

Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Electrónica,
Robótica y Automática

Diseño, Simulación y Control de un Con-
vertidor DC-DC Dual Active Bridge Resonante
para Operación en Paralelo en una Microrred
DC

Autora: Alba Muñoz Carrero

Tutores: David Carmona Vicente y Juan Manuel Carrasco Solís

Dpto. de Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, Julio 2024



Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Electrónica, Robótica y Automática

Diseño, Simulación y Control de un Convertidor DC-DC Dual Active Bridge Resonante para Operación en Paralelo en una Microrred DC

Autora:

Alba Muñoz Carrero

Tutores:

David Carmona Vicente y Juan Manuel Carrasco Solís

Dpto. de Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, Julio 2024

Trabajo Fin de Máster: Diseño, Simulación y Control de un Convertidor DC-DC Dual Active
Bridge Resonante para Operación en Paralelo en una Microrred DC

Autora: Alba Muñoz Carrero

Tutores: David Carmona Vicente y Juan Manuel Carrasco Solís

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

*Alba Muñoz Carrero
Sevilla, 2024*

Resumen

Los convertidores DC-DC Dual Active Bridge (DAB) tienen diversas aplicaciones, incluyendo la integración de electrolizadores, pilas de combustible, baterías y paneles fotovoltaicos en microrredes DC. Estas aplicaciones permiten una gestión eficiente y flexible de la energía en sistemas de generación y almacenamiento distribuidos.

El proyecto aborda el diseño, simulación y control de un convertidor DC-DC DAB con topología resonante, orientado a su operación en paralelo dentro de una microrred DC. Se estudian los principios teóricos fundamentales del DAB, con el objetivo de mejorar la eficiencia energética del sistema. Se detalla el proceso de diseño del hardware, incluyendo la selección y dimensionamiento de componentes clave, así como la interconexión de múltiples convertidores en paralelo.

Para validar el desempeño del convertidor, se desarrollan y simulan diversas estrategias de control, asegurando un reparto equitativo de la potencia entre los convertidores y un control preciso de la tensión y la corriente en el sistema. Los resultados de las simulaciones confirman la eficiencia y estabilidad del sistema, demostrando su viabilidad para su integración en microrredes DC. Asimismo, se realizaron pruebas prácticas que corroboran los resultados teóricos y proporcionan una base sólida para futuros desarrollos en el campo de la conversión de energía.

Abstract

Dual Active Bridge (DAB) DC-DC converters have diverse applications, including the integration of electrolysers, fuel cells, batteries and photovoltaic panels into DC microgrids. These applications enable efficient and flexible energy management in distributed generation and storage systems.

The project deals with the design, simulation and control of a DC-DC DAB converter with resonant topology, aimed at parallel operation in a DC microgrid. The fundamental theoretical principles of DAB are studied, with the aim of improving the energy efficiency of the system. The hardware design process is detailed, including the selection and sizing of key components, as well as the interconnection of multiple converters in a DC microgrid. interconnection of multiple converters in parallel.

To validate the converter performance, various control strategies are developed and simulated, ensuring an equal power sharing between the converters and an accurate control of the voltage and current in the system. The results of the simulations confirm the efficiency and stability of the system, demonstrating its feasibility for integration in DC microgrids. Practical tests were also carried out, which corroborate the theoretical results and provide a solid basis for future developments in the field of power conversion.

Índice

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice de Figuras</i>	IX
<i>Índice de Tablas</i>	XI
1 Introducción	1
1.1 Contexto del proyecto	1
1.2 Objetivos del proyecto	1
1.3 Alcance	2
1.4 Organización del documento	3
2 Fundamentos teóricos	5
2.1 Introducción a los convertidores DC-DC	5
2.2 Principios de operación del convertidor Dual Active Bridge (DAB)	6
2.2.1 Principios de Conmutación de Voltaje Cero (ZVS)	7
2.2.2 Principios de Conmutación de Corriente Cero (ZCS)	7
2.3 Aspectos claves del diseño resonante	8
3 Diseño del Convertidor	9
3.1 Especificaciones Técnicas del Convertidor	9
3.2 Elección y Cálculo de los Componentes	9
3.2.1 Dimensionamiento del DC Link	9
3.2.2 Dimensionamiento de los Semiconductores	11
3.2.3 Dimensionamiento del Driver	11
3.2.4 Dimensionamiento del Tanque Resonante	12
Cálculo de los Elementos del Tanque Resonante	12
Selección de los Componentes	13
3.2.5 DSP para el Control del Convertidor	14
3.2.6 Fusibles	14
3.2.7 Contactores	14
3.2.8 Seta de Emergencia	15
3.2.9 Sensores de Corriente	15
Sensor de Corriente Individual	15
Sensor de Corriente Total	16
3.2.10 Sensores de Tensión	17
3.2.11 Sensores de Temperatura	18
3.3 Interconexión en Paralelo de los Convertidores	19
4 Diseño del Sistema de Control	21
4.1 Análisis del Primer Armónico	21

4.2	Convertidor CLLC y Control de Desfase	21
4.3	Ecuaciones Fundamentales	21
4.3.1	Circuito Resonante Primario y Secundario	21
4.3.2	Corriente Resonante	22
4.3.3	Relación de Potencia y Desfase	22
4.3.4	Desfase y Transferencia de Potencia	22
4.4	Análisis y Aproximación	23
4.5	Consideraciones Adicionales	23
4.6	Estrategias de Control para los Convertidores	23
4.6.1	Control de Tensión	24
4.6.2	Control de Corriente	24
4.7	Simulaciones y validación del control	25
4.7.1	Simulación del Control de Tensión	29
4.7.2	Simulación del Control de Corriente	32
4.7.3	Análisis de Resultados	34
5	Puesta en Marcha y Tests	37
5.1	Equipamiento y Herramientas Utilizadas	37
5.2	Protocolo de Pruebas	40
5.2.1	Test 1: Control de Tensión DC con Un Solo Convertidor	41
5.2.2	Test 2: Control de Corriente DC con Un Solo Convertidor	44
5.2.3	Test 3: Operación en Paralelo con Tres Convertidores	46
5.3	Conclusión de los Resultados Obtenidos	51
6	Conclusiones	53
6.1	Conclusiones Generales del Proyecto	53
6.2	Aplicación del Convertidor en el Contexto de una Microrred DC	54
6.3	Líneas Futuras de Investigación	54
	<i>Bibliografía</i>	55

Índice de Figuras

2.1	Esquema de la topología Dual Active Bridge (DAB) resonante [12]	6
2.2	Ilustración gráfica de la técnica ZVS [11]	7
2.3	Ilustración gráfica de la técnica ZCS [11]	7
3.1	Etapa de adaptación sensor de corriente LA-55-P	16
3.2	Etapa de adaptación sensor de corriente LF-310-S	17
3.3	Etapa de adaptación sensor de tensión LEM LV 25-P	18
3.4	Etapa de adaptación sensor de temperatura NTC ALUG02A472G	19
3.5	Esquema configuración paralelo convertidores DC-DC	19
4.1	Diagrama de control del paralelo de los tres convertidores DC-DC	24
4.2	Esquemático DAB resonante en Simulink®	25
4.3	Función de control DAB resonante	26
4.4	Bloque de Generador de PWM	26
4.5	Circuito Generador de PWM	27
4.6	Señales PWM generadas por el sistema. Unidades: Tensión (V), tiempo (s)	27
4.7	Zoom en las señales PWM para mostrar los desfases. Unidades: Tensión (V), tiempo (s)	28
4.8	Circuito del Convertidor DC-DC DAB resonante	28
4.9	Configuración de las constantes del PI y referencias de control	29
4.10	Bloque de medidas del sistema	29
4.11	Respuesta temporal del control de tensión. Unidades: Tensión (V), tiempo (s)	30
4.12	Respuesta temporal de la potencia con control de tensión. Unidades: Potencia (W), tiempo (s)	31
4.13	Respuesta temporal del desfase con control de tensión. Unidades: Desfase (°), tiempo (s)	31
4.14	Respuesta temporal del control de corriente. Unidades: Corriente (A), tiempo (s)	32
4.15	Respuesta temporal de la potencia con control de corriente. Unidades: Potencia (W), tiempo (s)	33
4.16	Respuesta temporal del desfase con control de corriente. Unidades: Desfase (°), tiempo (s)	33
4.17	Rendimiento del sistema durante la operación	34
4.18	Tensión y corriente en AC en ambos lados del transformador. Unidades: Tensión (V), Corriente (A), tiempo (s)	35
5.1	Bancada de prueba de los convertidores DC-DC resonantes	37
5.2	Fuentes de alimentación ITECH	38
5.3	Osciloscopio Yokogawa	39
5.4	Sonda de Tensión Cal Test	39
5.5	Sonda de Corriente Yokogawa	39
5.6	PWM en un MOSFET de cada puente con desfase de 0°	41
5.7	PWM en un MOSFET de cada puente con desfase de 15°	41
5.8	Gráfica de la respuesta de la corriente medida y la referencia durante las perturbaciones de carga	42
5.9	Desfase aplicado por el convertidor en función de las perturbaciones de carga	42
5.10	Mediciones en la fuente externa del convertidor	43
5.11	Mediciones en la fuente interna del convertidor	43

5.12	Respuesta temporal del control de corriente	44
5.13	Respuesta temporal del desfase con control de corriente.	45
5.14	Mediciones en la fuente interna del convertidor	45
5.15	Mediciones en la fuente externa del convertidor	46
5.16	Tensión y corriente medidas en el equipo de control de corriente	47
5.17	Corriente individual del Convertidor 1 (control de tensión)	47
5.18	Corriente individual del Convertidor 2 (control de corriente)	48
5.19	Corriente individual del Convertidor 3 (control de corriente)	48
5.20	Desfase del Convertidor 1 (control de tensión)	49
5.21	Desfase del Convertidor 2 (control de corriente)	49
5.22	Desfase del Convertidor 3 (control de corriente)	50
5.23	Corriente individual y total de los equipos	50
5.24	Tensiones AC a cada lado del convertidor y Corriente AC	51

Índice de Tablas

3.1	Especificaciones Convertidor DC-DC	9
3.2	Requisitos del DC Link	10
3.3	Configuración DC Link	10
3.4	Requisitos de los MOSFETs de SiC	11
3.5	Características del MOSFET G3R20MT12N	11
3.6	Especificaciones del Driver	12
3.7	Características del transformador de alta frecuencia y frecuencia de resonancia elegida	12
3.8	Características de los componentes del tanque resonante	13
3.9	Características de los condensadores KEMET C1210C225K1RACTU	13
3.10	Características de la matriz de condensadores	13
3.11	Características del contactor	15
3.12	Características Sensor LA-55-P	16
3.13	Características Sensor LF-310-S	16
3.14	Características LEM LV 25-P	17
3.15	Características LEM LV 25-P	18

1 Introducción

Estudios recientes destacan la importancia creciente de las tecnologías de energía renovable (RE) para la generación de electricidad sostenible, rentable y amigable con el medio ambiente. La Agencia Internacional de Energía (IEA) reporta que la demanda de combustibles fósiles ha disminuido desde 2019, mientras que el uso de RE ha aumentado significativamente para satisfacer las demandas globales de energía. Las tecnologías RE, como la solar, eólica, hidroeléctrica, biomasa, geotérmica y de hidrógeno, están en constante desarrollo para mejorar la eficiencia de conversión de energía [1].

Las energías renovables, como la solar y la pila de combustible, generan electricidad en corriente continua (DC), lo que resalta la importancia de desarrollar sistemas eléctricos que optimicen su integración. Las microrredes DC se presentan como una solución eficiente para gestionar la distribución de energía renovable, ofreciendo ventajas significativas en términos de reducción de pérdidas y mejora de la estabilidad del sistema. Las microrredes DC permiten una integración más directa de las fuentes de energía renovable con las cargas, eliminando la necesidad de múltiples conversiones entre corriente alterna (AC) y corriente continua (DC). Esta simplificación del flujo de energía resulta en una mayor eficiencia global del sistema, ya que se minimizan las pérdidas asociadas a las conversiones de energía.

1.1 Contexto del proyecto

Los convertidores DC-DC juegan un papel fundamental en este contexto. Estos dispositivos son esenciales para adaptar los niveles de voltaje entre las diferentes fuentes de energía y las cargas dentro de una microrred DC. La capacidad de los convertidores DC-DC para gestionar eficazmente la transferencia de energía y mantener la estabilidad del sistema es crucial para el funcionamiento óptimo de las microrredes DC. Los avances en tecnologías de conversión de energía, como el desarrollo de topologías de convertidores más eficientes y estrategias de control avanzadas, están impulsando la viabilidad y el rendimiento de las microrredes DC.

