encuentra determinado por el voltaje de línea con mayor magnitud en ese preciso instante [14]. El voltaje que se le aplica a la carga de CC, que en este caso corresponde al electrolizador, es tan solo una parte del voltaje de línea de la red o fuente trifásica.

El voltaje medio de salida (CC) se puede obtener mediante la ecuación (3.25).

$$V_o = \left(\frac{3\sqrt{3}V_{max}}{\pi} \right) \cos(\alpha) \quad (3.25)$$

Donde V_{max} corresponde al voltaje de entrada máxima y α es el ángulo de retardo de disparo de los tiristores.

Por otra parte, se tiene que la potencia media, el factor de ondulación (RF) y el factor de potencia pueden ser calculados mediante las ecuaciones 3.26, 3.27 y 3.28, respectivamente. Donde I_o es la amplitud de las corrientes de línea.

$$P = V_o I_o \quad (3.26)$$

$$RF = \sqrt{\frac{\pi^2}{9 \cos(\alpha)^2} \cdot \left[1 + \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \cos(\alpha) \right]} - 1 \quad (3.27)$$

$$PF = \frac{3}{\pi} \cos(\alpha) \quad (3.28)$$

En la Fig. 3.12 se muestran las formas de onda en el puente rectificador de tiristores de seis pulsos. En 3.12a se tiene un ángulo α igual a cero, por lo que los tiristores se encontrarían funcionando como si fueran diodos, mientras que en 3.12b se tiene un ángulo de retardo de disparo distinto de cero, por lo tanto, las formas de ondas cambian con respecto a la primera. Además, en la Fig. 3.12c se puede observar la corriente en la fase a.

Se puede notar que tanto el voltaje de salida como el factor de ondulación están directamente relacionados con el ángulo de disparo, por lo que se puede afirmar que ajustando el ángulo α es posible controlar el valor promedio del voltaje de salida y, por consiguiente, se logra controlar también la potencia que se le suministra a la carga que se encuentra conectada al convertidor CA/CC.

Cabe destacar que para que el convertidor funcione en modo de rectificador el ángulo de disparo de los tiristores debe ser inferior a 90° .

En el puente rectificador de tiristores de seis pulsos que se muestra en la Fig. 3.11, el cual se describe en [12] donde es utilizado para la aplicación de un electrolizador PEM, cada semiconductor (T1, T2, T3, T4, T5 y T6) que se observa en la imagen contiene un par de tiristores que van conectados en paralelo con la finalidad de lograr un aumento en la corriente de salida.

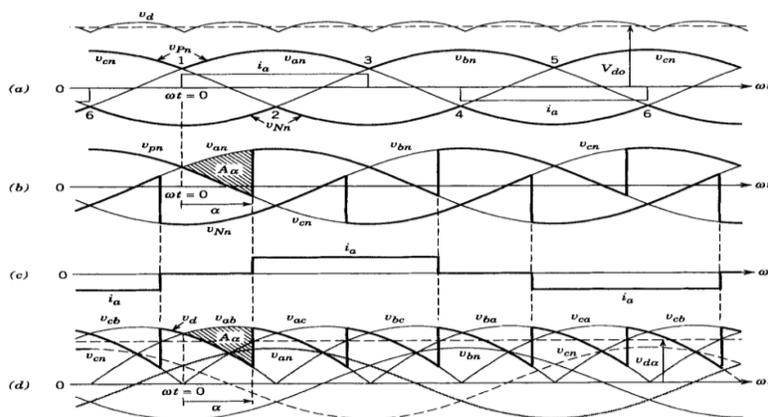


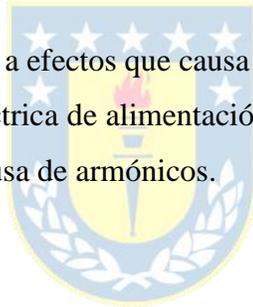
Fig. 3.12 Formas de onda en el puente rectificador de tiristores de seis pulsos [31].

En la actualidad es la tecnología más utilizada en alta potencia en aplicaciones industriales, esto debido a su bajo costo y madurez. Sin embargo, presentan inconvenientes en cuanto a calidad de energía tanto en el lado de CA como en el de CC, por lo cual se requiere un sistema de filtrado voluminoso y debe ser un factor a considerar al momento de seleccionar el puente de tiristores de 6 pulsos como rectificador para aplicaciones en electrolizadores.

Un ejemplo de aplicación en alta potencia en la cual se hace uso de un rectificador de tiristor de seis pulsos es en una gran planta de producción de hidrogeno verde basado en un electrolizador PEM de 20 MW inaugurada en Quebec, Canadá el 2021. Esta planta en su momento fue la más grande del mundo, con una producción de cerca de 3.000 toneladas anuales de hidrógeno verde.

Con el uso de esta topología se ha mostrado un incremento en el consumo de energía específico de la chimenea del electrolizador debido a la ondulación de la corriente CC, además, aparece la aplicación de un comportamiento dinámico a la celda de electrólisis PEM[12].

Su principal inconveniente en cuanto a efectos que causa sobre la red AC es que provee una carga alta de potencia reactiva para la red eléctrica de alimentación [14] y puede contribuir con problemas de calidad de energía en el sistema a causa de armónicos.



3.2.1.2 Alcances y limitaciones

Las principales características que presenta la topología del puente rectificador de tiristores de seis pulsos se describen a continuación [12][14][32].

- Diseño simple.
- Bajo costo, debido a sus componentes económicos.
- Eficiencia energética considerable con potencia de salida controlada.
- El control del rectificador a través del ángulo de disparo provoca un incremento del contenido armónico de la corriente.
- Bajo factor de potencia debido a un incremento en la potencia reactiva.
- Alto THD de corriente.

- A cargas parciales se produce un aumento de potencia reactiva y de la ondulación de la corriente continua, esto debido al aumento del ángulo de disparo de los tiristores para lograr un voltaje de salida bajo.
- Al ser una topología basada en tiristores requiere de un gran sistema de filtrado.

3.2.2 Rectificador de 12 pulsos (12-TR)

3.2.2.1 Modelo y funcionamiento

El rectificador de 12 pulsos consiste en dos rectificadores de 6 pulsos conectados en paralelo y desfasados en 30 grados, lo cual se logra a través de un transformador de tres devanados, uno conectado en estrella y el otro en delta. La topología del rectificador de 12 pulsos se puede apreciar en la Fig. 3.13.

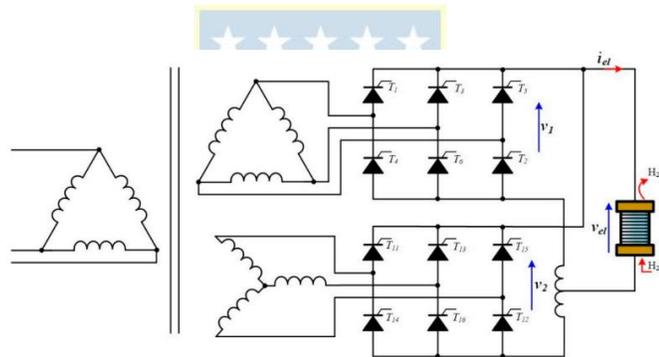


Fig. 3.13 Topología del rectificador de 12 pulsos [32].

Esta configuración es ampliamente utilizada para la aplicación estudiada en la industria, pues provee un alto nivel de corriente, tal como es requerido para los electrolizadores.

La topología estudiada puede usar diodos o tiristores, la ventaja de utilizar tiristores es que estos pueden ser controlados, lo cual es altamente requerido para gestionar la tasa de producción de hidrogeno y eficiencia energética del sistema. Por otro lado, los tiristores aportan potencia reactiva al sistema, por lo que se hace necesaria la incorporación de filtros [33]. Debido a las ventajas que proporciona tener un control en el sistema, se profundiza en el funcionamiento del rectificador de 12 pulsos con tiristores.

Considerando una carga resistiva, las ecuaciones de este rectificador son:

$$V_{o(mean)} = \frac{6\sqrt{3}V_m}{\pi} \cos(\alpha) \quad (3.29)$$

$$I_{o(mean)} = \frac{V_o}{R} \quad (3.30)$$

Donde V_m es el máximo voltaje de línea a neutro, realizando un análisis de Fourier en cada rama rectificadora de 6 pulsos se llega a que:

$$I_{A(rms)} = \sqrt{\frac{4 + 2\sqrt{3}}{3}} \quad (3.31)$$

$$I_{A1(rms)} = \frac{4\sqrt{\frac{3}{2}}i_o}{\pi} \quad (3.32)$$

Con ello el THD queda como se expresa en la ecuación 3.33.

$$THD_{IA} = \sqrt{\frac{I_{A(rms)}^2}{I_{A1(rms)}^2} - 1} \cdot 100 \quad (3.33)$$

Considerando un factor de distorsión de 0,9886 se tiene que el THD es de 15,22 %, esto significa que se debe incorporar filtros para atenuar los armónicos [34]

Por otro lado, el factor de ondulación en el rectificador se calcula mediante la ecuación 3.34.

$$\Delta V_o = \frac{V_{o,max} - V_{o,min}}{V_{o,mean}} \quad (3.34)$$

En la industria, los rectificadores en base a diodos son altamente utilizados en aplicaciones de fuentes de poder en corriente continua o unidades de velocidad ajustable, ya que ofrecen la ventaja de un menor costo, alto factor de potencia y eficiencia alta. Sin embargo, estas características no se trasladan bien en aplicaciones de alta potencia, debido a que el estrés térmico y pérdidas por conmutación se hacen mayores, además de que no existe un control, es por ello que para aplicaciones como plantas electrolizadoras donde se requiere de un control preciso, para la obtención de hidrógeno se prefiere utilizar rectificadores a base de tiristores [35].

La potencia reactiva aportada al sistema depende del ángulo de disparo de los tiristores, por lo que se debe asegurar que exista un control adecuado, lo que a su vez aumenta su complejidad. Además, para asegurar un factor de potencia que cumpla con las normas de calidad de suministro se deben

implementar en conjunto con grandes filtros L-C, lo que conlleva un mayor costo y complejidad. Aún con lo mencionado, la topología rectificadora de 12 pulsos posee una mejor eficiencia, costo, confiabilidad y facilidad de control que otras topologías que hacen uso de tiristores [36].

3.2.2.2 Alcances y limitaciones

Las principales características que distinguen y describen al rectificador de 12 pulsos se encuentran enunciadas a continuación.

- Buena tasa de rectificación.
- Permite eliminar el 5° y 7° armónico.
- Bajo factor de ondulación (del orden de 3,2% a 4,8% dependiendo del tipo de carga) [32].
- Mejor factor de potencia, permitiendo una mayor calidad en el hidrógeno obtenido.
- Menores pérdidas.
- La potencia reactiva depende fuertemente del ángulo de disparo de los tiristores, a mayor ángulo, mayor cantidad de potencia reactiva en el sistema [36].
- Aumento en la complejidad, lo que conlleva a la necesidad de una lógica de control más sofisticada.
- Una mayor cantidad de componentes conlleva un mayor volumen en el producto final.
- Ambos puntos tienen como consecuencia un mayor costo de implementación.
- Si bien tiene un menor nivel de armónicos presentes que otros convertidores, podría no cumplir con las normas establecidas por la IEEE 519, por lo que aún se requiere implementación de filtros.

3.2.3 Rectificador reductor intercalado de 3 fases (3PIBR)

3.2.3.1 Modelo y funcionamiento

El convertidor reductor intercalado de 3 fases es un convertidor de CA a CC cuya función principal consiste en reducir y regular el voltaje de salida de CC al valor que se desea. La topología de este

convertidor se compone de un rectificador de diodos seguido de un convertidor reductor trifásico, tal como se aprecia en la Fig. 3.14.

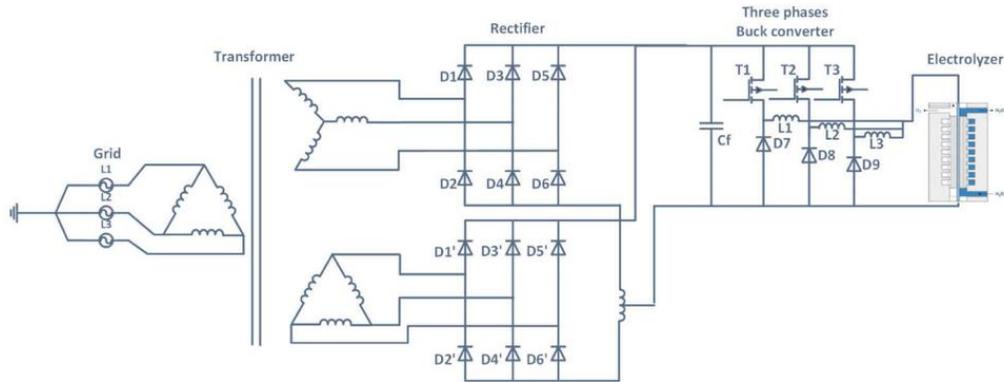


Fig. 3.14 Rectificador reductor intercalado de 3 fases. [12]

El voltaje de salida del rectificador se puede expresar mediante la siguiente ecuación.

$$V_o = D \cdot V_{in} \quad (3.35)$$

Donde para este caso V_{in} corresponde al voltaje de entrada CC (proviene de la salida de un puente de diodos) y se obtiene mediante la expresión (3.36).

$$V_{in} = \frac{3\sqrt{3} \cdot V_m}{\pi} \quad (3.36)$$

Con V_m como voltaje de entrada máximo.

El factor de potencia (PF) y potencia activa (P) quedan expresados en las ecuaciones 3.37 y 3.38, respectivamente.

$$PF = \frac{P}{S} \quad (3.37)$$

$$P = \frac{3}{\pi} \cos(\Phi_1) \quad (3.38)$$

$$I_s = \sqrt{\frac{2}{3}} i_o \quad (3.39)$$

Donde Φ_1 es el ángulo de disparo en el rectificador, I_s es la corriente de línea RMS e i_o el valor de la corriente de salida.