Este proyecto se centra en el diseño, simulación y control de un convertidor DC-DC, con el objetivo de optimizar su desempeño en una microrred DC. Se exploran los principios teóricos y prácticos necesarios para el desarrollo de un sistema de conversión eficiente, y se evalúa su integración y rendimiento a través de pruebas y simulaciones. Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad del convertidor e información para futuras mejoras y desarrollos en el campo de las microrredes DC.

1.2 Objetivos del proyecto

En el presente proyecto se han definido los siguientes objetivos específicos:

- **Diseño y Simulación del Convertidor DC-DC:** El primer objetivo consiste en diseñar y simular un convertidor DC-DC DAB resonante que cumpla con los requisitos de eficiencia y estabilidad necesarios para operar en una microrred DC. Este proceso implica la elaboración de un modelo teórico del convertidor, seguido por su implementación en una plataforma de simulación. Se realizarán estudios de los principios de funcionamiento del diseño resonante y la mejora de la eficiencia del sistema. Las simulaciones permitirán validar el diseño y realizar los ajustes necesarios antes de la implementación física.
- **Paralelización Convertidores DC-DC:** El segundo objetivo es llevar a cabo la configuración del hardware del convertidor DC-DC diseñado, detallando la interconexión de los convertidores en paralelo dentro de la microrred DC. Se realizarán pruebas iniciales para asegurar que el hardware funcione correctamente, obteniendo conclusiones sobre el correcto funcionamiento del equipo.

Estos objetivos están orientados a garantizar que el convertidor no solo sea teóricamente viable, sino también práctico y efectivo en aplicaciones reales, contribuyendo así al avance en el campo de la energía renovable y la eficiencia energética.

1.3 Alcance

Se ha dividido el alcance del proyecto con respecto a los objetivos marcados:

- **Objetivo 1: Diseño y Simulación del Convertidor DC-DC**
 - Elección de la Topología y Comparación con Otras:
 - * Selección de la topología de convertidor DC-DC Dual Active Bridge (DAB) resonante.
 - * Comparación de la topología seleccionada con otras topologías de convertidores DC-DC en términos de eficiencia, estabilidad y rendimiento.
 - Simulación:
 - * Implementación del modelo en una plataforma de simulación.
 - * Realización de simulaciones para validar el diseño y ajustar parámetros para mejorar la eficiencia y estabilidad.
 - Implementación de Estrategias de Control Avanzadas:
 - * Diseño y aplicación de estrategias de control avanzadas para optimizar el rendimiento del convertidor.
 - * Simulación y evaluación de las estrategias de control para garantizar un funcionamiento óptimo.
- **Objetivo 2: Paralelización Convertidores DC-DC**
 - Interconexión en Paralelo:
 - * Montaje y configuración del hardware del convertidor DC-DC diseñado.
 - * Interconexión de los convertidores en paralelo dentro de la microrred DC.
 - Realización del Protocolo de Pruebas:
 - * Desarrollo de un protocolo de pruebas para evaluar el rendimiento del hardware.
 - Análisis de resultados:
 - * Evaluación del rendimiento del convertidor mediante pruebas prácticas.
 - * Comparación de los resultados prácticos obtenidos con los resultados de las simulaciones.

1.4 Organización del documento

La memoria se ha organizado en diferentes capítulos:

- En primer lugar, se presenta el contexto del proyecto, los objetivos específicos y el alcance del mismo, así como una descripción general de la estructura del documento.
- Se introducen los conceptos fundamentales relacionados con los convertidores DC-DC, incluyendo la topología Dual Active Bridge (DAB) y los principios de conmutación de voltaje cero (ZVS) y corriente cero (ZCS). Además, se detallan los aspectos clave del diseño resonante.
- Más adelante, se describe el proceso de montaje del hardware del convertidor DC-DC diseñado y la interconexión de los convertidores en paralelo dentro de la microrred DC.
- Se desarrollan las estrategias de control para los convertidores DAB y se validan mediante simulaciones detalladas.
- Se detallan los protocolos de pruebas realizados para evaluar el rendimiento del convertidor. Incluye la descripción de los resultados obtenidos, el análisis de la eficiencia y el rendimiento del sistema.
- Después, se comparan los resultados obtenidos con los objetivos planteados, se discute sobre el cumplimiento de las especificaciones técnicas.
- Y por último, se presentan las conclusiones derivadas del proyecto, la aplicación del convertidor en el contexto de una microrred DC y las líneas futuras de investigación.

2 Fundamentos teóricos

Para facilitar la comprensión del proyecto en sí, se va a hacer una breve explicación de los convertidores de potencia DC-DC junto con la topología elegida para esta aplicación y la explicación del diseño resonante.

2.1 Introducción a los convertidores DC-DC

Los convertidores DC-DC son dispositivos electrónicos que convierten un nivel de voltaje de continua (DC) en otro nivel de voltaje DC. Son fundamentales en aplicaciones donde se requiere cambiar el voltaje de una fuente de alimentación para adaptarse a las necesidades de diversos componentes electrónicos [5]. Estos convertidores son ampliamente utilizados en sistemas de energía renovable, fuentes de alimentación de dispositivos electrónicos, vehículos eléctricos, y en muchos otros campos.

Existen varias topologías de convertidores DC-DC, cada una diseñada para satisfacer diferentes requerimientos de eficiencia, tamaño y costo. Entre las topologías más comunes se encuentran los convertidores Buck (Reductor), Boost (Elevador), Buck-Boost (Reductor-Elevador), Cuk, SEPIC (Single-Ended Primary-Inductor Converter) y Flyback. Cada una de estas topologías tiene sus propias características y aplicaciones específicas. [3]

- Buck (Reductor):
 - Función: Reduce la tensión de entrada a una tensión de salida más baja.
 - Aplicaciones: Reguladores de voltaje para microprocesadores y otros circuitos electrónicos.
- Boost (Elevador):
 - Función: Eleva la tensión de entrada a una tensión de salida más alta.
 - Aplicaciones: Sistemas de alimentación para dispositivos que requieren un voltaje mayor que el suministrado por la fuente de entrada, como en algunas aplicaciones de energía solar.
- Buck-Boost (Reductor-Elevador):
 - Función: Puede aumentar o reducir la tensión de entrada dependiendo de la relación entre la entrada y la salida.
 - Aplicaciones: Situaciones donde la tensión de salida necesita ser ajustada tanto por encima como por debajo de la tensión de entrada.
- Cuk:
 - Función: Convierte una tensión de entrada positiva a una tensión de salida negativa o viceversa. También puede funcionar como un convertidor aislado.

- Aplicaciones: Sistemas donde se necesita una inversión de polaridad o un aislamiento galvánico.
- SEPIC (Single-Ended Primary-Inductor Converter):
 - Función: Similar al Buck-Boost pero con una mejor respuesta de ripple de corriente de entrada.
 - Aplicaciones: Alimentaciones donde la tensión de salida debe ser ajustada a un valor mayor o menor que la tensión de entrada con una menor fluctuación en la corriente de entrada.
- Flyback:
 - Función: Aísla el circuito de entrada del circuito de salida y puede aumentar o reducir la tensión.
 - Aplicaciones: Alimentaciones de potencia aisladas como en fuentes de alimentación para dispositivos electrónicos.

Para nuestro tipo de aplicación, hemos optado por utilizar una topología diferente, el convertidor Dual Active Bridge (DAB) resonante. Esta decisión se basa en las ventajas específicas que ofrece el DAB resonante en términos de eficiencia y rendimiento general. El convertidor DAB es especialmente adecuado para aplicaciones donde se requiere una transferencia de energía altamente eficiente y controlada entre dos fuentes de voltaje.

2.2 Principios de operación del convertidor Dual Active Bridge (DAB)

El DAB resonante es una variante del DAB convencional, que incorpora una red resonante para mejorar la eficiencia y reducir las pérdidas de conmutación. Esta topología es ideal para aplicaciones que demandan alta eficiencia y minimización del ruido electromagnético. El DAB está compuesto por dos puentes activos conectados a través de un transformador de alta frecuencia. Esta configuración permite la transferencia eficiente de energía entre dos fuentes de voltaje.[4]

El funcionamiento del DAB se basa en la modulación de fase, donde la energía se transfiere a través del transformador cuando las señales de los puentes están desfasadas. La cantidad de energía transferida depende del ángulo de desfase, lo que proporciona un control preciso sobre la transferencia de energía. Además, el DAB es capaz de operar en ambas direcciones, lo que lo hace ideal para aplicaciones como sistemas de almacenamiento de energía y vehículos eléctricos.

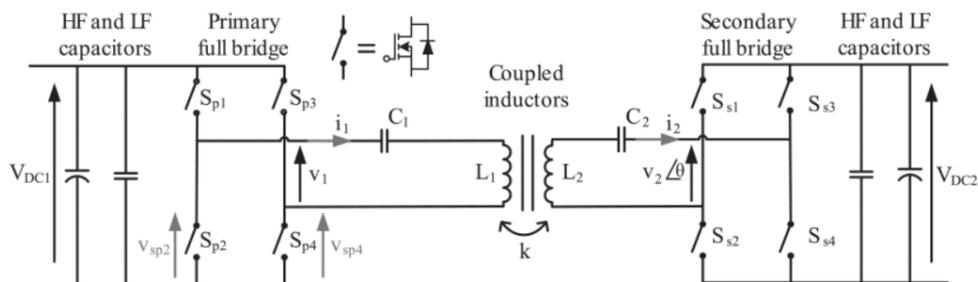


Figura 2.1 Esquema de la topología Dual Active Bridge (DAB) resonante [12].

La eficiencia de un convertidor DAB puede mejorarse significativamente mediante la implementación de técnicas de conmutación suave, como la conmutación de Voltaje Cero (ZVS) y la conmutación de Corriente Cero (ZCS). Estas técnicas reducen las pérdidas de conmutación que ocurren cuando los interruptores del convertidor cambian de estado (encendido a apagado y viceversa).

2.2.1 Principios de Conmutación de Voltaje Cero (ZVS)

En ZVS, los interruptores cambian de estado cuando el voltaje a través de ellos es cero. Esto elimina las pérdidas de energía asociadas con la descarga de la capacitancia parásita del interruptor, resultando en una operación más eficiente y con menos generación de calor.

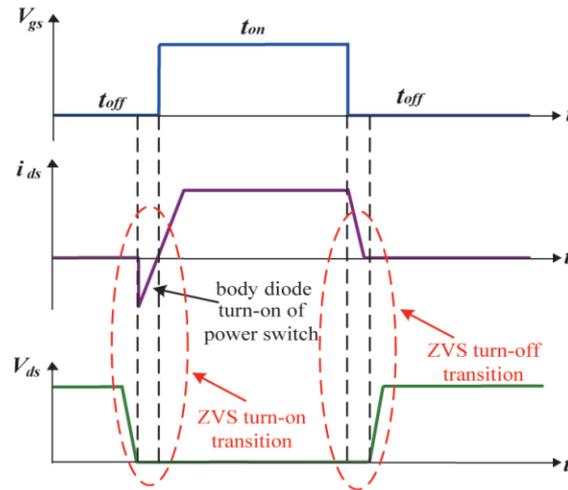


Figura 2.2 Ilustración gráfica de la técnica ZVS [11].

2.2.2 Principios de Conmutación de Corriente Cero (ZCS)

En ZCS, los interruptores cambian de estado cuando la corriente que fluye a través de ellos es cero. Esto minimiza las pérdidas de energía debido a la resistencia de los interruptores y reduce el estrés térmico en los componentes del convertidor.

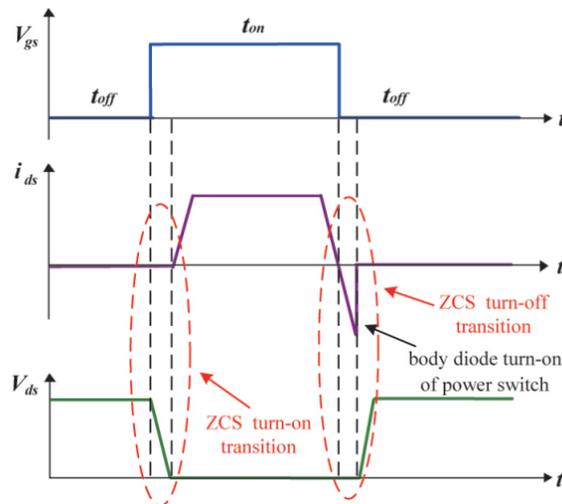


Figura 2.3 Ilustración gráfica de la técnica ZCS [11].

La implementación de ZVS y ZCS en un convertidor DAB requiere un diseño cuidadoso del circuito de control y del transformador, asegurando que las condiciones de conmutación suave se mantengan durante el rango de operación [2].