El factor de ondulación de la corriente de salida se define en la ecuación (3.40), que es equivalente a la ecuación (3.41).

$$RF = \frac{V_{RMS}}{V_o} \quad (3.40)$$

$$RF = \frac{1 - D}{8L_f C_f f_s^2} \quad (3.41)$$

Donde L_f es el valor del inductor del filtro, C_f el capacitor del filtro y f_s la frecuencia de conmutación.

En el gráfico de la Fig. 3.15 se ve cómo cambia el factor de ondulación para distintos valores de L_f y C_f . Para graficar el factor de ondulación se utilizaron como referencia los parámetros de simulación para 6-TR y 3PIRB que se encuentran en la Tabla 1 de [12], para frecuencias de conmutación de 360 [Hz] y 1 [kHz].

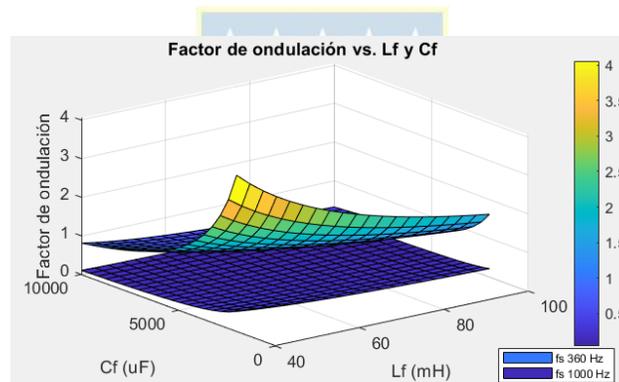


Fig. 3.15 Factor de ondulación vs. L_f y C_f para 3PIRB.

Se observa que el factor de ondulación disminuye a medida que aumenta el valor de L_f , así mismo, al aumentar el valor de C_f el factor de ondulación también se ve disminuido, por lo que se puede decir que el factor de ondulación será más bajo al tener valores de L_f y C_f altos. Además, se puede observar que trabajando a una frecuencia de conmutación baja el factor de ondulación es bastante mayor que si se trabaja a frecuencias de conmutación más altas. Cabe destacar que a medida que se obtenga un menor factor de ondulación, la ondulación de la forma de onda de salida de 3PIRB será más baja.

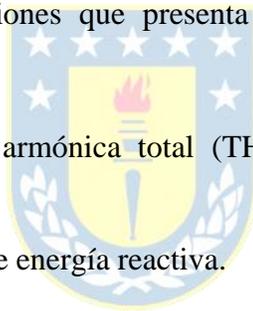
En [12], que corresponde a una investigación que busca estudiar cómo realizar una mejora en cuanto a calidad de energía para un sistema de electrólisis PEM de 20 MW por medio de un cambio

en la topología del electrolizador existente. Proponen el uso de la topología del rectificador reductor intercalado de 3 fases, donde si bien no se utiliza en la realidad, se realizan simulaciones del modelo que arrojan resultados favorables, ya sea a carga nominal o carga parcial, debido a que presenta mejoras en cuanto a PF, THD de corriente del transformador y ondulación de corriente continua, significando una reducción de pérdidas. Además, se menciona que en cuanto al electrolizador PEM hay una disminución en el consumo de energía específico, por lo que existe un aumento en la eficiencia del sistema y en conjunto una disminución de costo y tamaño del filtro. En este estudio concluyeron que la topología del rectificador puede ser considerado en las próximas construcciones de sistemas de electrolizadores PEM a gran escala.

3.2.3.2 Alcances y limitaciones

Los principales alcances y limitaciones que presenta la topología del rectificador reductor intercalado de 3 fases son [12]:

- Reducción de la distorsión armónica total (THD) de corriente, debido a una mejor cancelación de armónicos.
- Disminución de generación de energía reactiva.
- Alto factor de potencia.
- Reducción del volumen de los filtros de armónicos.
- Reducción en la ondulación de corriente de salida de CC.
- Reducción en el consumo de energía del electrolizador.
- Tiene la capacidad de seguir funcionando en el caso de que ocurra una falla en uno de los semiconductores, mediante la modificación del ángulo de control de cambio de fase.
- Permite altas frecuencias de conmutación, lo que ofrece rapidez dinámica y mayor estabilidad al sistema. Sin embargo, a altas frecuencias las pérdidas resultan elevadas e incrementan si hay un voltaje de entrada CC bajo, lo que aumenta el ciclo de trabajo.
- Los semiconductores se ven expuestos a alto estrés de voltaje.
- Aumento de costos debido a un mayor número de elementos en su topología.



Cabe destacar que al trabajar con cargas parciales sigue presentando buenas características en cuanto a calidad de la energía, valor de THD (bajo), distorsión de las ondas y factor de potencia.

3.2.4 Rectificador Modular Multicelda (MMR)

3.2.4.1 Modelo y funcionamiento

La topología del rectificador modular multicelda, cuyas siglas en inglés son MMR (Modular Multicell Rectifier), se caracteriza por tener un diseño modular que permite la distribución del voltaje alto de la red de entrada a voltajes inferiores de forma equitativa entre las celdas del convertidor básico que comprenden la topología mencionada.

El diagrama de circuito del rectificador modular multicelda se puede apreciar en la Fig. 3.16. Esta topología tiene una configuración en cascada y se compone por varias celdas convertidoras, donde cada una de ellas corresponden a la unidad básica (ver Fig. 3.17). La unidad básica tiene 2 etapas, la primera etapa corresponde a un convertidor CA/CC y se encarga de convertir la alimentación CA del lado de la red a una alimentación de tipo corriente continua, luego esta salida se conecta a convertidor CC/CC, que corresponde a la segunda etapa, por medio de un condensador de enlace CC, y a la salida de este segundo convertidor se obtiene el valor de salida CC deseado [37].

En [37] presentan esta topología y detallan aspectos importantes, tales como convertidores aptos para constituir la parte del convertidor CA/CC y del convertidor CC/CC, cuál utilizan ellos para su propuesta de modelo y los modos de control, lo cual se detalla a continuación.

A. Etapa de CA/CC del MMR

Se utiliza un convertidor elevador tótem-pole sin puente con diodos en la línea de rectificación (Fig. 3.18) para la parte del convertidor CA/CC, pero cualquier otra topología del tipo CA/CC puede ser usado.

El convertidor elevador tótem posee corrector de factor de potencia, minimizando las pérdidas de potencia y aumentando la potencia útil que luego llega a la etapa CC/CC. Este convertidor está compuesto por una inductancia elevadora, dos semiconductores elevadores de alta frecuencia

(MOSFETs) y dos diodos que conducen corriente a la frecuencia de la línea. Dentro de sus principales características y ventajas se encuentran [38]:

- Factor de potencia mayor a 0,99.
- Alta eficiencia, puede alcanzar valores de hasta 98,86%.
- Distorsión armónica total inferior a 2%, lo que significa una baja ondulación de corriente CA.
- Reducción del número de componentes.

El convertidor elevador tótem opera tanto en los ciclos positivos como en los negativos de la red de entrada y los semiconductores se activan por PWM.

Se realiza la implementación de un algoritmo de control de ciclo cerrado, por el cual llega la retroalimentación de la salida de CC al controlador y este cumple la función de enviar señales de control al convertidor CA/CC para que se obtenga la salida CC deseada.

B. Etapa de CC/CC del MMR

Se pueden utilizar varias topologías para el convertidor CC/CC, pero en el estudio realizado en [37] implementan un doble puente activo (DAB), el cual se puede ver en la Fig. 3.19. El funcionamiento del doble puente activo consiste en tomar el voltaje CC que viene desde el convertidor CA/CC, convertirlo en voltaje CA para ser subido o bajado (depende de lo que se necesite) por medio de un transformador de alta frecuencia (HFT) o uno de media frecuencia (MFT) y luego convertirlo nuevamente a voltaje CC, siendo de las características que se solicitan.

El modo de control se realiza por medio de señales de control generadas a partir de la retroalimentación de la salida del sistema, de este modo se logra el control para lograr obtener la salida que se desea para que llegue a la carga.

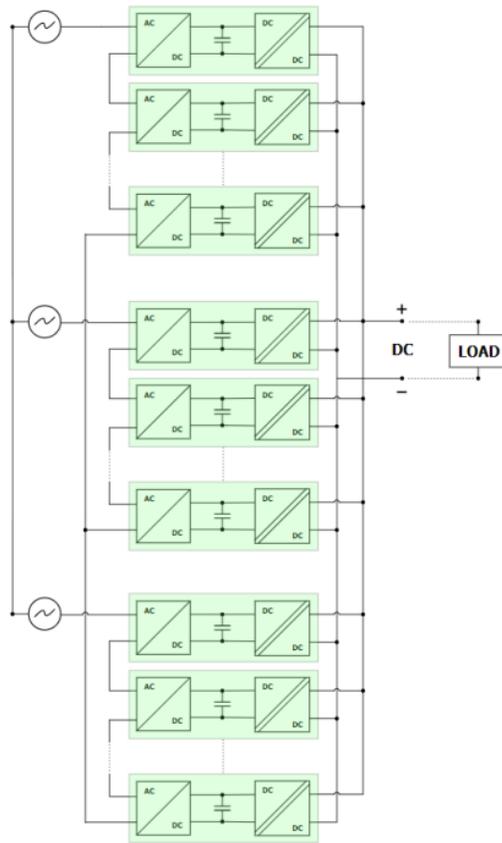


Fig. 3.16 Diagrama de circuito de Rectificador Modular Multicelda (MMR).

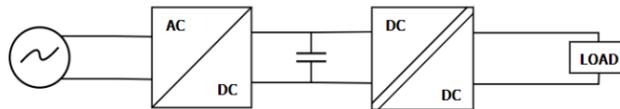


Fig. 3.17 Unidad básica de la topología MMR.

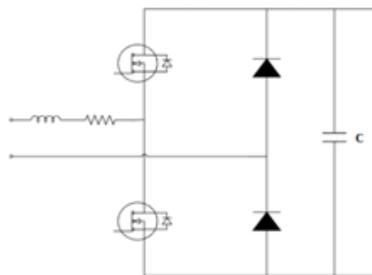


Fig. 3.18 Configuración del convertidor elevador sin puente de tótem.

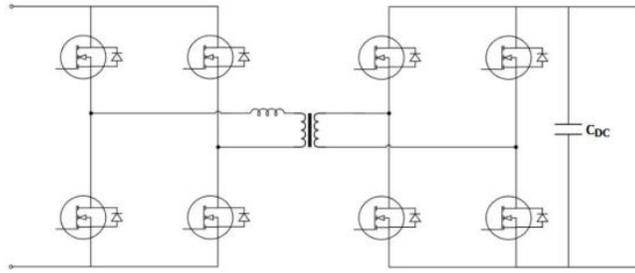


Fig. 3.19 Configuración del Doble puente activo.

No hay implementaciones comerciales o industriales aún de la topología MMR para energización de electrolizadores. Sin embargo, se han realizado simulaciones con diversas pruebas para medir su rendimiento y definir si es un candidato óptimo para ser utilizado en la industria.

En [37] se realizaron pruebas de concepto para la topología MMR para una potencia de salida de 21 [kW], en donde los resultados arrojaron que el Rectificador Modular Multicelda es una topología prometedora, ya que presenta muy buenas características en cuanto a THD, PF, robustez, fiabilidad y sobre todo se destaca la calidad y eficiencia de energía que ofrece. Sin embargo, para trabajos futuros proponen hacer simulaciones más precisas con la topología diseñada para una potencia de salida de 1 [MW], ya que bajo sus suposiciones el rendimiento del MMR a mayores potencias es aún mejor. Concluyen que esta topología tiene un enorme potencial en el área de Power-to-X, que comprende la utilización de los excedentes de energía de fuentes de energía renovables para producir hidrógeno por medio de electrólisis, pero son necesarias más investigaciones.

La corriente del lado de la red no se ve afectada por la utilización de la topología del rectificado modular multicelda, ya que las distorsiones en la señal de corriente son consideradas insignificantes y se puede decir que la corriente es casi sinusoidal, por lo que no se encuentran complicaciones que afecten a la red AC.

Cabe destacar que, ante desequilibrios de los voltajes en la red, por ejemplo, una caída del 10% en la magnitud del voltaje de una de las fases, las corrientes de la red no se ven afectadas en cuanto al mantenimiento de la forma sinusoidal de sus fases.

3.2.4.2 Alcances y limitaciones

A continuación, se explican las principales características, alcances y limitaciones que tiene la topología del Rectificador Modular Multicelda según la bibliografía disponible en la actualidad.

- Su diseño modular aumenta la confiabilidad, ya que al tener módulos separados que entregan individualmente niveles de potencia (más pequeños) a la carga que se encuentra conectado y que debido a esto en caso de que alguno de estos módulos fallase, el rectificador seguiría suministrando energía a la carga sin problema alguno, más que tan solo una disminución de la energía que reciba.
- Disminución del volumen y del peso del rectificador debido a la utilización de un transformador de alta o media frecuencia en lugar de un transformador de baja frecuencia, por lo tanto, disminuye significativamente el tamaño del sistema y el costo.
- Permite escalar a clasificaciones más altas manteniendo flexibilidad.
- Distorsión insignificante en la señal de corriente del lado de la red, por lo que presenta un THD muy bajo.
- Factor de potencia en estado estacionario cercano a 1, el cual se mantiene alto aún ante desequilibrios en la red y variación del porcentaje de carga.
- Sistema robusto.
- Ante desequilibrios severos en la red, el MMR mantiene buenas características de funcionamiento y no causa cambios significativos en los parámetros del sistema.
- Ante una disminución de la carga el desempeño de la topología decae en cuanto a potencia de salida y THD (aumenta al ir bajando el porcentaje de carga).
- Alta eficiencia.
- Diseño complejo debido a sus componentes y control del sistema.

Capítulo 4 Análisis comparativo de topologías y selección de mejor alternativa

4.1 Convertidores CC a CC

En base a lo presentado en el capítulo anterior sobre las 3 topologías de convertidores CC/CC e información adicional recopilada desde la literatura existente, se realiza un análisis comparativo.

Cabe destacar que para la topología IBC se realiza el análisis en base al convertidor descrito en 3.1.2 con la adición de inductor acoplado, ya que para los niveles de potencia que se estudian, los cuales son altos, un IBC con inductor acoplado presenta mejores características.

4.1.1 Ondulación de corriente

En los convertidores CC a CC es de gran relevancia la ondulación en la corriente de salida, ya que a menor ondulación la calidad del hidrógeno obtenido por el proceso de electrólisis es mejor.

En [39] proponen un IBC intercalado multifásico con un inductor acoplado, que posteriormente diseñan y realizan un prototipo de laboratorio de 4,5 [kW], que cuenta con una ondulación de corriente de 8%, pero se puede diseñar de manera que la ondulación sea menor si se requiere.

Para la topología CBC no se encontró literatura que indicara la ondulación de corriente en aplicaciones de alta potencia, pero debido a su composición y funcionamiento se puede decir que su ondulación sería alta [39], pudiendo alcanzar valores por sobre el 10% [20].

Tabla 4.1 Ondulación de corriente de las topologías CC/CC a analizar.

Topología	CBC	IBC	Convertidor LLC resonante
Ondulación de corriente	>10%	8%	Cercano a 0,98%

4.1.2 Eficiencia

En [40] realizan un estudio que compara topologías en cuanto a costos y eficiencia de convertidores CC a CC de un suministro de 2 [MW]. En este documento indican que, para un IBC con inductor acoplado, específicamente un convertidor intercalado de cuatro etapas con un suministro de salida de

2 [MW], las pérdidas del sistema son aprox. de 2,1% de la potencia máxima de salida, esto considerando únicamente las pérdidas de los inductores e IGBTs, por lo que se puede decir que su eficiencia máxima puede alcanzar valores cercanos al 98%. En [39] para el modo de operación reductor del convertidor la eficiencia máxima es de 98,37% a carga nominal y máximo voltaje.

Por otra parte, en [39] se menciona que un convertidor reductor posee baja eficiencia y en [41] indican que para un prototipo de 12 [kW] se obtiene una eficiencia del 96%.

Tabla 4.2 Eficiencia de las topologías CC/CC a analizar.

Topología	CBC	IBC	Convertidor LLC resonante
Eficiencia	96%	≈ 98%	≈ 95%

4.1.3 Complejidad

Tanto el CBC como el IBC tienen una complejidad reducida en cuanto a control, sin embargo, el convertidor de modo de conmutación LLC presenta una mayor complejidad debido a que debe trabajar a frecuencia de conmutación variable y en un área cercana a la frecuencia de resonancia.

4.1.4 Costo

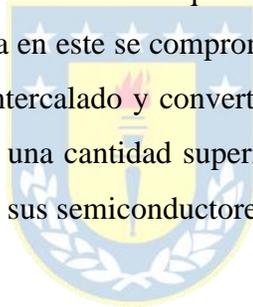
En [40] mencionan que un convertidor CC/CC de una sola etapa (un CBC) sería sumamente costoso, ya que es necesario el uso de más de un inductor de CC de 2 [kA], que además es difícil de fabricar y debido a la corriente alta se requieren por lo menos tres módulos de IGBT con capacidad de 1500 [A] y que estén en paralelo, lo cual puede significar posibles problemas relacionados con el intercambio de corriente. Por otra parte, indican que para la topología IBC se reduce la corriente en los inductores e IGBTs, por lo que se puede decir hay una reducción de costos.

En cuanto al costo del convertidor de modo de conmutación LLC no se encontraron valores disponibles en el mercado o literaturas para potencias del orden de 1 [MW], pero en base a la cantidad de componentes que posee se estima puede ser similar al de un IBC.

4.1.5 Factores adicionales para considerar

El área física que utiliza cada uno de los convertidores estudiados se estima es similar para pequeñas potencias al ser diseños compactos, sin embargo, para altas potencias el tamaño de estos convertidores aumenta significativamente. Como se menciona en [40] el tamaño de un IBC puede ser menor al de un CBC, debido a que el convertidor CC/CC reductor intercalado al tener una corriente menor en los convertidores e IGBTs, además de una ondulación de corriente y de voltaje más reducido tanto en la entrada como en la salida, se ve disminuido el tamaño del banco de condensadores y con todo esto el tamaño final del convertidor. Además, en [39] indican que este convertidor tiene un volumen bajo. El tamaño de un convertidor resonante LLC se estima puede ser similar al de un IBC.

Otro factor importante por considerar es la confiabilidad. La menor confiabilidad la presenta el CBC, ya que, aunque al tener una cantidad reducida de componentes las probabilidades de falla son menores, el hecho de poseer un único MOSFET hace que su confiabilidad se reduzca drásticamente debido a que en caso de ocurrir una falla en este se compromete el convertidor por completo. Luego se encuentran el convertidor reductor intercalado y convertidor de modo de conmutación LLC con una mayor confiabilidad, ya que tienen una cantidad superior de componentes, pero pueden seguir funcionando durante una falla en uno de sus semiconductores.



4.1.6 Resumen

Los resultados del análisis comparativo se presentan a continuación en una tabla y gráfico de radar a modo resumen que recopila las características que posee cada una de estas topologías en cuanto a los aspectos más relevantes estudiados.

Tabla 4.3 Comparación de topologías CC/CC analizadas.

Topología	CBC	IBC	Convertidor LLC resonante
Ondulación de corriente	-	++	++
Eficiencia	-	++	-
Complejidad	++	++	-
Costo	-	o	o
Área que utiliza	-	+	+
Confiabilidad	-	o	o

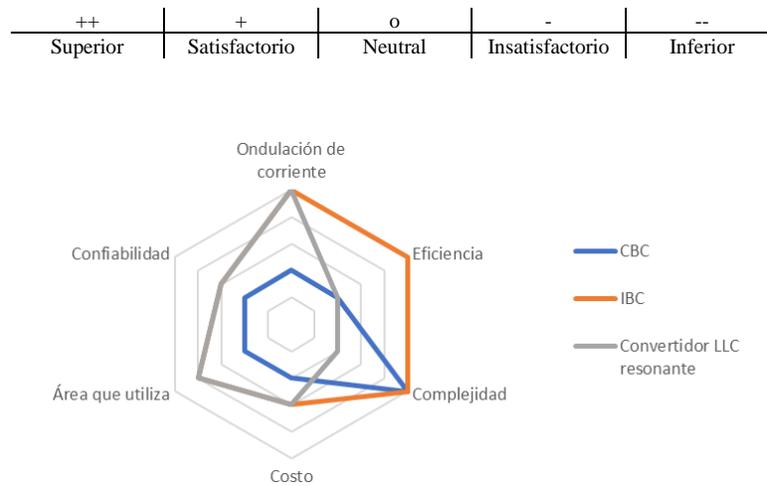


Fig. 4.1 Gráfico de radar comparativo de topologías CC/CC analizadas.

En vista de la información y datos analizados en la presente memoria de título y de los resultados expresados en Tabla 4.3 y Fig.4.1, la topología más beneficiosa para energizar un electrolizador desde una fuente en CC es la IBC con inductor acoplado, ya que presenta una muy buena eficiencia, además de baja complejidad y ondulación de corriente de salida. En cuanto a la topología menos beneficiosa, corresponde al convertidor reductor clásico, ya que, aunque su complejidad es baja al tratarse de un circuito muy simple, tiene baja eficiencia, alta ondulación de corriente y se recomienda para aplicaciones en baja potencia, no para el orden de los [MW].

4.2 Convertidores CA a CC

El análisis comparativo entre las topologías de convertidores CA/CC del capítulo 3.2 se lleva a cabo por medio de información recopilada en la literatura, específicamente de papers en donde realizan simulaciones para energización de electrolizadores con estos convertidores. Para cada topología se detalla en qué condiciones y características se realizan las simulaciones y pruebas experimentales, con el objetivo de contar con la mayor cantidad de información posible a la hora de realizar la comparación y que cumplan con lo necesario para el caso en estudio, que corresponde a la energización de un electrolizador de gran potencia.

Para los casos del 6-TR y del 3PIBR se recopila la información directamente desde [12], donde el modelo de ambos convertidores se diseñó y construyó en Simulink. El modelo de estas simulaciones se lleva a cabo usando parámetros reales de una instalación de 20 [MW] y datos recolectados del sistema de control distribuido (DCS), donde usan además el software SCADA.

Los parámetros de las simulaciones de los convertidores antes mencionados se encuentran en la Tabla A.1 del Anexo A y los resultados obtenidos en la simulación se muestran en la Tabla 4.4 para el 100% de la carga y en la Tabla 4.5 para el 20% de la carga.

Tabla 4.4. Resultados simulación de puente de tiristores de seis pulsos a 100% y 20% de la carga nominal.

	100% de la carga	20% de la carga
THD	Alrededor de un 24%	78%
Factor de potencia	Alrededor de 0,88	0,71
Factor de ondulación	23,8%	35,75%

Tabla 4.5. Resultados simulación de rectificador intercalado de 3 fases a 100% y 20% de la carga nominal.

	100% de la carga	20% de la carga
THD	< 5% (alrededor de un 4,5%)	Alrededor de un 12%
Factor de potencia	Alrededor de 0,96	0,96
Factor de ondulación	3,2%	5,33%

Por otra parte, en [37] realizan simulaciones para los casos del rectificador de tiristores de 12 pulsos y del rectificador modular multicelda. Las simulaciones del rectificador de tiristores de 12 pulsos se llevaron a cabo con una herramienta llamada PLECS, donde los parámetros utilizados son los que se detallan en la Tabla A.2 en el Anexo A. Los resultados obtenidos para el rectificador de tiristores de

12 pulsos sin filtro sintonizado pasivo y con filtro sintonizado pasivo se encuentran en la Tabla 4.6 a condiciones ideales de plena carga y en la Tabla 4.7 a 20% de la carga nominal.

Tabla 4.6. Resultados simulación de rectificador de tiristores de 12 pulsos sin filtro trampa pasivo a 100% y 20% de la carga nominal.

	100% de carga	20% de carga
THD_I	8,92%	10,78%
Factor de potencia (PF)	0,82	0,35
Eficiencia	98,95%	98,38%

Tabla 4.7. Resultados simulación de rectificador de tiristores de 12 pulsos con filtro trampa pasivo a 100% y 20% de la carga nominal.

	100% de carga	20% de carga
THD_I	3,64%	6,06%
Factor de potencia (PF)	0,99	0,92
Eficiencia	98,94%	98,35%

En base a los resultados mostrados en la Tabla 4.6 y Tabla 4.7 se puede notar que la implementación de un filtro sintonizado pasivo mejora notablemente los parámetros de THD y factor de potencia para el rectificador de tiristores de 12 pulsos, por lo que se enfatiza la recomendación de su uso con esta topología. En cuanto a eficiencia, los resultados muestran que es similar para el rectificador con la implementación del filtro que sin su implementación.

Los parámetros utilizados para las simulaciones realizadas del rectificador modular multimodo son entregadas en la Tabla A.3 en el Anexo A, mientras que las especificaciones del módulo para cada una de las celdas MMR se encuentran en la Tabla A.4 en el Anexo A. Los resultados para carga parcial y a un 20% de carga se encuentran en la Tabla 4.8.

Cabe destacar que las pruebas se realizaron a menor escala debido a limitaciones de la potencia de cómputo de los equipos disponibles, específicamente se realizaron haciendo uso de 1 celda para cada una de las 3 fases, por lo que la potencia nominal total es de aproximadamente 21 [kW].

Tabla 4.8. Resultados simulación de rectificador modular multimodo a 100% y 20% de la carga nominal.

	100% de carga	20% de carga
THD_I	2,55%	9,48%
Factor de potencia (PF)	0,99	0,99
Eficiencia	99,27%	99,62%

Como información adicional se tiene que en [37] también realizan pruebas para la topología denominada Rectificador de diodos de 12 pulsos con interruptor multifásico, cuyas siglas son 12-DRMC. Esta topología está constituida por una etapa rectificadora que utiliza un rectificador de diodos de 12 pulsos que convierte la entrada de CA a CC para ser utilizado en la segunda etapa, la cual corresponde a un convertidor CC/CC y se encuentra compuesta por un convertidor reductor con IGBTs de silicio con diodos, lo cual corresponde a la misma topología de convertidor presentado en la sección 3.2.3 (Rectificador reductor intercalado de 3 fases).

En vista de lo mencionado se presentan los resultados que se obtuvieron en las simulaciones realizadas en [37] para esta topología con fines de tener mayor cantidad de datos al momento de realizar la comparación entre topologías estudiadas. En la Tabla A.5 en el anexo A se entregan los parámetros de simulación de la topología 12-DRMC y en la Tabla 4.9 y 4.10 los resultados obtenidos.

Tabla 4.9. Resultados simulación de 12-DRMC sin filtro trampa a 100% y 20% de la carga nominal.

	100% de carga	20% de carga
THD_I	8,07%	14,74%
Factor de potencia (PF)	0,97	0,96
Eficiencia	95,83%	91,18%

Tabla 4.10. Resultados simulación de 12-DRMC con filtro trampa a 100% y 20% de la carga nominal.

	100% de carga	20% de carga
THD_I	2,12%	1,66%
Factor de potencia (PF)	0,95	0,34
Eficiencia	Alrededor de 95,8%	Alrededor de 91,1%

Al ver los valores entregados en la Tabla 4.9 y Tabla 4.10 se puede observar que, si bien en cuanto a THD los resultados son bastante mejores con la implementación de un filtro sintonizado, a la hora de que esta topología deba funcionar a bajas cargas (20% de la carga nominal) su factor de potencia disminuye considerablemente, por lo que hay una gran presencia de potencia reactiva, lo que es una mala característica para el funcionamiento del sistema. En cuanto a eficiencia se puede notar que ambas tienen alrededor de los mismos valores.