2.3 Aspectos claves del diseño resonante

El diseño resonante en convertidores DC-DC se centra en el uso de componentes que forman circuitos resonantes para mejorar la eficiencia y reducir el ruido electromagnético. En un convertidor DAB resonante, los elementos clave incluyen inductores y capacitores que forman una red resonante. Esta red permite que la energía se transfiera de manera eficiente al operar cerca de la frecuencia de resonancia.

Los aspectos clave del diseño resonante incluyen:

- **Selección de componentes:** La elección de inductores y capacitores adecuados es crucial para garantizar que el circuito resuene a la frecuencia deseada. Los componentes deben ser seleccionados considerando factores como la resistencia en serie (ESR) y la capacidad de manejo de corriente
- **Frecuencia de operación:** La frecuencia de resonancia debe ser cuidadosamente ajustada para maximizar la transferencia de energía y minimizar las pérdidas. Esto requiere un equilibrio entre la inductancia y la capacitancia en el circuito resonante.
- **Control de la resonancia:** Es necesario un control preciso del convertidor para mantener la operación en la frecuencia de resonancia, especialmente bajo condiciones variables de carga y entrada. Esto puede lograrse mediante técnicas de control avanzado como la modulación por ancho de pulso (PWM) y el control de fase.
- **Consideraciones de eficiencia:** El diseño resonante debe enfocarse en minimizar las pérdidas tanto en los componentes resonantes como en los interruptores. Esto incluye la reducción de las pérdidas de conmutación mediante técnicas de ZVS y ZCS, así como la optimización del diseño térmico para manejar la disipación de calor.

En resumen, el diseño resonante en un convertidor DAB implica un equilibrio entre varios factores de diseño para lograr una operación eficiente y confiable. La implementación de técnicas avanzadas de conmutación suave y el control preciso de la resonancia son esenciales para maximizar el rendimiento del convertidor.

3 Diseño del Convertidor

En este apartado, se abordará las especificaciones técnicas del convertidor. Posteriormente, se explicará el procedimiento seguido para calcular los valores de cada componente necesario, asegurando así un diseño óptimo y funcional. Finalmente, se detallará la interconexión de los convertidores en paralelo para que cada uno aporte un porcentaje de la potencia requerida.

3.1 Especificaciones Técnicas del Convertidor

Las especificaciones técnicas del convertidor DC-DC son las que se muestran a continuación:

Tabla 3.1 Especificaciones Convertidor DC-DC.

Especificaciones Convertidor DC-DC		
Magnitud	Valor	Unidades
DC Nominal Power	11	kW
DC Internal Nominal Current	20	A
DC Internal Nominal Voltage	550	V
DC Internal Voltaje Range	550-600	V
DC External Nominal Current	20	A
DC External Voltaje Range	550-600	V
Switching Frequency	80	kHz

3.2 Elección y Cálculo de los Componentes

En esta sección, se detallará el proceso seguido para seleccionar y calcular los valores de los componentes principales del convertidor. Cada componente ha sido elegido para cumplir con las especificaciones técnicas y optimizar el rendimiento del sistema.

A continuación, se describe la metodología utilizada para el cálculo y selección de cada componente.

3.2.1 Dimensionamiento del DC Link

Para el dimensionamiento del DC Link, necesitamos fijarnos en tres factores:

- Capacidad
- Tensión de trabajo
- Corriente RMS

Para dimensionar la capacidad, recurrimos a la siguiente expresión:

$$C = \frac{i \cdot \frac{1}{f}}{\Delta V} \quad (3.1)$$

Donde i es la intensidad máxima que va a salir de nuestro sistema, f es la frecuencia de conmutación y ΔV la amplitud del rizado de la señal.

Establecemos los siguientes valores para ambos lados del convertidor:

$$i = 20 \text{ A};$$

$$f = 80 \text{ kHz};$$

$$\Delta V = 10\% V_{\max} = 60 \text{ V};$$

Por tanto, obtenemos que $C \geq 4.17 \mu\text{F}$.

De lo anterior podemos obtener las características que tiene que cumplir el condensador elegido:

Tabla 3.2 Requisitos del DC Link.

Requisitos DC Link		
Magnitud	Valor	Unidades
Capacidad	≥ 4.51	μF
Irms	≥ 23	A

Hemos optado como solución utilizar el modelo de condensador EZP-E1B406MTA de Panasonic. Para que cumpla con los requisitos requeridos por el sistema, vamos a usar una configuración de cinco condensadores en paralelo. Por lo que las características de la configuración completa serían las siguientes:

Tabla 3.3 Configuración DC Link.

Configuración DC Link		
Magnitud	Valor	Unidades
Capacidad	200	μF
Irms	55	A

Para hacer la precarga de los condensadores, se ha optado por utilizar una configuración de tres resistencias HS300 de $10\text{k}\Omega$ en paralelo. Esta configuración cumple con los requisitos de tensión y corriente necesarios para la precarga segura y eficiente del sistema.

Esta configuración asegura que la corriente de irrupción se mantiene dentro de límites seguros y que los condensadores se cargan de manera controlada, evitando daños y mejorando la eficiencia del sistema. Además, la resistencia HS300 tiene características adecuadas para el montaje en disipadores de calor, lo que facilita la gestión térmica.

3.2.2 Dimensionamiento de los Semiconductores

Para el dispositivo de conmutación del convertidor, se ha decidido emplear MOSFETs de carburo de silicio (SiC). La elección de estos componentes se basa en varias ventajas clave que ofrecen en comparación con los dispositivos de silicio (Si) tradicionales:

- **Velocidad de Conmutación:** Los MOSFETs de SiC tienen una velocidad de conmutación significativamente mayor que los dispositivos de Si convencionales. Esta característica permite reducir las pérdidas por conmutación, mejorando la eficiencia general del convertidor.
- **Carga de Recuperación Inversa:** La carga de recuperación inversa en los MOSFETs de SiC es menor, lo cual es especialmente beneficioso en aplicaciones con topología DAB. Esto resulta en una reducción del voltaje durante la conmutación, mejorando así el rendimiento del sistema.
- **Tensión Crítica de Ruptura:** Los MOSFETs de SiC presentan una mayor tensión crítica de ruptura del campo eléctrico. Esto significa que pueden operar a una tensión nominal más alta con una capa mucho más fina, lo que reduce significativamente la resistencia de encendido de la fuente de drenaje $R_{DS(on)}$. Esta característica es crucial para mantener bajas las pérdidas de conducción y mejorar la eficiencia del convertidor.

Tabla 3.4 Requisitos de los MOSFETs de SiC.

Requisitos de los MOSFETs de SiC		
Magnitud	Valor	Unidades
Tensión máxima instantánea de pico	≥ 800	V
Corriente media máxima	≥ 40	A
Irms	≥ 45	A

Se ha optado por usar el MOSFET de referencia G3R20MT12N de GeneSiC Semiconductor. Las características clave del mismo que justifican su uso son las siguientes:

Tabla 3.5 Características del MOSFET G3R20MT12N.

Características del MOSFET G3R20MT12N		
Magnitud	Valor	Unidades
Tensión de drenaje-fuente (V_{DS})	1200	V
Resistencia de estado encendido ($R_{DS(on)}$)	20	m Ω
Corriente continua de drenaje (I_D)	90	A a $T_C = 25^\circ C$
Corriente máxima de pulso (I_{DM})	90	A

Estos requisitos aseguran que los MOSFETs seleccionados pueden manejar las tensiones y corrientes requeridas por el convertidor sin superar sus límites operativos, garantizando un rendimiento fiable y eficiente en el convertidor.

3.2.3 Dimensionamiento del Driver

Para la elección del driver, se han tenido en cuenta varias características clave. Dado que el equipo va a conmutar a una frecuencia de operación de 80 kHz, el driver debe garantizar que los tiempos de apertura y cierre sean lo suficientemente rápidos para no interferir con esta frecuencia de operación.

Se ha optado por utilizar el componente ISO5852S de Texas Instruments. Este driver ha sido seleccionado debido a su capacidad para cumplir con los requisitos de velocidad y fiabilidad necesarios para la operación

del convertidor. Las características principales del ISO5852S se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.6 Especificaciones del Driver.

Especificaciones del Driver		
Magnitud	Valor	Unidades
Tensión máxima instantánea	≥ 1100	V
Corriente media máxima	≥ 50	A

El ISO5852S proporciona un aislamiento robusto y tiempos de conmutación rápidos, asegurando que el convertidor funcione eficientemente a la frecuencia de 80 kHz. Estas características permiten una conmutación rápida y segura, minimizando las pérdidas y mejorando la eficiencia general del sistema.

3.2.4 Dimensionamiento del Tanque Resonante

Como se mencionó anteriormente, se ha optado por la topología CLLC para el convertidor, la cual requiere un tanque resonante. Para el diseño del tanque resonante, se ha decidido emplear la topología CLLC. Esta topología requiere de un condensador (C_{rx}) en cada lado del transformador. Las características del transformador que se emplearán son las siguientes:

Tabla 3.7 Características del transformador de alta frecuencia y frecuencia de resonancia elegida.

Magnitud	Símbolo	Valor
Potencia nominal	P_n	13 kW
Inductancia primaria	L_1	10.233 μ H
Inductancia secundaria	L_2	10.233 μ H
Inductancia magnetizante	L_m	3650 μ H
Resistencia primaria	R_1	36.3 m Ω
Resistencia secundaria	R_2	36.3 m Ω
Resistencia magnética	R_m	26 M Ω
Relación de transformación	$a = \frac{n_1}{n_2}$	1
Frecuencia de resonancia	f_r	75 kHz

Cálculo de los Elementos del Tanque Resonante

Dado que la frecuencia de conmutación es 80 kHz, se ha decidido usar una frecuencia de resonancia de 75 kHz. La inductancia de fuga total y la inductancia magnetizante se combinan para determinar la respuesta del tanque resonante. A continuación, se calcula la capacitancia teórica necesaria:

$$C_1 = \frac{1}{\omega_r^2 L_1}$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega_r^2 L_2}$$

Usando los valores proporcionados:

$$\omega_r = 2\pi \times 75 \times 10^3 \text{ rad/s}$$

$$C_1 = \frac{1}{(2\pi \times 75 \times 10^3)^2 \times 10.233 \times 10^{-6}} \approx 440nF$$

$$C_2 = \frac{1}{(2\pi \times 75 \times 10^3)^2 \times 10.233 \times 10^{-6}} \approx 440nF$$

Selección de los Componentes

Para el diseño de los condensadores del tanque resonante, se deben conocer las tensiones y corrientes máximas que deben soportar. Estos valores se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 3.8 Características de los componentes del tanque resonante.

Magnitud	Valor	Unidades
Tensión máxima	800	V
Corriente máxima	40	A

Para los condensadores del tanque resonante, se ha optado por utilizar condensadores pequeños. Estos condensadores se soldarán en una PCB diseñada específicamente para organizar filas y columnas de condensadores, formando una matriz.

Esta configuración en matriz permite ajustar el valor de capacidad total a la deseada, así como soportar la tensión y corriente máximas que pasarán por el condensador. Al distribuir los condensadores en una matriz, no solo se alcanza el valor de capacidad requerido, sino que también se incrementa la capacidad de manejo de tensión y corriente del sistema.

Se han elegido los condensadores KEMET C1210C225K1RACTU, cuyas características son las siguientes:

Tabla 3.9 Características de los condensadores KEMET C1210C225K1RACTU.

Características	Valor	Unidades
Tensión nominal	100	V
Capacitancia nominal	2.2	μF
Tolerancia	$\pm 10\%$	
Rango de temperatura	-55 a 125	$^{\circ}C$

Se ha estimado que vamos a necesitar una matriz de 5 series por 27 paralelos, la cual tendrá las siguientes características:

Tabla 3.10 Características de la matriz de condensadores.

Magnitud	Valor	Unidades
Valor del condensador total	442.8	nF
Tensión máxima soportada	1130	V
Corriente máxima soportada	162	A

Mediante esta técnica de ensamblaje en matriz, se garantiza que el sistema operará de manera eficiente

y segura, cumpliendo con todas las especificaciones eléctricas necesarias. La PCB diseñada facilita la integración de los condensadores en el tanque resonante, asegurando una disposición ordenada y efectiva de los componentes. Además, esta configuración está sobredimensionada, por lo que no tendremos problemas en cuanto a la tensión y corriente máximas soportadas.