Para las comparaciones que se realizan en los puntos 4.2.1, 4.2.2 y 4.2.3, en la topología rectificador de tiristores de 12 pulsos los datos utilizados son los que se entregan con la implementación de un

filtro sintonizado pasivo, ya que presenta mejores valores en los resultados. En la topología rectificador intercalado de 3 fases se utilizan los datos entregados en la Tabla 4.9, ya que como se mencionó corresponden a la misma topología pero son mencionadas con un nombre distinto en las literaturas desde las cuales se extrajeron los datos, además, se pudo ver que los valores de factor de potencia son similares y los de THD no son tan cercanos, pero esto puede deberse en gran medida a que los valores recopilados en la Tabla 4.3 son de una simulación realizada para una potencia 20 veces mayor que la de la Tabla 4.7 (20 [MW] versus 1 [MW]).

4.2.1 THD

Tabla 4.11 THD de las diferentes topologías a carga nominal.

Topología	6-TR	12-TR	3PIBR	MMR
THD	24%	3,64%	8,07%	2,55%



Fig. 4.2 THD de las diferentes topologías a carga nominal.

Tabla 4.12 THD de las topologías a analizar a 20% de la carga nominal.

Topología	6-TR	12-TR	3PIBR	MMR
THD	78%	6,06%	14,74%	9,48%

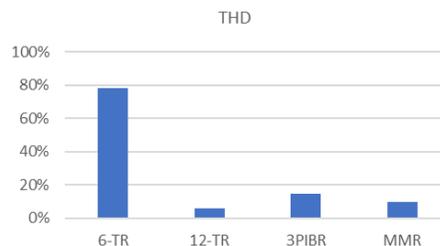


Fig. 4.3 THD de las diferentes topologías a 20% de la carga nominal.

Se puede ver que el THD de las topologías MMR y rectificador de tiristores de 12 pulsos tiene valores bajos, siendo esta distorsión total armónica inferior a 5%. En el caso de carga parcial, específicamente a 20% de la carga nominal, el THD se ve incrementado en las 4 topologías.

Tanto a plena carga como a carga parcial la topología que exhibe los peores valores en cuanto a THD es el puente de tiristores de 6 pulsos.

4.2.2 Factor de potencia

Tabla 4.13 PF de las topologías a analizar a carga nominal.

Topología	6-TR	12-TR	3PIBR	MMR
PF	0,88	0,99	0,97	0,99

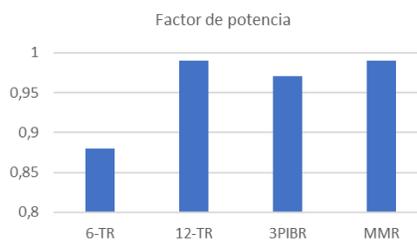


Fig. 4.4 PF de las diferentes topologías a carga nominal.

Tabla 4.14 PF de las topologías a analizar a 20% de la carga nominal.

Topología	6-TR	12-TR	3PIBR	MMR
PF	0,71	0,92	0,96	0,99

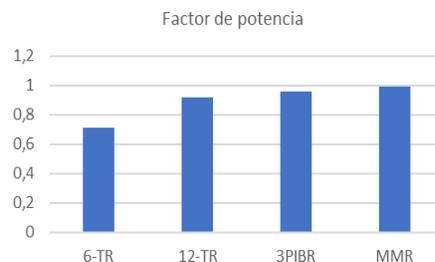


Fig. 4.5 PF de las diferentes topologías a 20% de la carga nominal.

A plena carga las topologías exhiben valores bastante buenos en cuanto a factor de potencia, donde las topologías rectificador reductor intercalado de 3 fases y rectificador modular multicelda cumplen

con tener un factor de potencia 0,93 inductivo en cualquier condición de carga con tensión nominal inferior a 30 [kW].

Es importante destacar que el factor de potencia de la topología MMR no se ve mayormente afectada a condiciones de carga parcial, lo cual es una característica bastante buena para el sistema.

4.2.3 Eficiencia

La eficiencia de las topologías de convertidores a analizar se estudia como la relación de la potencia activa de entrada de la red con la potencia activa que se entrega a la carga nominal.

Tabla 4.15 Eficiencia de las topologías a analizar a carga nominal.

Topología	6-TR	12-TR	3PIBR	MMR
Eficiencia	≈ 99%	98,94%	95,83%	99,27%

Tabla 4.16 PF de las topologías a analizar a 20% de la carga nominal.

Topología	6-TR	12-TR	3PIBR	MMR
Eficiencia	-	98,35%	91,18%	99,62%

4.2.4 Complejidad

La topología puente rectificador de 6 pulsos tiene una complejidad bastante más baja que el resto de las topologías, ya que posee una cantidad inferior de componentes y diseño simple. La que le sigue en menor complejidad es la topología rectificadora de tiristores de 12 pulsos, ya que corresponde a dos convertidores de 6 pulsos. Después se encuentra el rectificador reductor intercalado de 3 fases y por último el rectificador modular multicelda, ya que la topología MMR presenta una alta complejidad a nivel de control y cuenta con una gran cantidad de componentes, además de su diseño modular y gran cantidad de unidades básicas para alcanzar mayores potencias de salida.

4.2.5 Costo

El costo de un convertidor depende de varios factores, como por ejemplo nivel de potencia, eficiencia y calidad de los componentes, entre otras cosas. Debido a la gran cantidad de factores que

hacen variar el costo de cada convertidor, se decide estimar la característica costo en cuanto a la complejidad. El convertidor CA/CC que se estima comprende rangos de menor costo es el puente de tiristores de 6 pulsos debido a su reducida cantidad de componentes y control menos sofisticado, seguido de las topologías de rectificador de 12 pulsos y MMR y por último se encuentra la topología del rectificador intercalado de 3 fases.

4.2.6 Factores adicionales para considerar

Como información adicional, si se quiere realizar una comparación entre las topologías analizadas en términos de área física que utiliza, se destaca la topología MMR, ya que al no hacer uso de un transformador de baja frecuencia el área que utiliza para su instalación es muy inferior a la de las demás topologías.

Por otra parte, en cuanto a confiabilidad la topología puente de tiristores de 12 pulsos debiera tener una buena confiabilidad debido a su diseño simple, al igual que el rectificador de tiristores de 6 pulsos. Sin embargo, si se considera el asegurar el suministro de energía en caso de fallas, la topología MMR tiene redundancia debido a la cantidad de unidades básicas que utiliza y luego se encuentra el rectificador reductor intercalado de 3 fases, que al modificar el ángulo de control de los semiconductores puede seguir funcionando.

4.2.7 Resumen

Resumiendo lo planteado en el presente capítulo en cuanto al análisis comparativo de las topologías analizadas de convertidores CA a CC, se entrega la Tabla 4.17 y Fig. 4.6 comparando los parámetros que se consideraron relevantes.

Tabla 4.17 Comparación de topologías CA/CC analizadas.

Topología	6-TR	12-TR	3PIBR	MMR
THD	-	+	o	++
Factor de potencia	o	+	+	++
Eficiencia	+	+	o	++
Complejidad	++	++	+	--
Costo	++	+	o	+
Área que utiliza	o	o	o	++
Confiabilidad	o	+	o	++

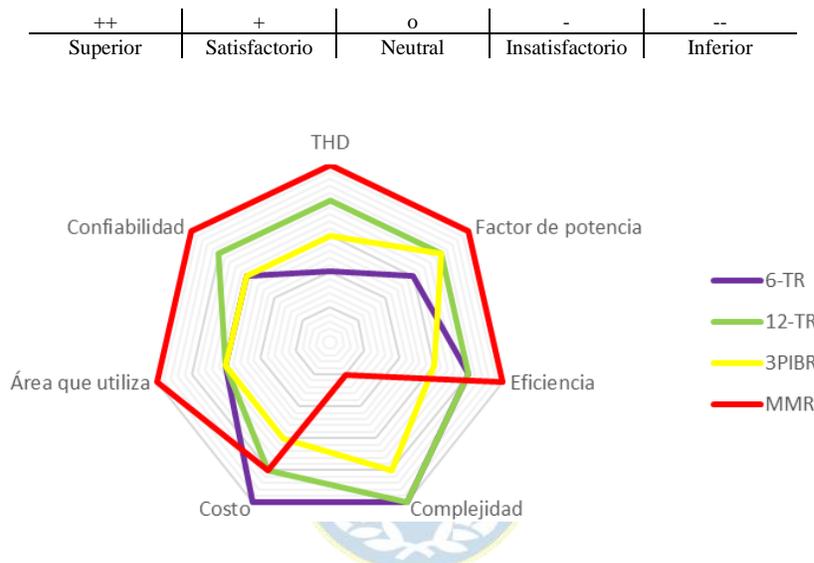


Fig. 4.6 Gráfico de radar comparativo de topologías CA/CC analizadas.

En base a lo analizado y a los datos entregados en la Tabla 4.17 y la Fig. 4.6 se puede decir que la topología más ventajosa en cuanto a los criterios establecidos es la del MMR, ya que cumple satisfactoriamente la mayor parte de los factores que se espera posea un convertidor CA/CC para la energización de un electrolizador, siendo su único inconveniente el nivel de complejidad que presenta debido a su control y diseño modular.

Por otra parte, se obtiene que la topología menos ventajosa dentro de las estudiadas corresponde a la del rectificador reductor intercalado de 3 fases, ya que la distorsión armónica total de la corriente de entrada con esta topología se encuentra alrededor del 8% y su eficiencia es de 95,83% a carga nominal, lo cual se encuentra bastante alejado del 98-99% de eficiencia que alcanzan las otras topologías de convertidores analizados.

Capítulo 5 Simulación

De acuerdo con el análisis realizado en el capítulo anterior, la topología de convertidor CA a CC seleccionada para simular corresponde a la MMR, ya que presenta las mejores características en comparación con las restantes topologías analizadas. Se realiza la simulación del convertidor energizando a un electrolizador para observar y analizar los resultados que entrega.

5.1 Electrolizador

Para la simulación en la parte del electrolizador se utiliza como base los parámetros de un electrolizador Titan EZ-2000 [42] y el modelo mencionado en el capítulo 2.2.2, las especificaciones de dicho dispositivo se encuentran en la Tabla B.1 en el Anexo B.

Se decide trabajar con un electrodo de ánodo de Pt-Ir y un electrodo de cátodo de Pt, además de utilizar un electrolito de Nafion 117. En [13] se presentan valores recolectados desde diversas literaturas respecto de la densidad de corriente de intercambio para la reacción de reducción de oxígeno y para la oxidación de hidrógeno para Pt y Pt-Ir. La densidad de corriente de intercambio de ánodo para Pt es considerada como $1 \times 10^{-7} \left[\frac{A}{cm^2} \right]$ y la densidad de corriente de intercambio de cátodo para Pt se establece como $1 \times 10^{-3} \left[\frac{A}{cm^2} \right]$.

La conductividad del electrolito Nafion para los 30°C a los que se encuentra la celda para la simulación del presente informe no pudo ser obtenida, por lo que se decidió usar $0,14 \left[\frac{S}{cm} \right]$, el cual es un valor que utiliza recurrentemente en la literatura [13], a una temperatura de 80°C y para una membrana sumergida en agua.

Se decide trabajar a corriente nominal, que corresponde a 72 [A], por lo que la densidad de corriente i es $1,0375 \left[\frac{A}{cm^2} \right]$.

Con los parámetros definidos y especificados en las Tablas 5.1 y 5.2, se tiene que $V_0 = 1,2254 [V]$ y $R_{cell} = 0,0102 [\Omega]$.

Tabla 5.1: Parámetros y constantes del circuito equivalente de electrolizador SPE.

Símbolo	Significado	Valor
R	Constante de los gases.	$8,314 \left[\frac{J}{mol \cdot K} \right]$
T	Temperatura en Kelvin a la que se lleva a cabo la reacción.	$303,15 [K]$
F	Constante de Faraday.	$96.485 \left[\frac{C}{mol} \right]$
i_{A0}	Densidad de corriente de intercambio en el ánodo.	$1 \times 10^{-7} \left[\frac{A}{cm^2} \right]$
i_{C0}	Densidad de corriente de intercambio en el cátodo.	$1 \times 10^{-3} \left[\frac{A}{cm^2} \right]$
L_B	Espesor del SPE.	$0,0178 [cm]$
σ_B	Conductividad del electrolito.	$0,14 \left[\frac{S}{cm} \right]$

Tabla 5.2 Datos de entrada electrolizador Titan EZ-2000.

Celdas	4
Voltaje	8 [V]
Corriente de entrada	0-72 [A]
Área activa	69,4 [cm ²]

5.2 Rectificador Modular Multicelda

Se considera la conexión de los terminales de entrada del MMR a una red de media tensión de 33 [kV]. Dado que se considera la utilización de los módulos con tensión nominal de 650 [V] para la implementación del MMR, entonces es necesario utilizar 17 módulos por fase, lo que resulta en un total de 51 módulos para la construcción de la etapa de entrada del convertidor. Para la realización de la simulación del Rectificador Modular Multicelda se simula un único módulo de celda por fase, ya que las capacidades computacionales con las que se dispone para la simulación son limitadas. Sin embargo, debido a la naturaleza de la topología del MMR, los resultados que se obtengan de simular este módulo de celda son válidas para un número de celdas mayor.

Cabe destacar que se decide utilizar un total de 72 celdas en serie por fase simulada, lo que equivale a tener 18 electrolizadores Titan EZ-2000 en serie como carga en cada fase.

Las características de cada módulo de celda de MMR simulado se entregan en la Tabla 5.3 y la conexión alimentando a electrolizadores se observa en la Fig. 5.1, donde se puede notar que tienen alimentación trifásica y poseen conexión estrella.

Tabla 5.3: Especificaciones del módulo de celdas de MMR.

Voltaje de entrada	650 [V]
Voltaje de salida	141 [V]
Potencia nominal	10.152 [W]

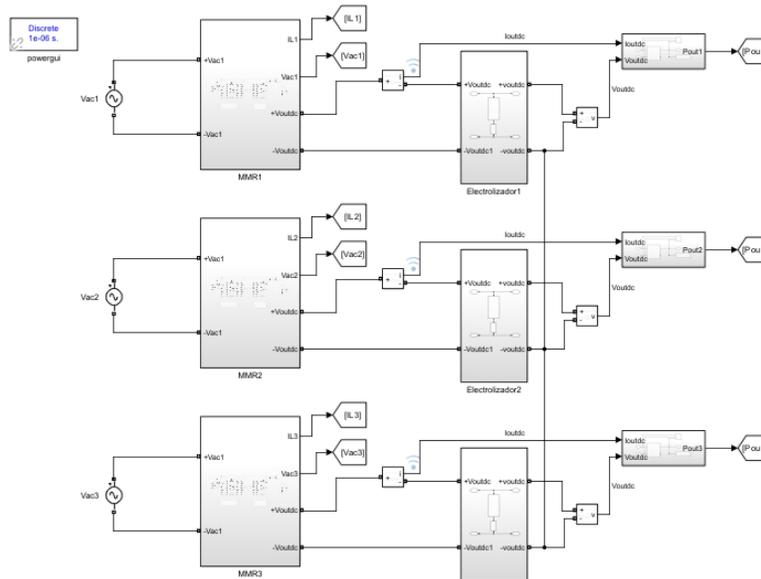


Fig. 5.1 Simulación MMR para la energización de electrolizadores.

Los valores utilizados para la simulación del convertidor elevador tótem (etapa CA/CC) y del Doble puente activo (etapa CC/CC) se encuentran en Anexo B, donde también se detallan los parámetros utilizados para el transformador del doble puente activo. La frecuencia de conmutación de los MOSFETs de ambos convertidores es de 5 [kHz] y los valores de sus parámetros son los predispuestos por Simulink, al igual que los de los diodos del convertidor elevador tótem.

En el Anexo B se encuentran imágenes de los modelos de convertidores utilizados, métodos de control y las conexiones para las simulaciones realizadas en el presente capítulo.

Cabe destacar que los resultados entregados corresponden a las mediciones realizadas en una de las fases, pero las tres fases entregan resultados similares.

5.3 Resultados y análisis de simulación

La simulación del rectificador modular multicelda energizando a un electrolizador se realiza en Matlab/Simulink R2023a. En primera instancia se realiza la simulación del MMR energizando al electrolizador a condiciones de carga nominal y en segunda instancia se realizan tres simulaciones adicionales en donde el MMR energiza al electrolizador en un principio a condiciones de carga nominal y luego de un instante determinado ocurre una caída de carga, específicamente a cargas de 75%, 50% y 25% de la carga nominal, esto con la finalidad de observar y analizar el comportamiento del convertidor y su sistema de control ante condiciones de cargas parciales.

Las condiciones por analizar corresponden a las formas de onda de salida del MMR, distorsión armónica total de la corriente del lado de la red, factor de potencia y eficiencia del rectificador, además de otros factores adicionales que se deben tener en consideración como complejidad, costo, área física que utiliza y confiabilidad.

5.3.1 A condiciones de carga nominal

La simulación se realiza bajo condiciones de balance en la red (voltaje de entrada al MMR de 650 [V] y desfase de 120° entre fases) y a carga nominal. El trabajo a carga nominal se obtiene poniendo el voltaje de salida del MMR de referencia en 141 [V] para la alimentación del electrolizador, ya que la carga nominal corresponde a los 18 electrolizadores Titan EZ-2000 en serie (en cada fase) que se mencionan en el punto 2 del presente capítulo.

5.3.1.1 Salida

La corriente de salida, voltaje de salida y potencia de salida del MMR en la fase a se pueden ver en las Fig. 5.2a, 5.2b y 5.2c, respectivamente.

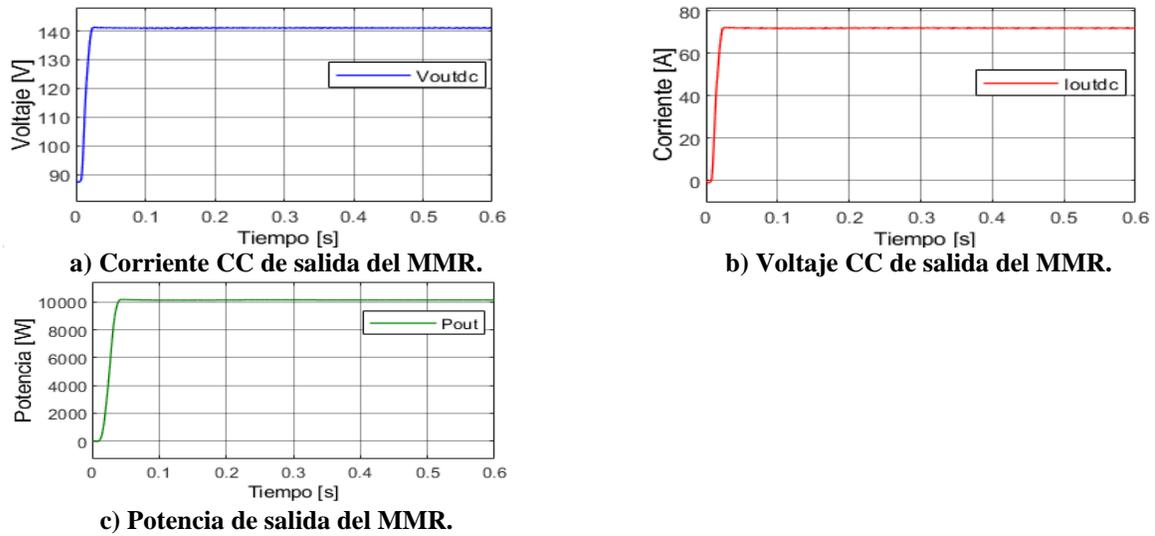


Fig. 5.2 Resultados de simulación para MMR a carga nominal (salida).

Aquí se puede notar que la potencia del electrolizador que se encuentra energizado por el MMR es alrededor de $10 [kW]$ en estado estacionario, lo que resulta en una potencia total de específicamente $10.134 [W]$, mientras que el voltaje que pasa por la caga es de $141,13 [V]$ y la corriente es de $72,04 [A]$, que corresponde al electrolizador operando a potencia nominal.

5.3.1.2 THD

La corriente del lado de la red se muestra en la Fig. 5.2, la cual se ve sinusoidal, con la presencia de pequeñas distorsiones cerca del cruce por cero, lo que indica una buena calidad de la energía del sistema.

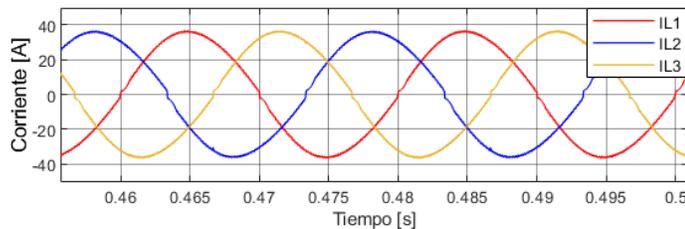


Fig. 5.2 Corriente del lado de la red.

Para obtener una forma de onda de corriente sinusoidal, en esta topología se utiliza un método llamado conmutación suave (soft switching). Cuando la forma de onda de voltaje se encuentra en el semiciclo positivo el convertidor está funcionando con un ancho de pulso específico y después cuando

el voltaje pasa por voltaje cero o cercano a este se realiza la conmutación de los semiconductores del convertidor elevador tótem, quedando posteriormente con un ancho de pulso distinto. Además, en la parte de control se busca mantener el voltaje en cero por un pequeño intervalo de tiempo para que se pueda realizar de mejor manera la conmutación de los semiconductores. Sin embargo, aún con esta metodología no se logra una conmutación en condiciones óptimas y se produce una distorsión en el cruce por cero, lo que se ve reflejado en el problema que se observa en la onda de corriente de la Fig. 5.2.

La distorsión armónica total de la corriente del lado de la red para la simulación realizada arroja un valor de 2,54% y las armónicas presentes se pueden apreciar en la Fig. 5.3, que corresponde a un análisis FFT. En la imagen se puede notar que la magnitud de las armónicas presentes es muy baja, siendo la armónica de tercer orden de 2,193% de la magnitud de la fundamental, la quinta de 0,74%, la 11va de 0,192% y 13va de 0,141%. El THD obtenido de 2,54% se encuentra por debajo del límite de THD establecido por la Norma IEEE Std 519-2014, el cual corresponde a un 5,0%, por lo cual cumple con los valores admisibles establecidos en esta norma para sistemas que operan a tensión nominal de 120 [V] a 69 [kV].

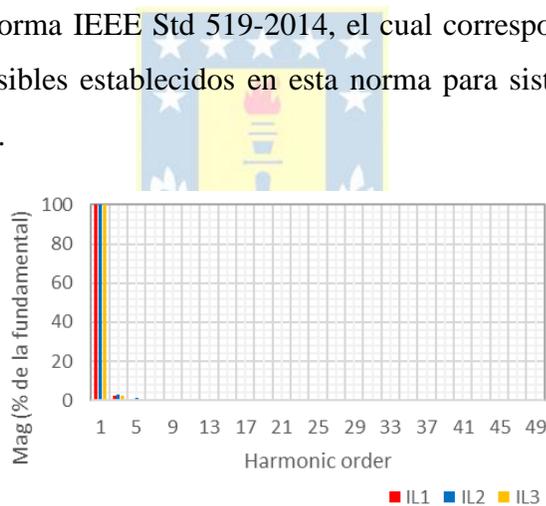
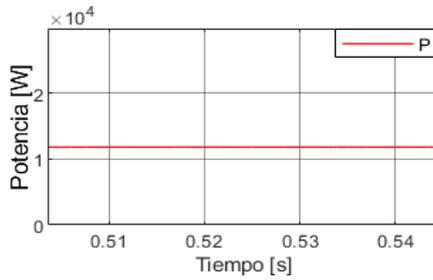


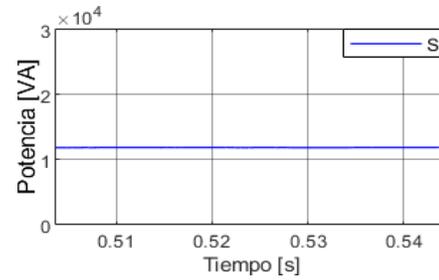
Fig. 5.3 Armónicos de la corriente del lado de la red.

5.3.1.3 Factor de potencia

En la Fig. 5.4a se puede apreciar la potencia activa del lado de la red, que tiene un valor de 11.828 [W] y en la Fig. 5.4b se muestra la potencia aparente, la cual alcanza un valor de 11.829 [W], por lo que el factor de potencia es de 0,9999.



a) Potencia activa P del lado de la red.



b) Potencia aparente S del lado de la red.

Fig. 5.4 Resultados de simulación para MMR a carga nominal (potencia).

5.3.1.4 Eficiencia

La eficiencia del sistema se obtiene a través de la potencia suministrada al electrolizador en relación con la potencia del lado de la red. Como se menciona en las secciones 5.3.1.1 y 5.3.1.3, la potencia de salida es de 10.134 [W] y la potencia de entrada es de 11.828 [W], lo que resulta en una eficiencia de 85,68%. Las pérdidas que se consideran en la simulación son de semiconductores, componentes pasivos y transformador.

La eficiencia obtenida para el convertidor doble puente activo se estima tomando en cuenta valores estándares de resistencia e inductancia para un transformador de alta frecuencia de la potencia con la que se está trabajando, mientras que la eficiencia de los semiconductores utilizados se obtiene con valores predeterminados de MOSFETs y diodos, los cuales son entregados por la librería Specialized Power Systems. Cabe destacar que la mayor parte de las pérdidas se deben al transformador en el convertidor doble puente activo, y por sobre todo dependen del valor de resistencias e inductancias del transformador primario y secundario. La optimización de los parámetros del transformador escapa del objetivo del estudio de la presente memoria y, por tanto, significa una oportunidad de mejora que pudiese ser un nuevo tema de investigación.

En vista de lo mencionado, se puede decir que el MMR presenta una buena eficiencia y considerando que para esta topología se tienen módulos en paralelo, las pérdidas se ven repartidas entre estos módulos y, por lo tanto, aumenta la eficiencia a mayores potencias.

De esta manera, se tiene que el MMR trabajando a plena carga presenta los valores de los parámetros que se entregan en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4: Parámetros simulación del módulo de celdas de MMR con carga nominal.

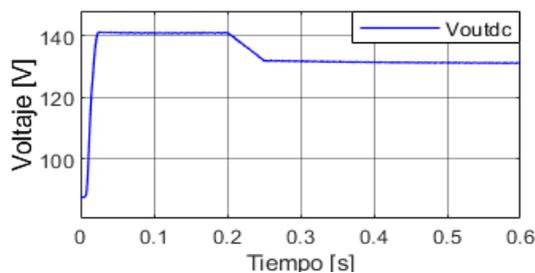
Abreviación	Significado	Valor
V_{acRMS}	Voltaje RMS del lado de la red.	459,62 [V]
I_{LRMS}	Corriente RMS del lado de la red.	25,84 [A]
P	Potencia activa del lado de la red.	11.828 [W]
S	Potencia aparente del lado de la red.	11.829 [W]
PF	Factor de potencia.	0,9999
V_{outdc}	Voltaje de salida CC.	141,13 [V]
I_{outdc}	Corriente de salida CC.	72,04 [A]
P_{out}	Potencia activa de salida CC.	10.134 [W]
THD	Distorsión armónica total.	2,54%
η	Eficiencia.	85,68%

5.3.2 A condiciones de carga parcial

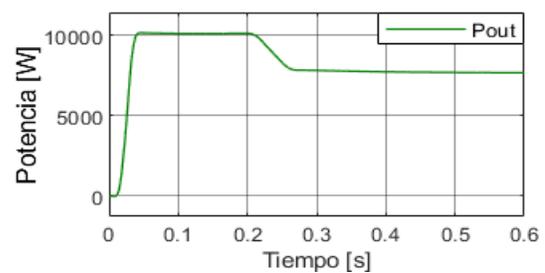
Se realiza el mismo análisis, pero esta vez para distintos porcentajes de cargas parciales para ver el comportamiento del MMR. Las simulaciones son realizadas para una caída de la carga nominal hasta un 75%, 50% y 25% de la carga nominal, lo que se realiza por medio del cambio de voltaje de referencia para el voltaje de salida del convertidor CC a CC.