3.2.5 DSP para el Control del Convertidor

Para el control del convertidor se ha utilizado el DSP LAUNCHXL-F28379D de Texas Instruments. Este dispositivo es una plataforma potente y flexible diseñada para aplicaciones avanzadas de control y procesamiento de señal. A continuación, se detallan algunas de sus características principales:

- **Procesador de 32 bits:** El F28379D cuenta con un procesador de 32 bits con una arquitectura C28x y dos CPUs que permiten un alto rendimiento y eficiencia en el procesamiento de control y señal.
- **Frecuencia de Operación:** Puede operar a una frecuencia de hasta 200 MHz, lo que proporciona la velocidad necesaria para aplicaciones de control en tiempo real.
- **Unidades de Punto Flotante (FPU):** Incluye unidades de punto flotante, lo que mejora la precisión y el rendimiento en cálculos matemáticos complejos.
- **Memoria:** Dispone de una memoria de 1 MB de Flash y 204 KB de RAM.
- **Módulos de Control de Motores y PWM:** Integra módulos específicos para el control de motores y generación de PWM, esenciales para el manejo eficiente de los MOSFETs en el convertidor.
- **Conversores ADC de Alta Resolución:** Cuenta con convertidores ADC de alta resolución (12 y 16 bits), para la adquisición precisa de señales analógicas.
- **Interfaces de Comunicación:** Incluye múltiples interfaces de comunicación como CAN, SPI, I2C y UART, facilitando la integración con otros sistemas y dispositivos.

El uso del LAUNCHXL-F28379D permite implementar algoritmos de control avanzados y asegura una respuesta rápida y precisa en el manejo del convertidor.

3.2.6 Fusibles

Para la elección de los fusibles, es fundamental considerar el valor de corriente al cual queremos que actúen y el tiempo de respuesta.

Se ha seleccionado el fusible Altech 63C22X58GI de 63A de cerámica. Esta elección se basa en el hecho de que la corriente máxima de pico prevista en el sistema es de 50A. Por lo tanto, se ha optado por un fusible con un valor nominal ligeramente superior, es decir, 63A, para asegurar que el fusible actúe adecuadamente en caso de sobrecarga y proteja el sistema de posibles daños.

Este fusible garantiza la protección del circuito sin intervenir en las corrientes de operación normales, proporcionando un margen de seguridad adecuado para la corriente máxima esperada.

3.2.7 Contactores

Para la elección de los contactores, es esencial considerar varios aspectos. En primer lugar, se debe tener en cuenta el poder de corte de la tensión con la que se va a trabajar, y en segundo lugar, la tensión de maniobra

necesaria para su operación.

Se ha optado por los contactores LEV200H5ANA de Texas Instruments. Esta elección se basa en su capacidad para manejar las tensiones y corrientes requeridas por el sistema. En total, se utilizarán cinco contactores (cuatro para las entradas y salidas DC y otro para la precarga) para asegurar una operación segura y eficiente.

Tabla 3.11 Características del contactor.

Características del contactor		
Magnitud	Valor	Unidades
Rango Tensión Operación	12-900	Vdc
Corriente Continua Nominal	500	A

Estos contactores son adecuados para cortar la tensión de operación del sistema y manejar la corriente continua requerida, garantizando una actuación fiable y segura en las condiciones de operación especificadas.

3.2.8 Seta de Emergencia

Para garantizar la seguridad del sistema, se ha decidido incluir una seta de emergencia que permite habilitar y deshabilitar la tensión de los contactores de manera rápida y segura.

El modelo elegido es el XB4BS8442 de Schneider Electric, perteneciente a la serie Harmony. Este botón de emergencia cuenta con contacto normalmente cerrado (NC) y es adecuado para montaje en panel con un diámetro de 22.5 mm.

Adicionalmente, se ha incluido la placa de inscripción ZBY9320 de Schneider Electric, también de la serie Harmony XB, para proporcionar una identificación clara y visible del botón de emergencia.

Esta configuración asegura que los operadores puedan desactivar rápidamente el sistema en caso de emergencia, mejorando así la seguridad general del entorno operativo.

3.2.9 Sensores de Corriente

Para la medición de corriente en el sistema, se utilizarán dos tipos de sensores. Con ellos se medirá la corriente en diferentes puntos del convertidor, específicamente en el lado interno. Un sensor medirá la corriente individual que sale o entra de cada convertidor, mientras que el otro medirá la corriente total que entra o sale del conjunto de todos los convertidores en paralelo. Dado que el sensor que mide la corriente total necesitará un rango mayor que el sensor individual, se utilizarán estos dos tipos de sensores.

Sensor de Corriente Individual

Para la medición de la corriente individual de cada convertidor, se ha elegido el sensor LA-55-P. Este sensor es adecuado para medir corrientes más bajas y proporciona una alta precisión necesaria para el control y monitoreo de cada convertidor individualmente.

Todos los sensores de corriente necesitan una etapa de adaptación para asegurar lecturas precisas y confiables. La etapa de adaptación de este sensor se muestra en la siguiente figura:

Tabla 3.12 Características Sensor LA-55-P.

Características Sensor LA-55-P		
Magnitud	Valor	Unidades
Corriente nominal primaria RMS	50	A
Rango de medición de corriente	0 a ± 70	A
Relación de transformación	1:1000	
Banda de frecuencia	DC a 200	kHz
Temperatura de operación	-40 a 85	$^{\circ}\text{C}$

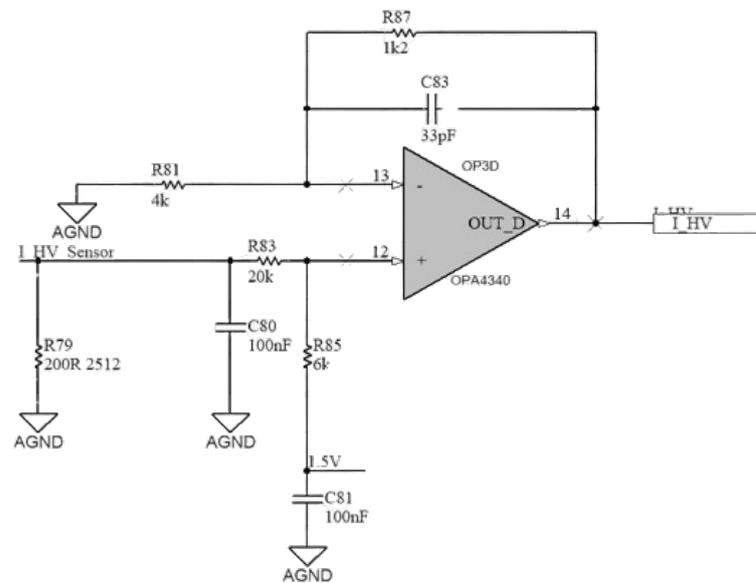


Figura 3.1 Etapa de adaptación sensor de corriente LA-55-P.

Sensor de Corriente Total

Para la medición de la corriente total que entra o sale del conjunto de todos los convertidores en paralelo, se ha seleccionado el sensor LF-310-S. Este sensor tiene un rango mayor para poder manejar las corrientes combinadas de todos los convertidores.

Tabla 3.13 Características Sensor LF-310-S.

Características Sensor LF-310-S		
Magnitud	Valor	Unidades
Corriente nominal primaria RMS	300	A
Rango de medición de corriente	-500 a 500	A
Relación de transformación	1:2000	
Banda de frecuencia	100	kHz
Temperatura de operación	-40 a 85	$^{\circ}\text{C}$

La etapa de adaptación de este sensor se muestra en la siguiente figura:

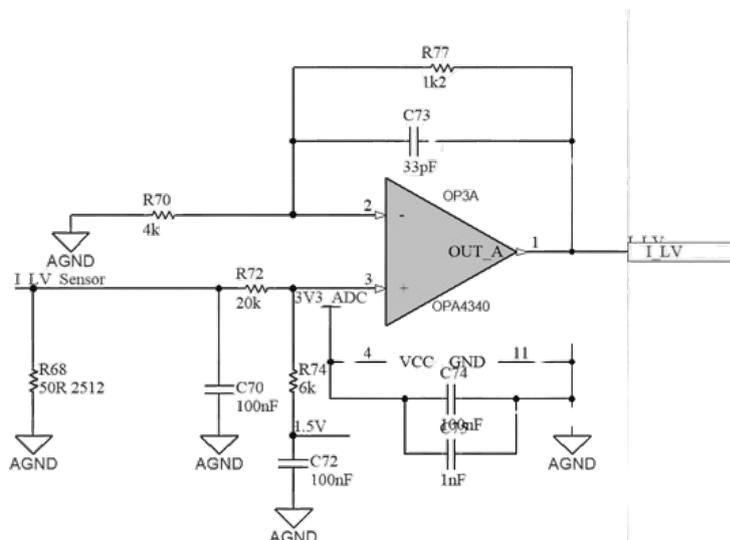


Figura 3.2 Etapa de adaptación sensor de corriente LF-310-S.

Con estos sensores, se garantiza un monitoreo y control eficiente de las corrientes en el sistema, tanto a nivel individual de cada convertidor como a nivel total del conjunto en paralelo.

3.2.10 Sensores de Tensión

Para la medición de tensión, es crucial considerar los parámetros de diseño. El sensor seleccionado es el LEM LV 25-P, cuyas características son:

Tabla 3.14 Características LEM LV 25-P.

Características LEM LV 25-P		
Magnitud	Valor	Unidades
I_{P_N}	10	mA
V_{P_N}	10-500	V

Este sensor mide corriente, por lo que se requiere una resistencia para medir la tensión a través de ella. El datasheet del sensor proporciona el valor de resistencia necesario para esta conversión. Después de realizar los cálculos, se ha determinado el uso de dos resistencias de 47 k Ω (una en cada polo) de 23W, lo que permite la lectura de tensiones de hasta 800 V.

Las medidas de tensión que se van a realizar son las siguientes:

- Tensión antes de los contactores en ambos lados del convertidor.
- Tensión después de los contactores en ambos lados del convertidor.

Además, a la salida del sensor se necesita una etapa de adaptación para asegurar que las lecturas sean precisas y adecuadas para el sistema de control.

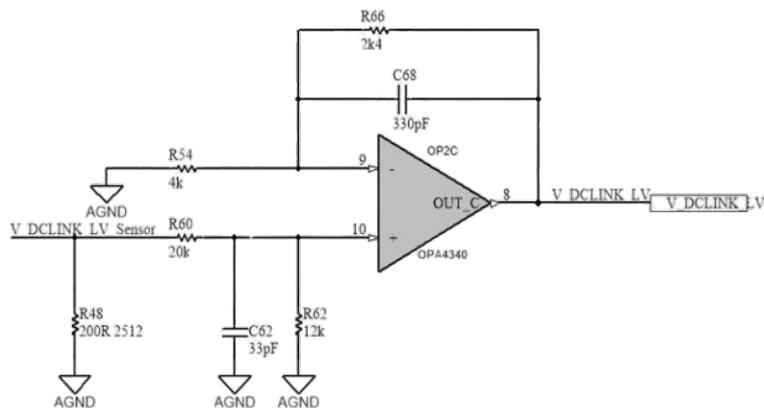


Figura 3.3 Etapa de adaptación sensor de tensión LEM LV 25-P.

3.2.11 Sensores de Temperatura

Para la medición de la temperatura en el sistema, se utilizarán sensores NTC ALUG02A472G de VISHAY. Estos sensores son resistencias con coeficiente de temperatura negativo, lo que significa que su resistencia disminuye a medida que la temperatura aumenta.

Tabla 3.15 Características LEM LV 25-P.

Características de los Sensores NTC		
Magnitud	Valor	Unidades
Valor de resistencia	4.7K a 100K	Ω
Rango de temperatura de operación	-55 a +125	$^{\circ}\text{C}$

Las mediciones de temperatura necesarias para nuestro equipo son:

- Temperatura de los MOSFETs del lado externo.
- Temperatura de los MOSFETs del lado interno.

Al igual que otros sensores, los sensores de temperatura NTC requieren una etapa de adaptación de señal para asegurar lecturas precisas y confiables. A continuación, se presenta un esquema de la etapa de adaptación de señal para los sensores de temperatura:

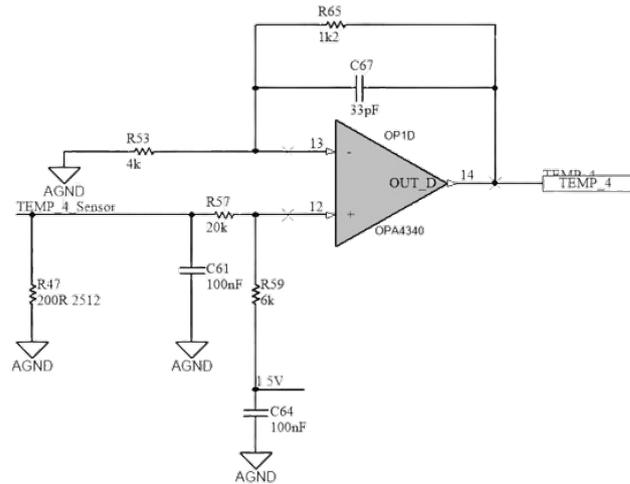


Figura 3.4 Etapa de adaptación sensor de temperatura NTC ALUG02A472G.