5.3.2.1 Salida

La corriente de salida y potencia de salida del MMR en la fase a se pueden ver en las Fig. 5.5, Fig. 5.6 y Fig. 5.7 para la caída a 75%, 50% y 25% de la carga nominal, respectivamente. Se puede notar que el convertidor MMR alcanza los valores de voltaje de referencia para las caídas de voltaje, por lo que podría seguir funcionando aún hasta con un 25% de la carga nominal. La potencia de salida disminuye a medida que se reduce el porcentaje de carga.

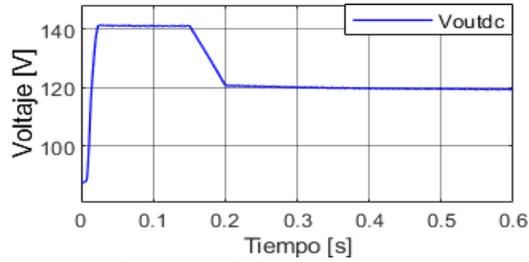


a) Corriente CC de salida del MMR.

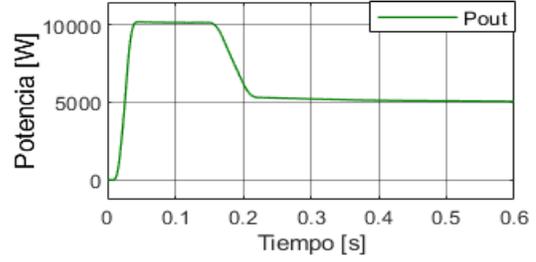


b) Potencia de salida del MMR.

Fig. 5.5 Resultados de simulación para MMR con caída a 75% de carga nominal (salida).

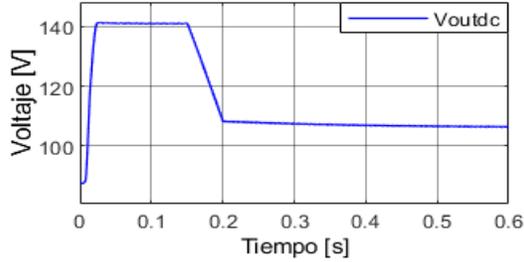


a) Corriente CC de salida del MMR.

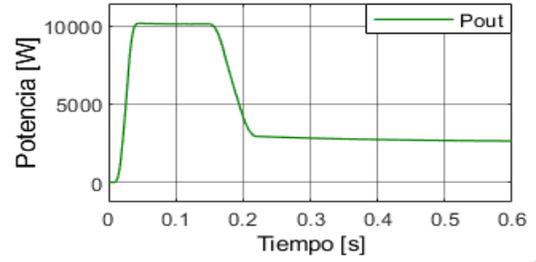


b) Potencia de salida del MMR.

Fig. 5.6 Resultados de simulación para MMR con caída a 50% de carga nominal (salida).



a) Corriente CC de salida del MMR.

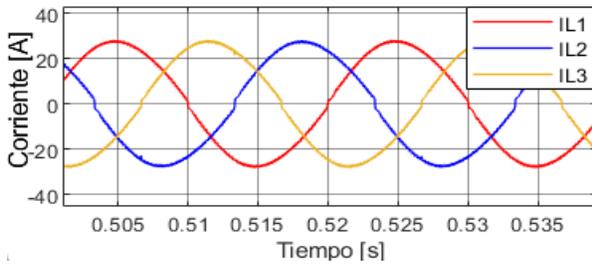


b) Potencia de salida del MMR.

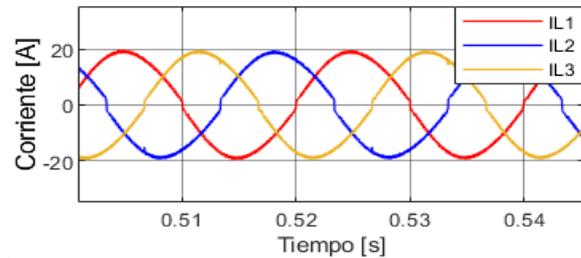
Fig. 5.7 Resultados de simulación para MMR con caída a 25% de carga nominal (salida).

5.3.2.2 THD

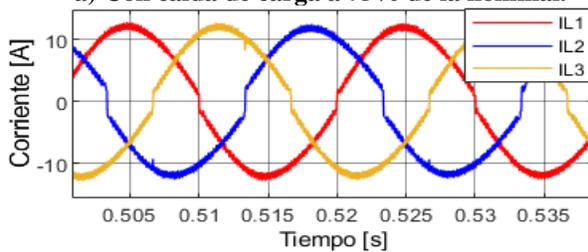
La corriente del lado de la red para los distintos cambios de porcentaje de carga se muestra en la Fig. 5.8.



a) Con caída de carga a 75% de la nominal.



b) Con caída de carga a 50% de la nominal.



c) Con caída de carga a 25% de la nominal.

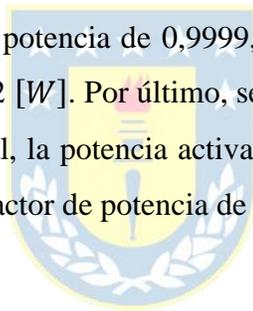
Fig. 5.8 Corriente del lado de la red.

Aquí se puede observar que mientras menor es el porcentaje de carga la forma de onda de la corriente del lado de la red se va volviendo menos sinusoidal, ya que va incrementando la presencia de distorsiones armónicas, lo que significa una menor calidad de energía del sistema a menores porcentajes de carga.

El THD de la corriente del lado de la red para las simulaciones realizadas es de 3,01% para la caída a un 75% de la carga nominal, mientras que para las caídas a 50% y 25% de la carga nominal los valores de THD son de 4,14% y 6,45%, respectivamente.

5.3.2.3 Factor de potencia

Para una caída de 100% de la carga nominal al 75%, la potencia activa es 8.955 [W] y la potencia aparente es 8.956 [W], por lo que el factor de potencia es 0,9999. Mientras que para una caída al 50% de carga nominal, se tiene un factor de potencia de 0,9999, ya que la potencia activa es de 6.138,5 [W] y la potencia aparente es de 6.139,2 [W]. Por último, se tiene que, si ocurre una disminución en la carga y llega a un 25% de la nominal, la potencia activa obtenida es de 3.817 [W] y la potencia aparente es 3.818 [W], por lo tanto, el factor de potencia de igual manera es de 0,9999.



5.3.2.4 Eficiencia

Al haber una disminución en la carga al 75% de la carga nominal, la potencia de salida se ve disminuida a 7.675 [W] y al ser la potencia de entrada 8.955 [W], la eficiencia del MMR es de 85,71%. Por otra parte, para una disminución al 50% de la carga nominal, la potencia de salida es 5.047 [W] y la de entrada 6.138,5 [W], teniendo así una eficiencia de 82,23% y para una caída al 25% de la carga nominal se logra una eficiencia de 69,01%, con una potencia de salida de 2.634 [W] y una potencia de entrada de 3.817 [W]. En la Fig. 5.9 se grafica la eficiencia obtenida versus porcentaje de carga.

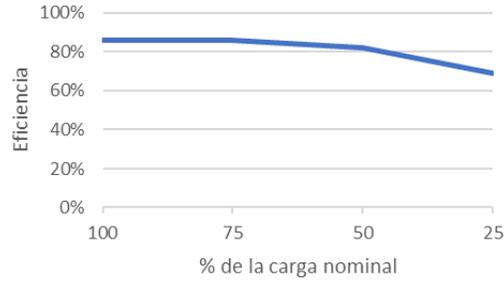


Fig. 5.9 Eficiencia obtenida versus porcentaje de carga.

En la Tabla 5.5 se encuentran los parámetros arrojados por las simulaciones para una disminución de carga nominal a 75%, 50% y 25% de la carga nominal.

Tabla 5.5: Parámetros simulación del módulo de celdas de MMR con cargas parciales.

Parámetro	75% de la carga nominal	50% de la carga nominal	25% de la carga nominal
V_{ac1RMS}	459,62 [V]	459,62 [V]	459,62 [V]
I_{L1RMS}	19,81 [A]	13,73 [A]	8,47 [A]
P_1	8.955 [W]	6.138,5 [W]	3.817 [W]
S_1	8.956 [W]	6.139,2 [W]	3.818 [W]
PF_1	0,9999	0,9999	0,9999
V_{outdc1}	131,3 [V]	119,4 [V]	106,5 [V]
I_{outdc1}	58,6 [A]	13,65 [A]	24,92 [A]
P_{out1}	7.675 [W]	5.047 [W]	2.634 [W]
TDH	3,01%	4,14%	6,45%
η	85,71%	82,23%	69,01%

Los resultados muestran un buen funcionamiento de la topología del rectificador frente a estos cambios de carga, sobre todo cuando se encuentran más cercanos al funcionamiento con carga nominal. Es de suma importancia recalcar que lo habitual es que el electrolizador sea operado a carga nominal, por lo que la mayor parte del tiempo la calidad de la forma de onda y eficiencia serán los obtenidos en la simulación realizada en el punto 5.3.1.

Por otra parte, el que para cada caso visto de disminución del porcentaje de carga se alcanzara el voltaje de referencia, demuestra la robustez del sistema ante cambios en la carga, además del correcto funcionamiento del sistema de control con el que cuenta el MMR y un factor de potencia casi unitario.

5.3.3 Bajo condiciones de desbalance en la red

Se limita el estudio a desbalance en la red en cuanto a magnitud del voltaje de red, que en este caso corresponde a un aumento del 10% de magnitud de voltaje de alimentación en la fase b y una disminución del 10% de magnitud de voltaje de alimentación en la fase c.

5.3.3.1 Salida

La corriente de salida, voltaje de salida y potencia de salida del MMR en las fases a, b y c se muestran en la Fig. 5.10. Cabe destacar que los valores con números 1, 2 y 3 corresponden a las fases a, b y c, respectivamente.

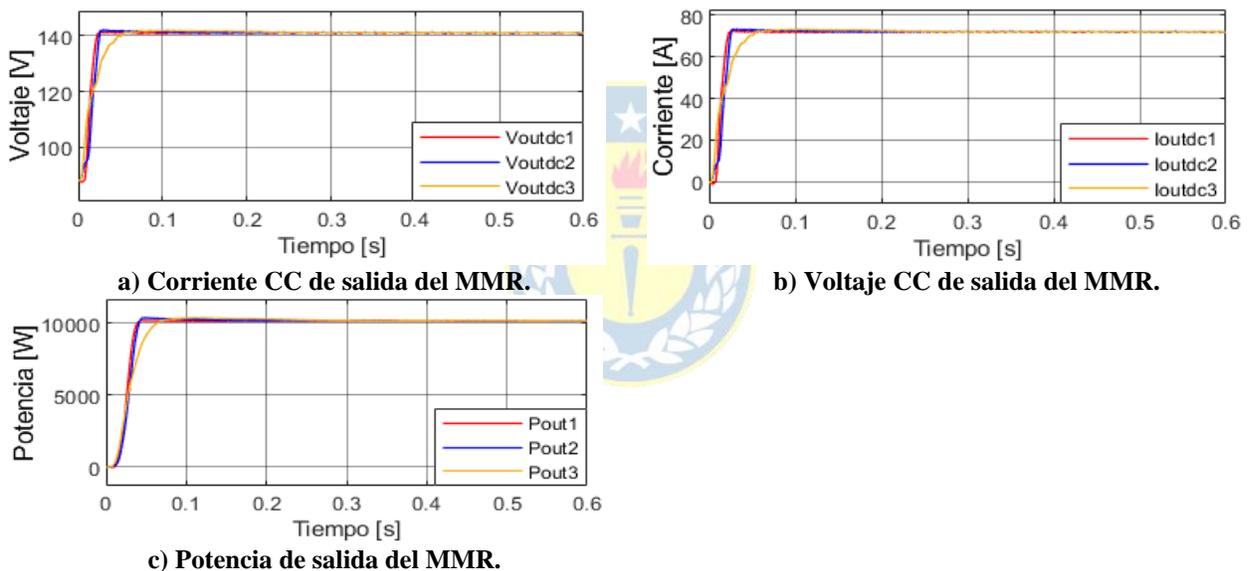


Fig. 5.10 Resultados de simulación para MMR a carga nominal con desbalance en la red (salida).

Se puede notar que, si bien los valores de corriente, voltaje y potencia para las tres fases son distintos en el primer intervalo de tiempo, luego comienzan a tender a los mismos valores.

5.3.3.2 THD

En la Fig. 5.11 se muestra la corriente del lado de la red. Las señales son sinusoidales y presentan distorsiones pequeñas cerca del cruce por cero, por lo que la calidad de la energía del sistema es buena.

También se puede notar que en la fase c la corriente es mayor que en la fase a y la corriente de la fase b es menor que la de la fase a.

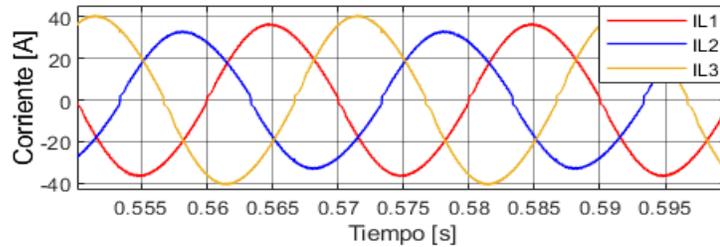


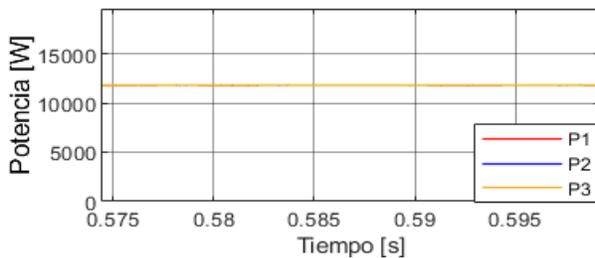
Fig. 5.11 Corriente del lado de la red.

El THD de la corriente del lado de la red para la simulación realizada arroja un valor de 2,56% en la fase a, 3,63% en la fase b y 2,82% en la fase c. Al haber una diferencia entre la distorsión armónica total presente en cada una de las fases de corriente de la red se confirma la existencia de un desbalance en la red, sin embargo, estos valores no presentan tanta diferencia considerando el gran desbalance y se encuentran relativamente cercanos al THD de la corriente de la red a condiciones óptimas y plena carga.

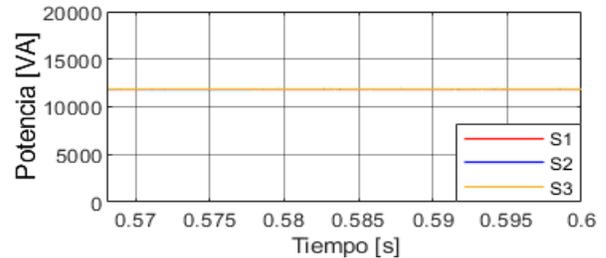


5.3.3.3 Factor de potencia

En la Fig. 5.12a se muestra la potencia activa del lado de la red y en Fig. 5.12b la potencia aparente.



a) Potencia activa P del lado de la red.



b) Potencia aparente S del lado de la red.

Fig. 5.12 Resultados de simulación para MMR a carga nominal (potencia).

Allí se ve como para las tres fases la potencia activa y aparente toman prácticamente los mismos valores. El factor de potencia es de 0,9999.

5.3.3.4 Eficiencia

La eficiencia alcanza un valor promedio alrededor de 85,72%, lo cual es casi la misma eficiencia que presenta el rectificador modular multicelda bajo condiciones óptimas.

Los valores de los parámetros que se entregan en la Tabla 5.6 corresponden a los entregados para la simulación del MMR energizando a un electrolizador con un desbalance en la red, específicamente un aumento del 10% de magnitud de voltaje de alimentación en la fase b y una disminución del 10% de magnitud de voltaje de alimentación en la fase c.

Tabla 5.6: Parámetros simulación del módulo de celdas de MMR con desbalance en la red.

Parámetro	Fase a	Fase b	Fase c
V_{acRMS}	459,62 [V]	505,58 [V]	413,66 [V]
I_{LRMS}	26,10 [A]	23,48 [A]	28,95 [A]
P	11.828 [W]	11.837 [W]	11.838,6 [W]
S	11.829 [W]	11.838 [W]	11.839,2 [W]
PF	0,9999	0,9999	0,9999
V_{out}	141,14 [V]	141,17 [V]	141,11 [V]
I_{out}	72,04 [A]	72,08 [A]	72,01 [A]
P_{out}	10.135 [W]	10.147 [W]	10.153 [W]
THD	2,56%	3,63%	2,82%
η	85,69%	85,72%	85,76%

En vista de estos resultados se puede decir que el sistema presenta buenas características de funcionamientos ante desequilibrios severos (de magnitud de voltaje) en la red.

Capítulo 6 Discusión y conclusiones

El presente capítulo se centra en discutir acerca de las topologías estudiadas de convertidores para la energización de plantas electrolizadoras de gran potencia y la importancia de la continua mejora en su composición para lograr una topología óptima o lo más cercano posible a lo que se desea.

Como se vio a lo largo del presente estudio, para la energización de un electrolizador es necesario un convertidor ya sea CA a CC si la fuente de alimentación es alterna, de CC a CC si se trata de una fuente continua o bien una combinación de ambos dependiendo de la magnitud de la tensión de alimentación. Entre las topologías estudiadas para los convertidores CC a CC en el capítulo 4.1, se logra ver mediante una comparación que la topología que presenta mejores características corresponde a un convertidor reductor intercalado (con inductor acoplado), ya que presenta una ondulación de corriente baja, además, su porcentaje de eficiencia registrado y confiabilidad son bastante buenos. Sin embargo, se sugiere seguir investigando las topologías de convertidores del tipo CC a CC existentes en la actualidad, para encontrar la que presente las mejores características de acuerdo con las necesidades que se tengan.

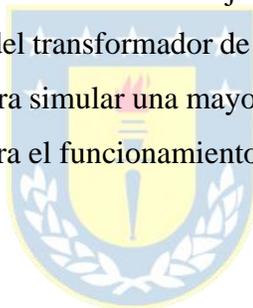
Para las topologías de convertidores del tipo CA a CC se realizó un estudio más detallado con valores registrados en la literatura, con la finalidad de poder llevar a cabo una comparación con valores, lo cual significa una mejor calidad en el tipo de comparación realizada y por lo tanto un resultado más confiable. Como se vio en el capítulo 4.2, dentro de las topologías estudiadas la más beneficiosa es la del rectificador modular multicelda, ya que destaca en la mayoría de los aspectos considerados relevantes para la selección de un convertidor, lo cual considera una distorsión armónica total de corriente baja, un factor de potencia cercano a 1 y eficiencia bastante alta, además de mantener buenas características funcionando a porcentajes de carga inferiores a la carga nominal. Agregar además que ante mayores potencias, se espera que sus características sean aún mejores.

Por medio de la simulación realizada de la topología del MMR para la energización del circuito equivalente de un electrolizador se logra corroborar la información recolectada, ya que la simulación demuestra que las señales de salida presentan excelentes características y la red no se ve mayormente afectada por la presencia de componentes armónicas aportadas por el rectificador, ya que son pequeñas, además, se obtienen resultados bastante favorables del comportamiento del MMR en casos

extremos de disminución en la carga y en desbalance en la red, por lo que se reconfirma la selección de esta topología como la mejor en comparación con las demás estudiadas. También se logra apreciar el gran funcionamiento del sistema de control implementado en la simulación del MMR. Estos resultados se deben de igual manera a las buenas características que poseen los convertidores seleccionados para la formación del MMR, ya que tanto el convertidor elevador tótem como el doble puente activo tienen una muy buena eficiencia y factor de potencia, además de entregar señales con bajo ripple y aportar una distorsión armónica total baja hacia la red.

Ya que la topología del rectificador modular multicelda aún está en estudio y no se encontraron registros de su implementación en alguna planta electrolizadora de gran potencia o en alguna otra aplicación, se sugiere seguir investigándola, pero es una muy buena opción a considerar para futuras instalaciones de plantas electrolizadoras de gran potencia.

Para futuros trabajos se puede estudiar la forma de mejorar la eficiencia del rectificador modular multicelda optimizando los parámetros del transformador de alta frecuencia. Además, de poder contar con las capacidades computacionales para simular una mayor cantidad de módulos, se podría obtener resultados más cercanos a la realidad para el funcionamiento del MMR.



Capítulo 7 Referencias

- [1] The Paris Agreement. What is the Paris Agreement? (s. f.). United Nations Climate Change. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- [2] *Cambio climático: lo que está haciendo la UE. (2023b, febrero 7)*. Consejo Europeo Consejo de la Unión Europea. <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/climate-change/>
- [3] *Plan de Descarbonización proceso histórico para Chile | Ministerio de Energía.* (s. f.). <https://energia.gob.cl/noticias/aysen-del-general-carlos-ibanez-del-campo/plan-de-descarbonizacion-proceso-historico-para-chile>
- [4] Carmo, M., Fritz, D., Mergel, J., & Stolten, D. (2013). A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(12), 4901-4934. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.151>
- [5] García, N., Torres, R., & Vivanco, E. (2020). *Desarrollo del mercado de Hidrógeno verde en Chile: Oportunidades* [Biblioteca del Congreso Nacional de Chile/ BCN]. https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/29024/1/BCN_Desarrollo_del_mercado_de_H2_verde_en_Chile.pdf
- [6] Alcalde, S. (2023, 3 enero). Ventajas e inconvenientes del hidrógeno como combustible alternativo. *National Geographic España*. https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/ventajas-e-inconvenientes-hidrogeno-como-combustible-alternativo_14897
- [7] *Hidrógeno - Centro Nacional de Hidrógeno.* (2019, 6 febrero). Centro Nacional de Hidrógeno. <https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/>
- [8] *Vectores Energéticos | Transición Energética.* (s. f.). Transición Energética. <https://www.transicionenergetica.es/vectores-energeticos/>
- [9] Métodos de producción de hidrógeno y sus colores. (s. f.). CIC energiGUNE. <https://cicenergigune.com/es/blog/metodos-produccion-hidrogeno-colores#:~:text=El%20hidr%C3%B3geno%20rosa%20se%20obtiene,libera%20CO2%20a%20la%20atm%C3%B3sfera>
- [10] Villarreal, D. (s. f.). Qué es la electrólisis y por qué es clave en la transición verde. *Diariomotor*. <https://www.diariomotor.com/que-es/electrolisis/>

- [11] Vásquez, R., Salinas, Felipe, & Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. (2019). *Tecnologías del hidrógeno y perspectivas para Chile* (segunda edición) [Ministerio de Energía de Chile].
https://energia.gob.cl/electromovilidad/img/Tecnologías-del-hidrógeno-y-perspectivas-para-Chile_2019.pdf
- [12] Keddar, M., Zhang, Z., Periasamy, C., & Doumbia, M. L. (2022). Power quality improvement for 20 MW PEM Water electrolysis system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(95), 40184-40195. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.08.073>
- [13] Choi, P., Bessarabov, D., & Datta, R. (2004). A simple model for solid polymer electrolyte (SPE) water electrolysis. *Solid State Ionics*, 175(1-4), 535-539. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2004.01.076>
- [14] Speckmann, F., Bintz, S., & Birke, K. P. (2019). Influence of rectifiers on the energy demand and gas quality of alkaline electrolysis systems in dynamic operation. *Applied Energy*, 250, 855-863. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.014>
- [15] M. Roetter, G. Richardson, Impact of Green Hydrogen Production on the Availability of Clean Electricity for the Grid, Version 1, February 2023, <https://www.gastransitionallies.org/hydrogen-rng>
- [16] M. Kiaee, A. Cruden, D. Infield, Yuchao Ma and T. G. Douglas, "The impact on the electrical grid of hydrogen production from alkaline electrolyzers," 45th International Universities Power Engineering Conference UPEC2010, Cardiff, UK, 2010, pp. 1-6.
- [17] *Experimental and theoretical development of a PEM electrolyzer model applied to energy storage systems.* (2009, 1 septiembre). IEEE Conference Publication | IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5347619>
- [18] MOHAN, N., UNDELAND, T. M., & ROBBINS, W. P. (2009). *ELECTRÓNICA DE POTENCIA: Convertidores, aplicaciones y diseño* (3.a ed.) [Repositorio Institucional de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. The McGraw-Hill Companies. <https://lc.fie.umich.mx/~jorgeahb/Pagina/materias/PIES/electronica-de-potencia-mohan-3ra-edicion.pdf>

- [19] Guilbert, D., Collura, S. M., & Scipioni, A. (2017). DC/DC converter topologies for electrolyzers: State-of-the-art and remaining key issues. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(38), 23966-23985. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.174>
- [20] Vikas, U., & Guruswamy. (2018). Design, Modelling, Analysis and Implementation of Two Phase Interleaved Buck DC-DC Converter. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 3, 2456 –2165.
<https://ijisrt.com/wp-content/uploads/2018/03/Design-Modelling-Analysis-and-Implementation-of-Two-Phase-Interleaved-Buck-DC-DC-Converter-1.pdf>
- [21] *Candidate Interleaved DC-DC Buck Converters for Electrolyzers: State-of-the-Art and Perspectives*. (2018, 1 junio). IEEE Conference Publication | IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8494457>
- [22] *Interleaved Buck Converter Having Low Switching Losses and Improved Step-Down Conversion Ratio*. (2012, 1 agosto). IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6135808>
- [23] *Generalized state-space model for the interleaved buck converter*. (2011, 1 septiembre). IEEE Conference Publication | IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6085305>
- [24] *Interleaved Buck Converter With Continuous Input Current, Extremely Low Output Current Ripple, Low Switching Losses, and Improved Step-Down Conversion Ratio*. (2015, 1 agosto). IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7027832>
- [25] BEDOYA PEREA, ÓSCAR, & OSPITIA GALEANO, L. (2018). *CONVERSOR DC-DC TIPO LLC PARA LA CONEXIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS* (Ingeniero eléctrico). UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA.
- [26] Vitale, G., Castaldi, F., & Guilbert, D. (2021). Design of a LLC Resonant Converter for Powering a PEM Electrolyzer. *Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ)*, 19, 452-458. <https://doi.org/10.24084/repqj19.317>
- [27] Electronics, C. E. A. (2023). What Is LLC Resonant Converter, Purpose, Working, Advantages. *CS Electrical & Electronics*. <https://cselectricalandelectronics.com/what-is-llc-resonant-converter-purpose-working-advantages/>