Esta adaptación es crucial para mantener la precisión y la fiabilidad de las mediciones de temperatura, asegurando un monitoreo y control óptimos de las condiciones térmicas del sistema.

3.3 Interconexión en Paralelo de los Convertidores

Como se ha explicado en apartados anteriores, la implementación de varios convertidores en paralelo es esencial para alcanzar la potencia requerida por la microrred DC. Para lograr esto, los buses DC de cada convertidor se unirán tanto por el lado externo como por el lado interno.

Esta configuración permite incrementar la potencia suministrada al combinar varios módulos, lo que amplía la capacidad total del sistema. El control implementado en el sistema se encargará de gestionar esta distribución de potencia, garantizando una operación eficiente y equilibrada.

A continuación, se incluirá una imagen que ilustra la interconexión de los tres convertidores en paralelo.

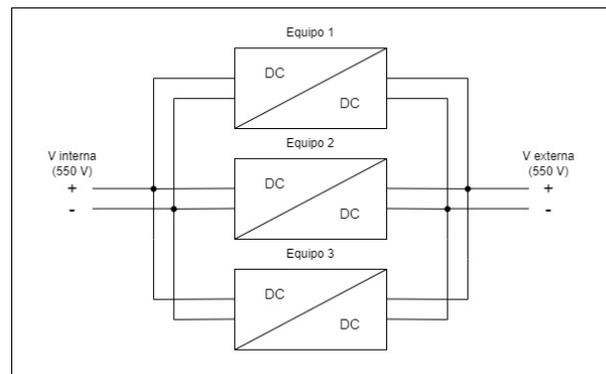


Figura 3.5 Esquema configuración paralelo convertidores DC-DC.

Este enfoque no solo optimiza la eficiencia del sistema, sino que también mejora la estabilidad y la redundancia, ya que la falla de un convertidor no compromete la operación global de la microrred.

4 Diseño del Sistema de Control

Para profundizar en las ecuaciones que relacionan la potencia de salida DC en un convertidor CLLC con control de desfase entre puentes, es útil empezar con una comprensión básica del análisis del primer armónico y las aproximaciones utilizadas en la teoría de los convertidores resonantes.

4.1 Análisis del Primer Armónico

El análisis del primer armónico (First Harmonic Approximation, FHA) simplifica el estudio de los convertidores resonantes al considerar únicamente el primer armónico de la señal resonante. Esto permite obtener una representación sinusoidal de la forma de onda resonante, simplificando así el análisis del circuito [8].

Al considerar solo el primer armónico, se pueden derivar ecuaciones más manejables que describen el comportamiento del convertidor bajo condiciones de operación resonante. Esto facilita el diseño de estrategias de control que optimizan la transferencia de potencia y la eficiencia del sistema. La FHA es especialmente útil en la etapa inicial de diseño y análisis, proporcionando una base sólida para el desarrollo de controladores más complejos y precisos.

4.2 Convertidor CLLC y Control de Desfase

Un convertidor CLLC consta de dos redes resonantes LC en serie: una en el lado primario y otra en el lado secundario del transformador. El control de desfase entre los puentes del lado primario y secundario se utiliza para regular la transferencia de potencia [7].

El control de desfase es una técnica esencial que permite ajustar la cantidad de energía transferida entre el primario y el secundario del transformador, modulando el ángulo de fase entre las señales de conmutación de los puentes. Esta técnica no solo mejora la eficiencia de conversión, sino que también proporciona un control preciso sobre la tensión y la corriente de salida, adaptándose a las variaciones de carga y manteniendo la estabilidad del sistema.

4.3 Ecuaciones Fundamentales

4.3.1 Circuito Resonante Primario y Secundario

Las ecuaciones para las redes resonantes en el lado primario y secundario son:

$$Z_{res} = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)$$

Donde:

- Z_{res} es la impedancia resonante.
- R es la resistencia de la carga.
- ω es la frecuencia angular.
- L es la inductancia.
- C es la capacitancia.

4.3.2 Corriente Resonante

Utilizando FHA, la corriente resonante en el circuito se puede expresar como:

$$I_{res} = \frac{V_{in}}{Z_{res}}$$

Donde V_{in} es el voltaje de entrada aplicado a la red resonante [10].

4.3.3 Relación de Potencia y Desfase

La potencia transferida en un convertidor CLLC puede ser modulada por el desfase (δ) entre los voltajes del lado primario (V_{pri}) y del lado secundario (V_{sec}). La potencia de salida (P_{out}) en función del desfase se puede expresar como:

$$P_{out} = \frac{V_{pri} \cdot V_{sec}}{2 \cdot Z_{res}} \cdot \sin(\delta)$$

Donde:

- V_{pri} es el voltaje primario.
- V_{sec} es el voltaje secundario.
- δ es el ángulo de desfase entre los dos voltajes.

4.3.4 Desfase y Transferencia de Potencia

Para un control de desfase específico, la relación entre el desfase (δ) y la potencia transferida (P_{out}) se puede detallar más considerando la relación de transformación del transformador (n):

$$V_{sec} = n \cdot V_{pri}$$

Entonces la potencia de salida considerando la relación de transformación es:

$$P_{out} = \frac{V_{pri}^2 \cdot n}{2 \cdot Z_{res}} \cdot \sin(\delta)$$

4.4 Análisis y Aproximación

Al aplicar la FHA, se asume que la frecuencia de operación está cerca de la frecuencia resonante, lo que minimiza el impacto de los armónicos superiores. La potencia de salida puede ser controlada eficazmente variando el ángulo de desfase (δ), lo que permite un control preciso de la transferencia de energía [6].

4.5 Consideraciones Adicionales

- La impedancia Z_{res} es función de la frecuencia de resonancia, y debe diseñarse cuidadosamente para optimizar la eficiencia del convertidor.
- El análisis del primer armónico es una aproximación; para un diseño preciso, es necesario considerar efectos de armónicos superiores y pérdidas en componentes reales [9].

El análisis del primer armónico proporciona una herramienta poderosa para diseñar y controlar convertidores CLLC. Mediante el ajuste del desfase entre puentes, es posible controlar la potencia de salida de manera eficiente.[7].

4.6 Estrategias de Control para los Convertidores

El objetivo de la paralelización es, manteniendo la tensión DC en el lado externo del convertidor, controlar tanto la tensión DC como la corriente DC en el lado interno. Para lograr esto, se implementarán diversas estrategias de control. En la Figura 4.1 se muestra el diagrama de control utilizado.

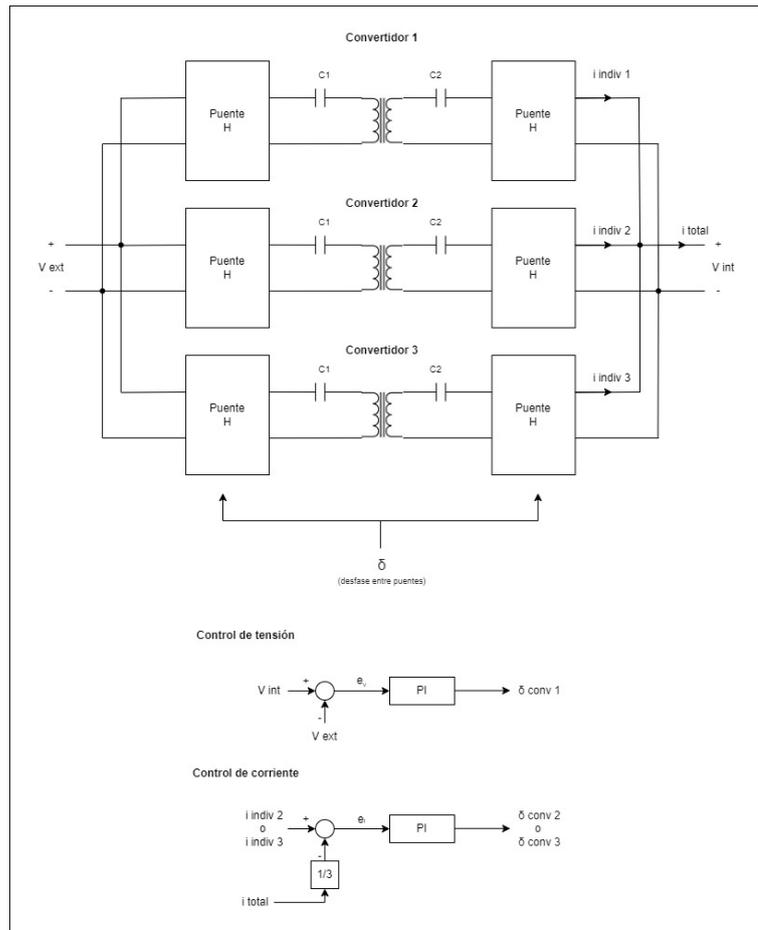


Figura 4.1 Diagrama de control del paralelo de los tres convertidores DC-DC.

4.6.1 Control de Tensión

Este control se aplicará únicamente en el Convertidor 1 y se implementará mediante un controlador PI. La magnitud a variar es el desfase entre los puentes.

$$\delta(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

Donde:

- $\delta(t)$ es la salida del controlador (desfase entre los puentes).
- $e(t)$ es el error (diferencia entre V_{ext} y V_{int}).
- K_p y K_i son las constantes del controlador PI.

4.6.2 Control de Corriente

Este control se aplicará en los otros dos convertidores (Convertidor 2 y Convertidor 3), ya que se desea que ambos controlen la corriente DC en el lado interno. La idea es que se produzca un reparto equitativo de la potencia entregada por cada equipo, de manera que los tres proporcionen la misma potencia.

Utilizaremos el sensor de corriente total del bus DC interno para medir la corriente total que se le está pidiendo al sistema. Con este control, haremos que cada equipo proporcione un tercio de la corriente total medida. También se usará un controlador PI para este control.

$$\delta(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

Donde:

- $\delta(t)$ es la salida del controlador (desfase entre los puentes).
- $e(t)$ es el error (diferencia entre I_{indiv2} o I_{indiv3} y $\frac{1}{3}I_{total}$).
- K_p y K_i son las constantes del controlador PI.

Con estas estrategias de control, se garantiza una distribución equitativa de la potencia entre los convertidores, así como un control eficiente y estable de la tensión y la corriente en el sistema.

4.7 Simulaciones y validación del control

Las simulaciones del sistema de control se han realizado utilizando MATLAB/Simulink®. Se ha modelado un solo convertidor en el que se puede cambiar la estrategia de control, permitiendo que controle tanto la tensión como la corriente dependiendo de las necesidades del sistema. Este enfoque permite validar y ajustar los parámetros del controlador PI en un entorno simulado antes de su implementación en el sistema real. A continuación, se presentan las distintas partes que nos encontramos en el archivo de Simulink®.

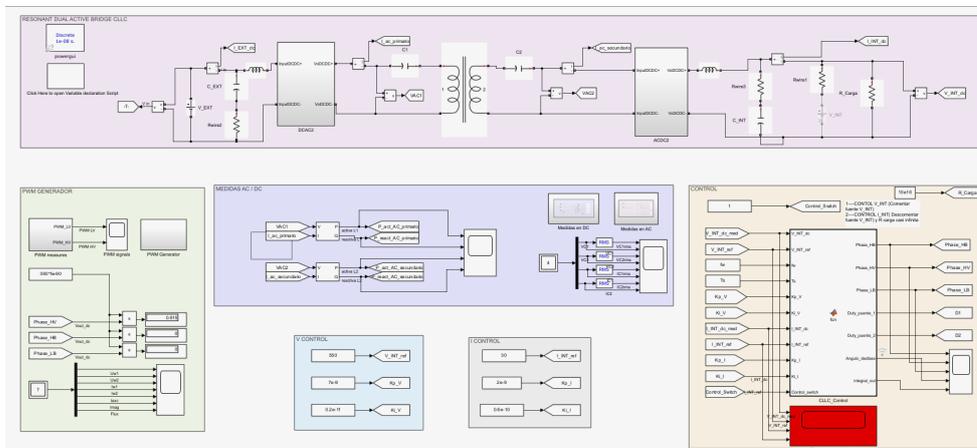


Figura 4.2 Esquemático DAB resonante en Simulink®.

A continuación, se comentará la función de cada parte del modelo.

Función de Control DAB resonante

La función de control es una de las partes principales del modelo. En esta sección, se reciben diferentes parámetros de entrada, como son las tensiones y corrientes medidas, los valores de las constantes de los PI, la frecuencia de conmutación, T_s , y un switch de control donde se elige si se desea hacer control de tensión o de corriente. Las salidas del sistema incluyen los desfases entre puentes y entre ramas, así como los ciclos de trabajo (duty cycles). También se proporciona un scope donde se pueden comparar la variable de referencia y la medida.

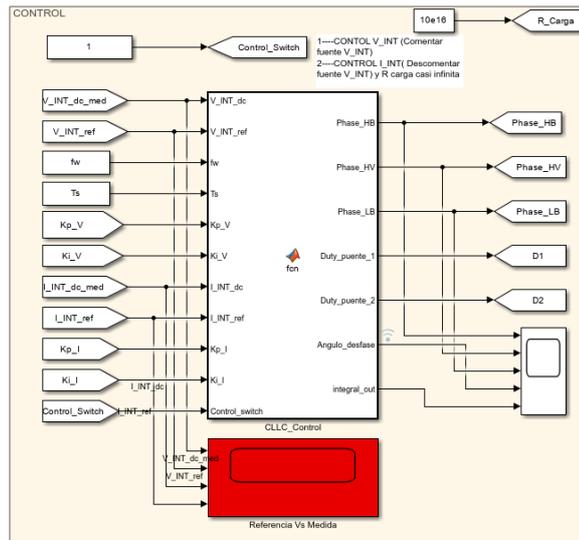


Figura 4.3 Función de control DAB resonante.

Para el tipo de control que estamos utilizando, solo es necesario variar el desfase entre puentes del convertidor. Sin embargo, también existe la posibilidad de controlar mediante los desfases entre las ramas de ambos puentes, proporcionando mayor flexibilidad y opciones de ajuste en el control del sistema.

Generador de PWM

El bloque de generador de PWM es esencial para la modulación y control del convertidor. Este bloque genera las señales de modulación por ancho de pulso (PWM) necesarias para controlar los interruptores electrónicos del convertidor.

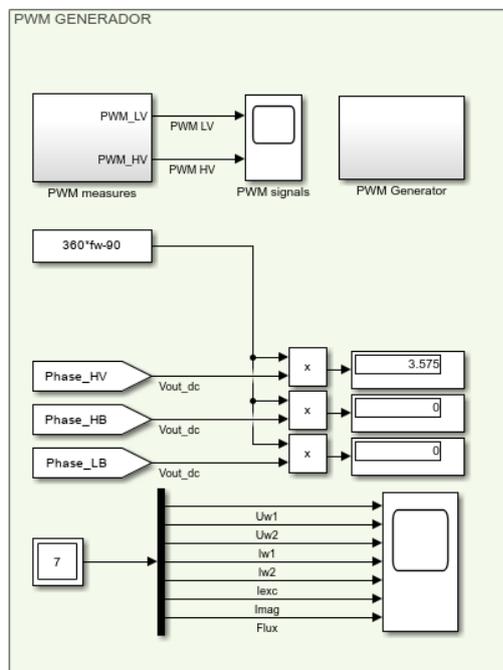


Figura 4.4 Bloque de Generador de PWM.

El generador de PWM funciona de la siguiente manera:

- **Entrada de Control:** Recibe las señales de desfase calculadas por el controlador PI. Estas señales determinan el momento preciso en que los interruptores deben activarse y desactivarse.
- **Modulación:** Convierte las señales de control en pulsos de ancho variable. La modulación por ancho de pulso es una técnica eficaz para controlar la potencia suministrada a las cargas y para manejar la velocidad y el torque en motores eléctricos.
- **Salidas:** Genera las señales PWM que se envían a los transistores del puente del convertidor. Estas señales determinan el ciclo de trabajo de los transistores, controlando así la tensión y corriente de salida del convertidor.

A continuación se muestra el bloque de construcción de las PWM:

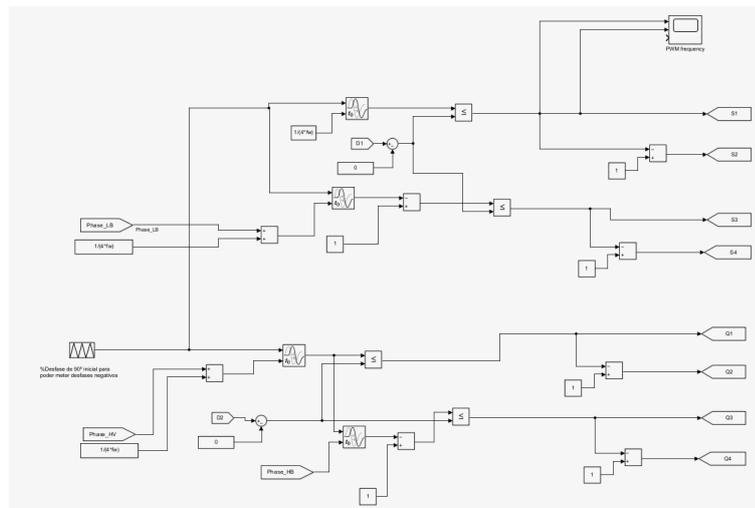


Figura 4.5 Circuito Generador de PWM.

El circuito se compone de varios comparadores, generadores de señal de referencia y bloques de lógica que aseguran que las señales PWM generadas cumplan con los requisitos de conmutación de los dispositivos de potencia. Como podemos observar, también se han incluido los desfases entre ramas aunque para esta aplicación no se estén utilizando. A las señales se le ha dado un offset de 90° para poder desfasear para ambos lados, ya que nuestra topología permite este funcionamiento.

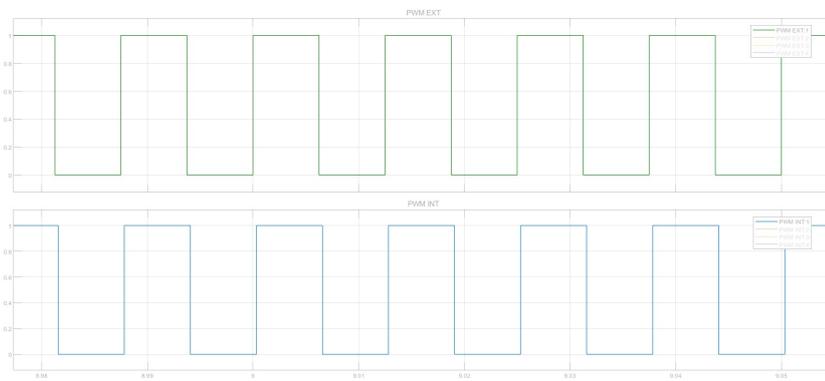


Figura 4.6 Señales PWM generadas por el sistema. Unidades: Tensión (V), tiempo (s).

La gráfica de la figura 4.4 ilustra las señales PWM en ambos lados del convertidor. En la parte superior se muestran las señales para el lado externo (PWM EXT), y en la parte inferior, las señales para el lado interno del convertidor (PWM INT). Cada señal PWM está etiquetada de 1 a 4, correspondiente a los cuatro MOSFETs en cada puente.

Para observar más de cerca cómo se están aplicando los grados de desfase, se presenta la siguiente figura con un zoom en las señales PWM:

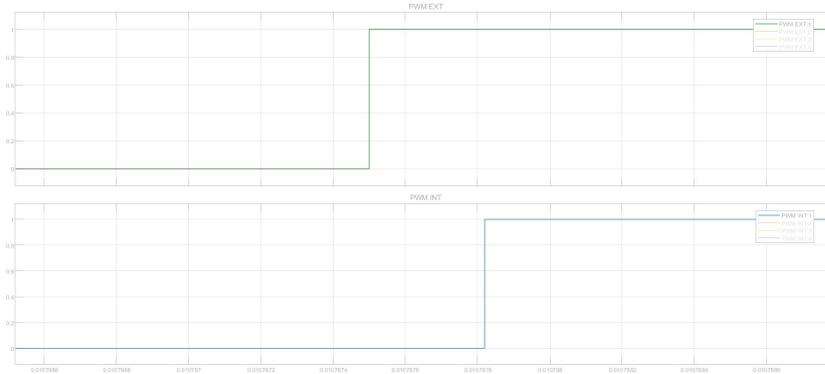


Figura 4.7 Zoom en las señales PWM para mostrar los desfases. Unidades: Tensión (V), tiempo (s).

En la figura 4.7, se puede ver en detalle cómo se aplican los grados de desfase entre las señales PWM, en la cual la señal del puente externo está adelantada 9.22° de desfase con respecto a la señal del interno.

Circuito del Convertidor DC-DC DAB resonante

El circuito del propio convertidor se basa en la topología DAB resonante, como ya se ha comentado en puntos anteriores.

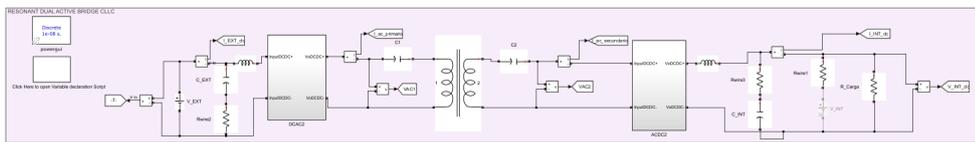


Figura 4.8 Circuito del Convertidor DC-DC DAB resonante.

Esta configuración permite un control eficiente y preciso de la tensión y la corriente, aprovechando las propiedades resonantes para optimizar el rendimiento y la estabilidad del sistema. Los MOSFETs en los puentes H conmutan a alta frecuencia, mientras que el transformador y el tanque resonante aseguran que la energía se transfiera de manera efectiva entre el lado primario y el secundario.

Configuración de las Constantes del PI y Referencias de Control

En la figura 4.9 se muestra el bloque de configuración de control, donde se definen las constantes del PI y las referencias tanto para el control de tensión como para el control de corriente. Este bloque permite ajustar los parámetros del controlador y establecer las condiciones operativas del sistema.

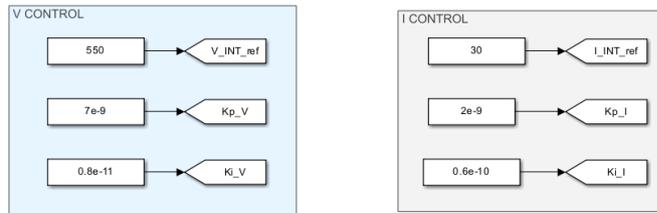


Figura 4.9 Configuración de las constantes del PI y referencias de control.

Bloque de Medidas del Sistema

El bloque de medidas de la figura 4.10 del sistema es crucial para asegurar el correcto funcionamiento y monitoreo del convertidor. Este bloque toma medidas tanto en AC como en DC, proporcionando datos esenciales para la validación y ajuste del sistema de control.

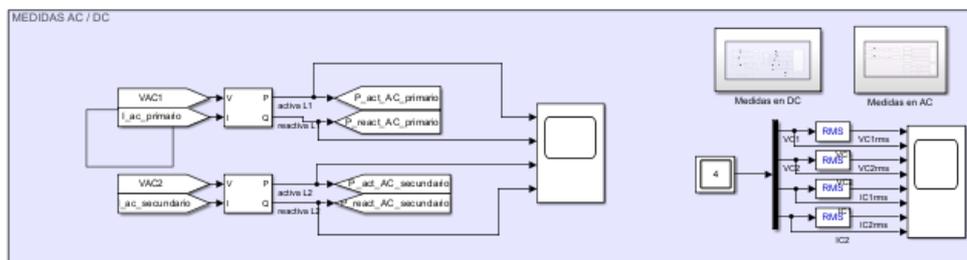


Figura 4.10 Bloque de medidas del sistema.

El bloque de medidas realiza las siguientes funciones:

- **Medidas en AC:** Se capturan las señales de corriente y tensión en el lado AC del convertidor. Estas medidas son esenciales para evaluar la calidad de la energía y la eficiencia del convertidor.
- **Medidas en DC:** Se monitorean las corrientes y tensiones en el lado DC. Estas medidas permiten verificar la estabilidad del sistema y la correcta operación de los controladores.
- **Resultados y Validación:** Los datos obtenidos se utilizan para comprobar el correcto funcionamiento del sistema. Se comparan las medidas con las referencias establecidas para asegurar que el sistema opera dentro de los parámetros deseados.

4.7.1 Simulación del Control de Tensión

En esta simulación, se implementa el controlador PI para regular la tensión de salida del convertidor. La configuración del controlador y los resultados obtenidos se describen a continuación.