- [28] Zhou, J., Meng, X., & Chen, Y. (2023). Research on DC Power Supply for Electrolytic Water to Hydrogen Based on Renewable Energy. *Journal of physics*, 2465(1), 012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2465/1/012007>
- [29] Wang, W., Liu, Y., Zhao, J., Yin, Q., Lv, Q., & Zhang, P. (2022). Output Current Ripple and Efficiency Optimal Control Method for Multi-Phase Interleaved LLC Resonant Converter. *Frontiers in Energy Research*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.870760>
- [30] Hong, H. (2010). Designing an LLC Resonant Half-Bridge Power Converter. *Power Supply Design Seminar*, SLUP263. <https://www.ti.com/seclit/ml/slup263/slup263.pdf>
- [31] Mohan, N., Undeland, T. M., Robbins, W. P. (2003). *POWER ELECTRONICS: Converters, Applications, and Design* (3a ed.) Jhon Wiley & Sons, Inc. <https://vdoc.pub/documents/power-electronics-converters-applications-and-design-3ktf7f9qekg0>
- [32] Yodwong, B., Guilbert, D., Phattanasak, M., Kaewmanee, W., Hinaje, M., & Vitale, G. (2020). AC-DC converters for electrolyzer applications: State of the art and future challenges. *Electronics*, 9(6), 912. <https://doi.org/10.3390/electronics9060912>
- [33] Lin, T. (2018). *Analysis of 12-Pulse controlled rectifier performance and its impacts on power system*. ResearchGate. <https://doi.org/10.13140/rg.2.2.12786.81607>
- [34] Corti, F., Shehata, A. H., Laudani, A., & Cardelli, E. (2021). Design and comparison of the performance of 12-Pulse rectifiers for aerospace applications. *Energies*, 14(19), 6312. <https://doi.org/10.3390/en14196312>
- [35] Zhang, L., Han, M., Bao, W., Dong, Y., Fan, Y., & Liu, H. (2023). Low-ripple high-efficiency AC-DC rectifier with auxiliary compensator for hydrogen production. *IET Power Electronics*. <https://doi.org/10.1049/pel2.12530>
- [36] Chen, M., Chou, S., Blaabjerg, F., & Davari, P. (2022). Overview of Power Electronic converter topologies enabling Large-Scale hydrogen production via water electrolysis. *Applied Sciences*, 12(4), 1906. <https://doi.org/10.3390/app12041906>
- [37] Damkjær, J., Bashir, U., & Lazaris, S. (2022). *MW-Level Power Converter Solutions for Power-to-X Application* [Master's Thesis]. Aalborg University.
- [38] *TIDA-01604 Reference Design | TI.com*. (s. f.). <https://www.ti.com/tool/TIDA-01604>

- [39] *Multiphase interleaved bidirectional DC/DC converter with coupled inductor for Electrified-Vehicle applications.* (2021, 1 marzo). IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9163288>
- [40] *Topology, cost and efficiency comparisons of a 2 MW DC supply using interleaved DC-DC converter.* (2014, 1 junio). IEEE Conference Publication | IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6878695>
- [41] *A novel Low-Loss Modulation Strategy for High-Power bidirectional Buck+ Boost Converters.* (2009, junio1). <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5071726>
- [42] *Titan EZ-2000 Stack. (s. f.). Fuel Cell Store. <https://www.fuelcellstore.com/hydrogen-equipment/hydrogen-production-electrolyzers/pem-electrolyzer-cell-stack-titan-2000>*



Anexo A: Especificaciones de parámetros utilizados en las simulaciones de las que se recopilaron datos para la comparación de topologías

Tabla A.1. Parámetros de simulación de puente de tiristores de seis pulsos y rectificador intercalado de 3 fases.

Parámetros	Puente de tiristores de seis pulsos	Rectificador intercalado de 3 fases
Voltaje de entrada (fuente)	25 [kV], 60 [Hz]	25 [kV], 60 [Hz]
Voltaje de salida	330-400 [V]	330-400 [V]
Corriente de salida	12,2 [kA]	12,2 [kA]
Voltaje de entrada	350 [V]	550 [V]
C_{dc}	-	8000 [μF]
L_f	44 [mH]	96 [mH]
C_f	9000 [μF]	2000 [μF]
Frecuencia de conmutación	360 [Hz]	1 [kHz]

Tabla A.2. Parámetros de simulación de rectificador de tiristores de 12 pulsos.

Parámetros	Rectificador de tiristores de 12 pulsos
V_{grid}	33 [kV]
L_{grid}	1 [μH]
L_{in}	350 [μH]
L_{DC}	300 [μH]
V_{DC}	1 [kV]
C_{DC}	5000 [μF]
R_{load}	1 [Ω]

Tabla A.3. Parámetros de simulación de rectificador modular multimodo.

Parámetros	Rectificador modular multimodo
V_{grid}	0,69 [kV]
L_{cell}	1 [mH]
R_{cell}	0,001 [Ω]
C	2000 [μF]
DC	1 [kV]
C_{DC}	100 [μF]
R_{load}	1 [Ω]

Tabla A.4. Especificaciones del módulo de celdas MMR.

Parámetros	Rectificador modular multimodo
Voltaje de entrada	690 [V]
Tensión de salida	1000 [V]
Potencia nominal	6,94 [kW]

Tabla A.5. Parámetros de simulación de 12-DRMC.

Parámetros	Rectificador de tiristores de 12 pulsos
V_{grid}	33 [kV]
L_{grid}	1 [nH]
L_{in}	525 [μ H]
L_{DC}	1000 [μ H]
V_{DC}	1 [kV]
C_L	100 [mF]
C_{DC}	50 [μ F]
R_{load}	1 [Ω]



Anexo B: Simulación MMR

Tabla B.1 Especificaciones técnicas celda de electrolizador de la serie Titan EZ.

Model	Unit	Titan EZ-60	Titan EZ-120	Titan EZ-180	Titan EZ-240	Titan EZ-300	Titan EZ-500	Titan EZ-800	Titan EZ-1000	Titan EZ-1300	Titan EZ-1500	Titan EZ-2000
Cells	-	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	4
Stack Diameter	mm	85	85	85	85	138	138	138	138	138	138	140
Active Area Diameter	mm	12.6	12.6	12.6	12.6	50	50	50	50	50	50	80
H2 Flow Rate	mL / min	0 - 60	0 - 120	0 - 180	0 - 240	0 - 300	0 - 500	0 - 800	0 - 1000	0 - 1300	0 - 1500	0 - 2000
O2 Flow Rate	mL / min	0 - 30	0 - 60	0 - 90	0 - 120	0 - 150	0 - 250	0 - 400	0 - 500	0 - 650	0 - 750	0 - 1000
Voltage	V (DC)	2	4	6	8	2	4	6	8	10	12	8
Max Input Current	A (DC)	9	9	9	9	40	40	40	40	40	40	72
Water Consumption Rate	cc / hr	4	8	12	16	18	30	48	60	78	90	120
Operating Temperature	-	40°F to 113°F (5°C to 45°C)										
Output Pressure	-	0 - 10 barg (0 - 145 psi)										
Membrane Type	-	Nafion PFSA										
Sintered Titanium diffusion medium												
Precious metal electrode												
Need deionized or re-distilled water												
Water Resistivity: >1 MΩ·cm												
Water Conductivity: <1 us/cm												
Estimated Lifetime: If the water quality and power supply is always in ideal condition you can expect about 10,000 hours of operation.												

Tabla B.2 Parámetros para simulación del convertidor elevador tótem.

Símbolo	Significado	Valor
L	Inductancia del convertidor elevador tótem.	6,8 [mH]
C	Condensador del convertidor elevador tótem.	3,5 [mF]

Tabla B.3 Parámetros para simulación del Doble puente activo.

Símbolo	Significado	Valor
L_d	Inductancia del Doble puente activo.	606,06 [μH]
C_d	Condensador del Doble puente activo.	6,6 [mF]

Tabla B.4 Valores transformador de Doble puente activo.

Símbolo	Significado	Valor
P_{nt}	Potencia nominal	10 [kVA]
f_{nt}	Frecuencia nominal	5 [kHz]
V_1	Voltaje RMS devanado primario.	1000 [V]
R_1	Resistencia devanado primario.	0,25 [Ω]
L_1	Inductancia devanado primario.	1 [μH]
V_2	Voltaje RMS devanado secundario.	400 [V]
R_2	Resistencia devanado secundario.	0,15 [Ω]
L_2	Inductancia devanado secundario.	1 [μH]
R_m	Resistencia de magnetización.	$1,0805 \times 10^6$ [Ω]
L_m	Inductancia de magnetización.	2866 [H]

Tabla B.5 Valores para los controladores PID en el control de la simulación.

Símbolo	Significado	Valor
P_1	Valor P para primer controlador PID en el control de convertidor elevador tótem.	60
I_1	Valor I para primer controlador PID en el control de convertidor elevador tótem.	1200
P_2	Valor P para segundo controlador PID en el control de convertidor elevador tótem.	2,1
I_2	Valor I para segundo controlador PID en el control de convertidor elevador tótem.	3,2
P_3	Valor P para controlador PID en el control de puente activo dual.	0,05
I_3	Valor I para controlador PID en el control de puente activo dual.	0,225

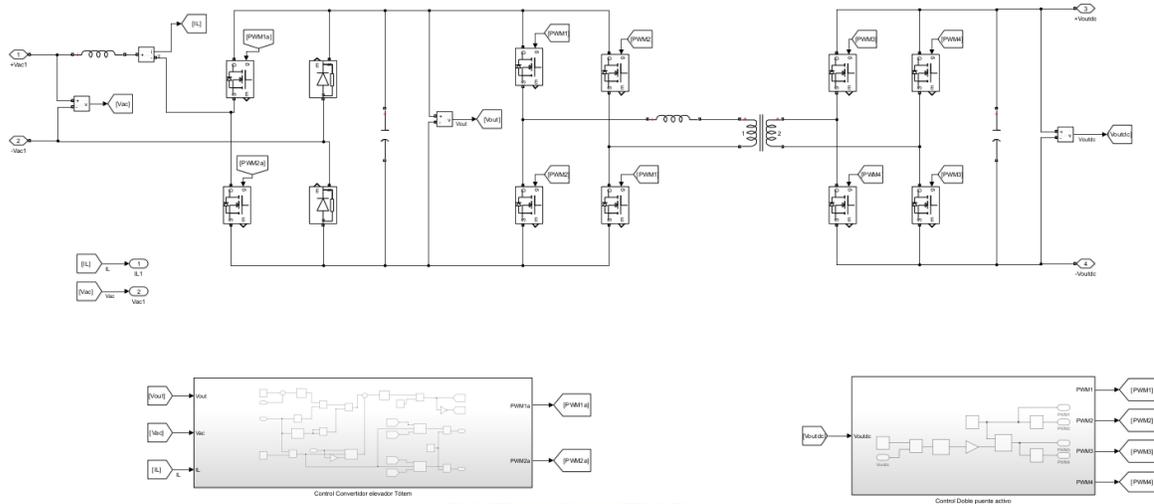


Fig. B.1 Simulación topología Rectificador Modular Multicelda de una fase.

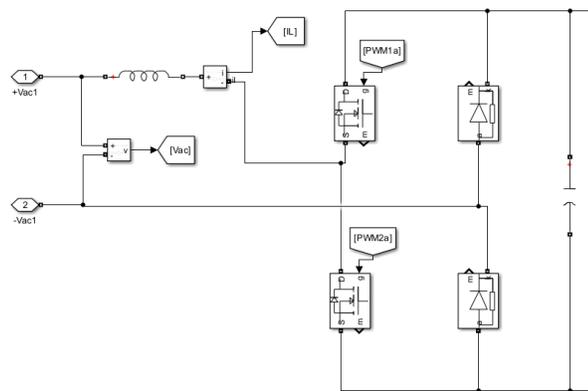


Fig. B.2 Convertidor elevador tótem.

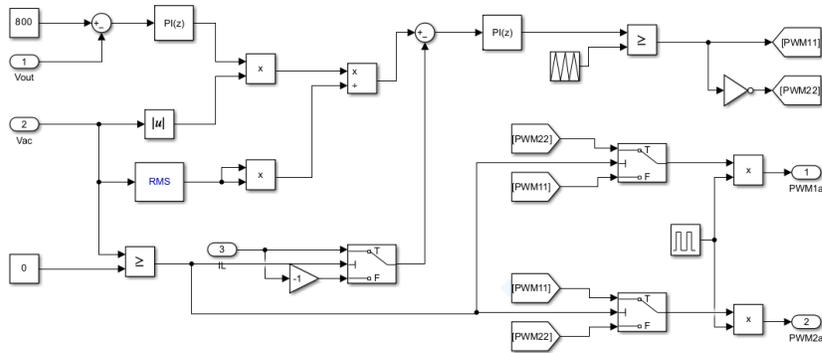


Fig. B.3 Control de convertidor elevador tótem.

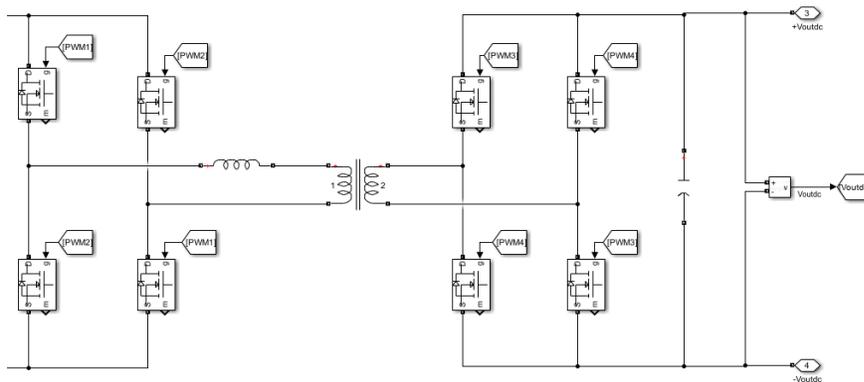


Fig. B.4 Doble puente activo.

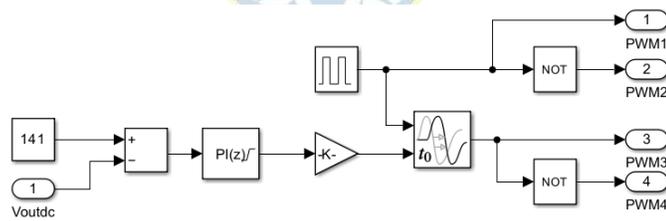


Fig. B.6 Control de Doble puente activo.

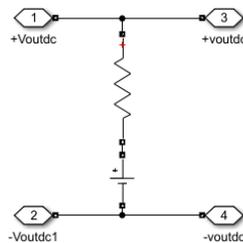


Fig. B.7 Circuito equivalente de electrolizador.