Existen varios métodos ampliamente reconocidos para determinar las constantes óptimas de un controlador PI. Entre ellos se destacan el método de oscilación (también conocido como método de respuesta en frecuencia), el método basado en la curva de reacción (o método de respuesta al escalón) y la técnica de asignación de polos. Cada uno de estos métodos ofrece ventajas específicas dependiendo de las características del sistema a controlar. En el presente trabajo, se ha optado por el método de oscilación debido a su simplicidad y eficacia en la obtención de parámetros precisos para sistemas con respuesta oscilatoria, lo cual facilita un ajuste más intuitivo y directo de las constantes del controlador.

• **Parámetros del Controlador PI:**

- $K_p = 7 \times 10^{-9}$
- $K_i = 0.8 \times 10^{-11}$

Este método consiste en incrementar la ganancia proporcional hasta que el sistema alcance un punto de oscilación estable. Una vez determinada la ganancia crítica K_c y el período de oscilación P_c , se establece K_p como $K_p = K_c$.

Para establecer K_i , se utiliza la relación $K_i = \frac{K_p}{T_i}$, donde T_i es el tiempo integral, calculado como una fracción del período de oscilación P_c .

La figura 4.11 muestra la respuesta temporal de la tensión de salida del convertidor cuando se aplica el controlador PI.

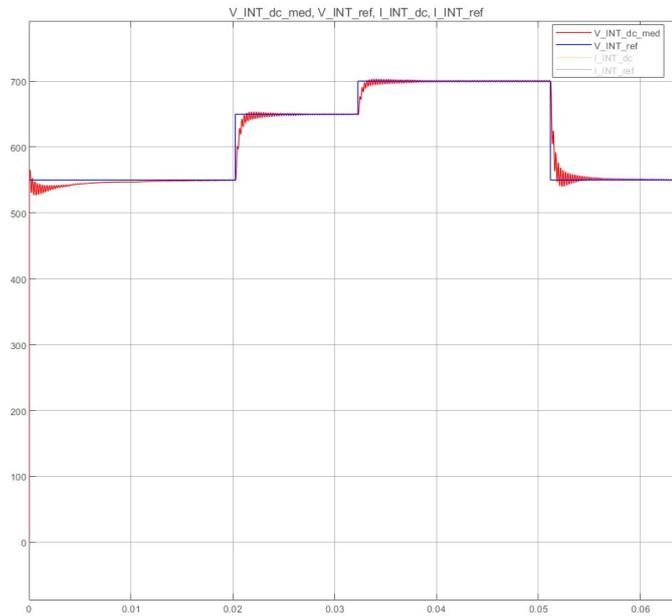


Figura 4.11 Respuesta temporal del control de tensión. Unidades: Tensión (V), tiempo (s).

Para ello, hemos usado en la salida del convertidor una carga de 200Ω . Para comprobar el correcto funcionamiento del control, se han realizado tres cambios de referencia.

- La referencia inicial se ha establecido en 550 V (tensión nominal del convertidor). Podemos observar que el sistema tarda aproximadamente 5 ms en alcanzar la referencia.
- En $t = 0.02$ s, se ha incrementado la referencia a 650 V, a la cual el sistema tarda aproximadamente 4 ms en llegar.
- En $t = 0.032$ s, la referencia se ha ajustado a 700 V, alcanzándose esta en unos 4 ms.
- Finalmente, en $t = 0.051$ s, la referencia se ha reducido nuevamente a 550 V, y el sistema tarda aproximadamente 6 ms en estabilizarse en esta nueva referencia.

En la gráfica se pueden observar los siguientes puntos clave:

- **Tiempo de Establecimiento:** El tiempo necesario para que la tensión de salida alcance la nueva referencia es relativamente corto, indicando una respuesta rápida del sistema.

- **Precisión:** La tensión de salida se mantiene cercana a la referencia, lo que demuestra la precisión del controlador PI.
- **Oscilaciones:** Se observan pequeñas oscilaciones alrededor de las referencias, especialmente justo después de los cambios de referencia. Estas oscilaciones son normales y están dentro de límites aceptables.

A continuación se muestra la potencia que da el sistema para estos cambios de referencia.

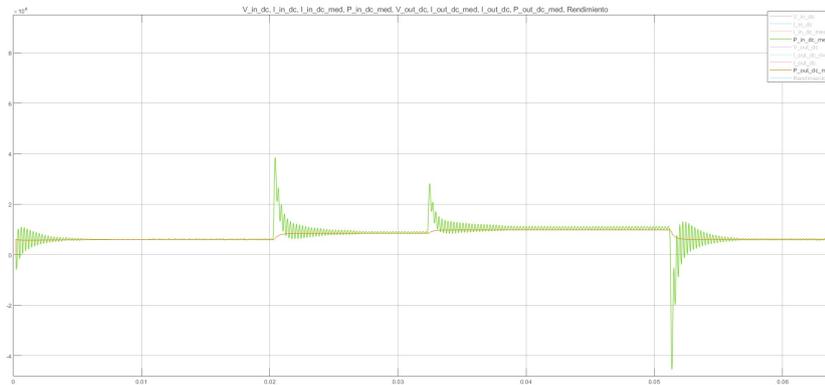


Figura 4.12 Respuesta temporal de la potencia con control de tensión. Unidades: Potencia (W), tiempo (s).

Se pueden observar los siguientes aspectos:

- **Ajustes de Potencia:** Cada cambio en la referencia de tensión provoca un ajuste en la potencia de salida.
- **Estabilidad:** A pesar de las variaciones en la referencia de tensión, el sistema muestra una capacidad robusta para estabilizar la potencia de salida rápidamente.
- **Eficiencia:** La gráfica también muestra que el sistema mantiene una eficiencia adecuada durante todo el proceso, sin grandes pérdidas de potencia.

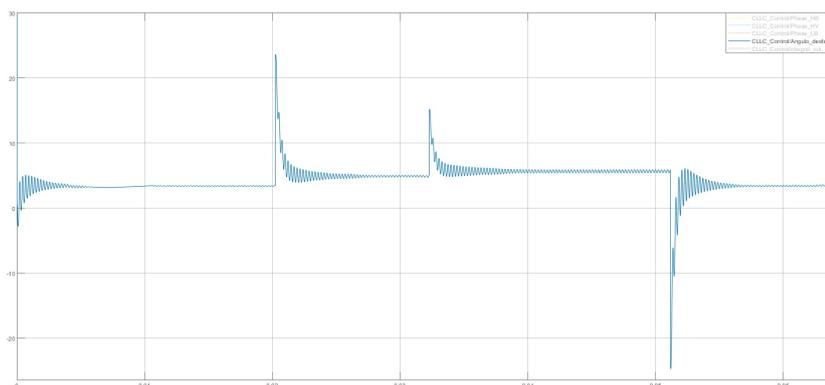


Figura 4.13 Respuesta temporal del desfase con control de tensión. Unidades: Desfase (°), tiempo (s).

En la gráfica de la respuesta del desfase, podemos observar los cambios que se producen al cambiar la referencia, estabilizándose en los siguientes valores:

- Para $V_{ref} = 550$, el desfase se establece en 3.31° .

- Para $V_{ref} = 650$, el desfase se establece en 4.97° .
- Para $V_{ref} = 700$, el desfase se establece en 5.68° .
- Para $V_{ref} = 550$, el desfase se establece en 3.31° de nuevo.

En conclusión, los resultados de las simulaciones demuestran la eficacia del controlador PI para mantener la tensión de salida en los valores de referencia establecidos, asegurando un funcionamiento estable y eficiente del convertidor.

4.7.2 Simulación del Control de Corriente

En esta simulación, se implementa el controlador PI para regular la corriente de salida del convertidor. La configuración del controlador y los resultados obtenidos se describen a continuación.

Al igual que en el control de tensión, se ha vuelto a usar el método de oscilación para hallar las constantes del controlador PI en el control de corriente.

• Parámetros del Controlador PI:

- $K_p = 2 \times 10^{-9}$
- $K_i = 0.6 \times 10^{-10}$

La figura 4.14 muestra la respuesta temporal de la corriente de salida del convertidor cuando se aplica el controlador PI.

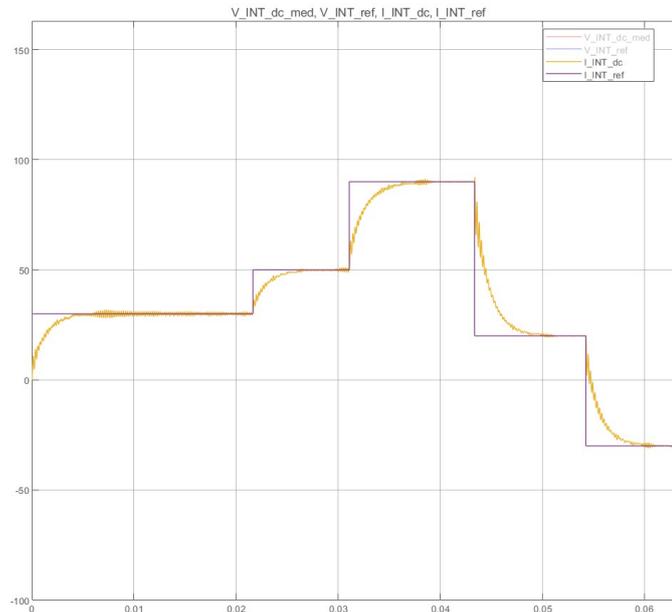


Figura 4.14 Respuesta temporal del control de corriente. Unidades: Corriente (A), tiempo (s).

Para esta simulación, se ha utilizado en la salida del convertidor una carga de valor casi infinito y se ha impuesto la tensión mediante una fuente de 550 V a la salida. Para comprobar el correcto funcionamiento del control, se han realizado cuatro cambios de referencia.

- La referencia inicial se ha establecido en 30 A. Podemos observar que el sistema tarda aproximadamente 4.8 ms en alcanzar la referencia.

- En $t = 0.022$ s, se ha incrementado la referencia a 50 A, a la cual el sistema tarda aproximadamente 5.3 ms en llegar.
- En $t = 0.031$ s, la referencia se ha ajustado a 100 A, alcanzándose esta en unos 6.5 ms.
- En $t = 0.043$ s, la referencia se ha reducido a 20 A (salto de 80 A), y el sistema tarda aproximadamente 7.57 ms en estabilizarse en esta nueva referencia.
- Por último, en $t = 0.054$ s, le hemos dado al sistema una referencia negativa (-30 A), es decir, para que nueva corriente en el sentido contrario, y alcanza la referencia en 6.1 ms.

A continuación se muestra la potencia que aporta el sistema para estos cambios de referencia.

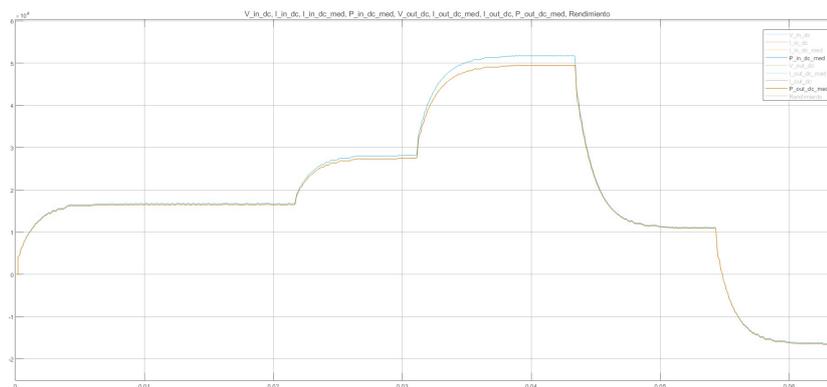


Figura 4.15 Respuesta temporal de la potencia con control de corriente. Unidades: Potencia (W), tiempo (s).

Se pueden observar los siguientes aspectos:

- **Ajustes de Potencia:** Cada cambio en la referencia de corriente provoca un ajuste en la potencia de salida.
- **Estabilidad:** A pesar de las variaciones en la referencia de corriente, el sistema muestra una capacidad robusta para estabilizar la potencia de salida rápidamente.
- **Eficiencia:** La gráfica también muestra que el sistema mantiene una eficiencia adecuada durante todo el proceso, sin grandes pérdidas de potencia.

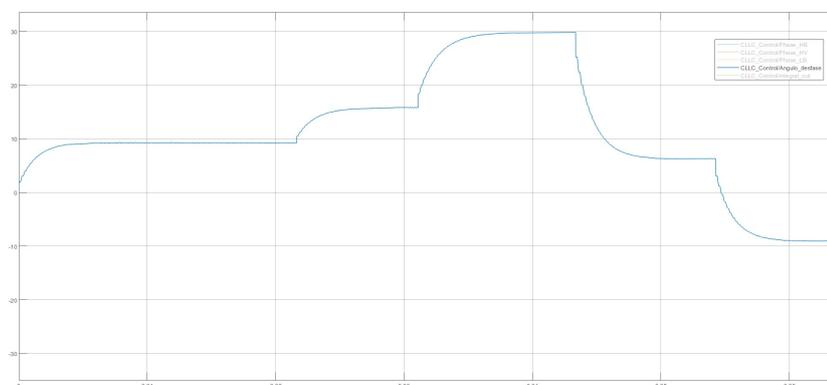


Figura 4.16 Respuesta temporal del desfase con control de corriente. Unidades: Desfase ($^{\circ}$), tiempo (s).

En la gráfica de la respuesta del desfase, podemos observar los cambios que se producen al cambiar la referencia, estabilizándose en los siguientes valores:

- Para $I_{ref} = 30$ A, el desfase se establece en 9.27° .
- Para $I_{ref} = 50$ A, el desfase se establece en 15.82° .
- Para $I_{ref} = 90$ A, el desfase se establece en 29.75° .
- Para $I_{ref} = 20$ A, el desfase se establece en 6.31° .
- Para $I_{ref} = -30$ A, el desfase se establece en -9.02° .

En conclusión, los resultados de las simulaciones demuestran la eficacia del controlador PI para mantener la corriente de salida en los valores de referencia establecidos, asegurando un funcionamiento estable y eficiente del convertidor.

4.7.3 Análisis de Resultados

En este apartado, se presenta el análisis de los resultados obtenidos de las simulaciones, evaluando tanto el rendimiento del sistema como el principio de conmutación de los convertidores. A continuación se comentan las gráficas que muestran estos aspectos clave.

Rendimiento del Sistema

La figura 4.17 muestra el rendimiento del sistema durante su funcionamiento. El rendimiento se define como la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada del convertidor.

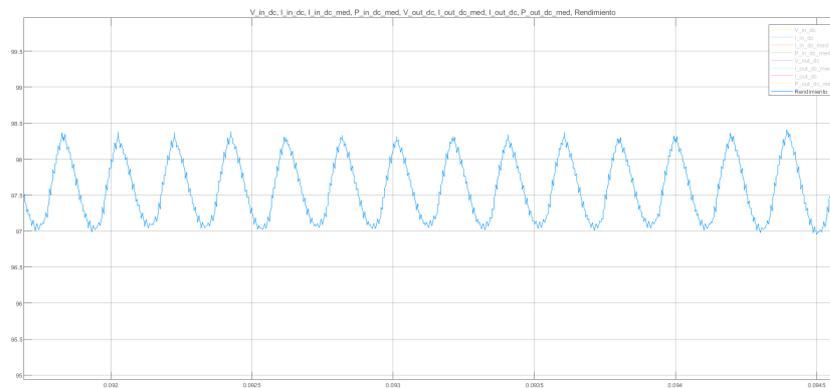


Figura 4.17 Rendimiento del sistema durante la operación.

Aspectos a Destacar:

- **Estabilidad del Rendimiento:** La gráfica muestra que el rendimiento del sistema se mantiene estable a lo largo del tiempo. Esto indica que el sistema es eficiente y no presenta pérdidas significativas durante su operación.
- **Eficiencia Alta:** El rendimiento llega hasta el 98.67%, demostrando que la mayor parte de la energía de entrada se convierte en energía útil de salida, reflejando una alta eficiencia del convertidor.

Principio de Conmutación de los Convertidores

La figura 4.18 muestra las tensiones y corrientes en AC en ambos lados del transformador. Se puede observar que se cumple el principio de Zero Current Switching (ZCS), explicado al principio de la memoria.

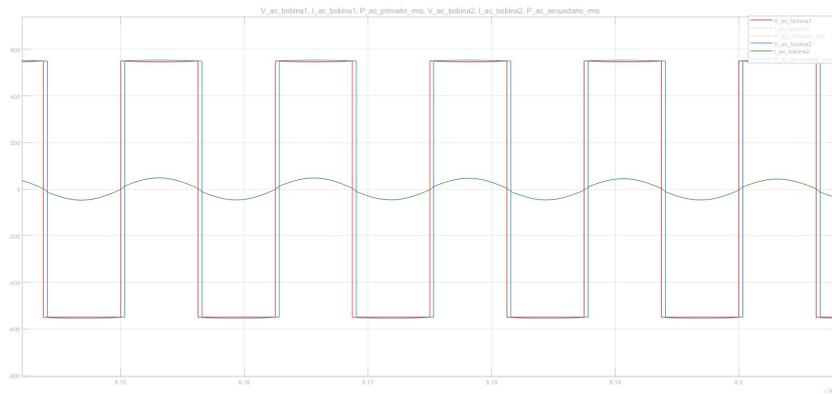


Figura 4.18 Tensión y corriente en AC en ambos lados del transformador. Unidades: Tensión (V), Corriente (A), tiempo (s).

Aspectos a Destacar:

- **Zero Current Switching (ZCS):** La gráfica muestra claramente cómo la corriente en AC pasa por cero antes de que se realice la conmutación de los interruptores. Esto minimiza las pérdidas de conmutación y reduce el estrés en los componentes, aumentando la vida útil del sistema.
- **Tensión en AC:** Las tensiones en AC en ambos lados del transformador se comportan de manera adecuada, siguiendo el patrón esperado de la conmutación resonante.
- **Desfase entre puentes:** Se puede observar el desfase que se produce entre ambos lados del transformador, lo que conlleva a un movimiento de la corriente desde el lado más adelantado hacia el menos adelantado.

En conclusión, los resultados obtenidos demuestran que el sistema de control implementado no solo mantiene la estabilidad y eficiencia del convertidor, sino que también asegura una conmutación suave y efectiva a través del principio de Zero Current Switching (ZCS). Estos resultados validan la robustez y eficiencia del diseño propuesto.

5 Puesta en Marcha y Tests

5.1 Equipamiento y Herramientas Utilizadas

En este apartado se detallan los equipos y herramientas utilizados para llevar a cabo los tests y validaciones del sistema de convertidores. En la figura 5.1 se muestra un esquema de la bancada utilizada para realizar dichos tests.

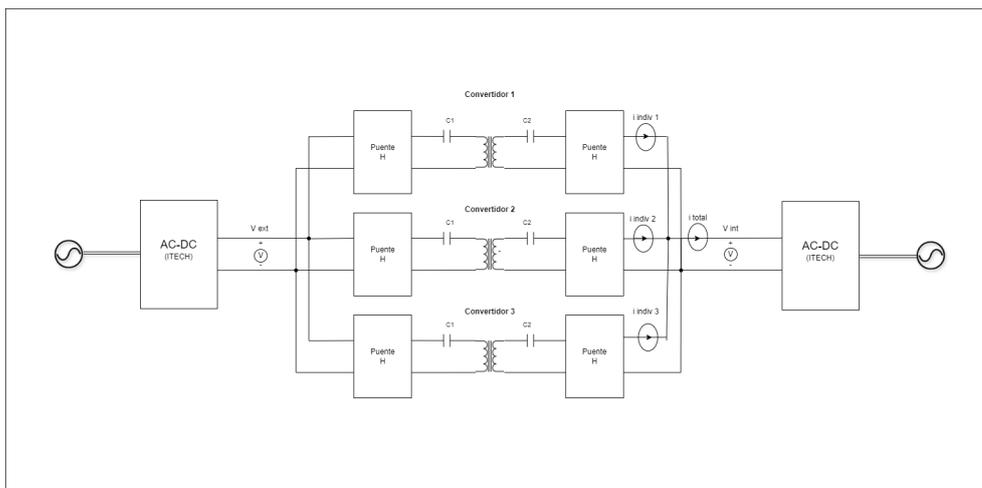


Figura 5.1 Bancada de prueba de los convertidores DC-DC resonantes.

A continuación se presenta una lista del equipamiento empleado:

- **Fuentes de alimentación ITECH:** Las fuentes de alimentación programables ITECH de la serie IT6000B son conocidas por su alta precisión, fiabilidad y capacidad para simular diversas condiciones de carga. Permiten el ajuste fino de tensión y corriente, lo que es esencial para pruebas detalladas y precisas en sistemas de conversión de energía.
 - **Modelo:** IT6018B
 - **Rango de Tensión:** 0 - 1500 V.
 - **Rango de Corriente:** -240 A a +240 A.

- **Rango de Potencia:** -108 kW a +108 kW.
- **Interfaz:** Dispone de interfaces de control remoto como USB, RS232, GPIB y Ethernet, facilitando su integración en entornos de prueba automatizados.



Figura 5.2 Fuentes de alimentación ITECH.

• **Osciloscopio Yokogawa:**

- **Frecuencia de Muestreo:** Alta frecuencia de muestreo de hasta 2.5 GS/s que permite la captura de detalles finos en las formas de onda.
- **Ancho de Banda:** Ancho de banda amplio de 500 MHz para cubrir una variedad de aplicaciones, desde señales de baja frecuencia hasta alta frecuencia.
- **Canales:** Múltiples canales de entrada (4 analógicos y 16 digitales).
- **Conectividad:** Opciones de conectividad como USB, Ethernet y GPIB para la transferencia de datos y el control remoto del osciloscopio.
- **Modelo:** DLM4058

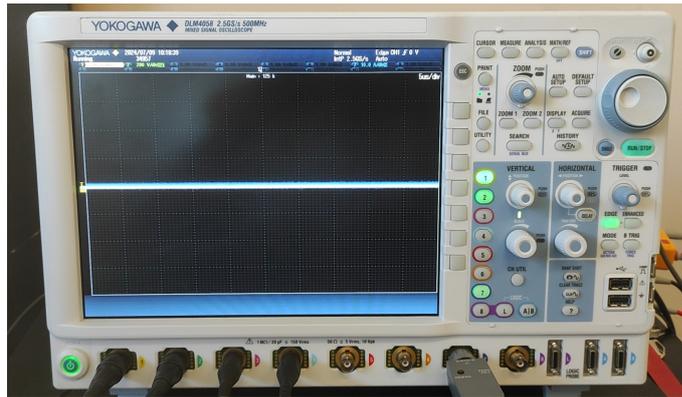


Figura 5.3 Osciloscopio Yokogawa.

- **Sondas de Tensión Cal Test:**

- **Modelo:** CT4079-NA
- **Rango de Medición:** Hasta 15 kV DC o 30 kV AC.
- **Ancho de Banda:** 50 MHz.
- **Ratio de Atenuación:** Seleccionable entre 200x y 2000x.



Figura 5.4 Sonda de Tensión Cal Test.

- **Sondas de Corriente Yokogawa:**

- **Modelo:** 701931
- **Rango de Medición:** Hasta 500 A.
- **Precisión:** Alta precisión con una salida de 0.01 V/A.



Figura 5.5 Sonda de Corriente Yokogawa.

5.2 Protocolo de Pruebas

El Protocolo de Pruebas está diseñado para validar el correcto funcionamiento y la capacidad de control del sistema de convertidores en diferentes modos de operación. A continuación, se detallan los test a realizar.

Test 1: Control de Tensión DC con Un Solo Convertidor

Descripción del Test:

En este test inicial, se utilizará un solo convertidor operando en modo control de tensión. La configuración será la siguiente:

- Tensión Fijada en el lado Externo: 550 V
- Carga en el Lado Interno del Convertidor: variamos desde 550 Ω a 75 Ω

El objetivo es que el convertidor controle y mantenga una tensión de 550 V en el lado interno del convertidor.

Test 2: Control de Corriente DC con Un Solo Convertidor

Descripción del Test:

El segundo test también se realizará con un solo convertidor, pero esta vez operando en modo control de corriente. La configuración será la siguiente:

- Tensión Fijada en el lado Externo: 550 V
- Tensión Fijada en el Lado Interno: 550 V
- Se variará la referencia de corriente para verificar que el convertidor pueda controlar adecuadamente la corriente de salida.

El objetivo es que el convertidor controle la corriente DC a la salida del convertidor (lado interno) que se solicita en un periodo corto de tiempo y manteniendo la estabilidad del sistema.

Test 3: Operación en Paralelo con Tres Convertidores

Descripción del Test:

El tercer y último test involucrará tres convertidores conectados en paralelo. En esta configuración:

- **Convertidor 1:** Operará en modo control de tensión, manteniendo 550 V en el lado interno del convertidor.
- **Convertidores 2 y 3:** Operarán en modo control de corriente, repartiendo equitativamente la referencia de corriente, la cual será un tercio de la medida por el sensor de corriente total por el bus DC del lado interno.

El objetivo es verificar la capacidad del sistema para distribuir la carga de corriente de manera equitativa, evitando así la recirculación y mantener la tensión deseada.

Se ha medido la señal PWM que controla los MOSFETs de cada puente del convertidor. En las siguientes

figuras se muestran las señales PWM de uno de los MOSFETs de cada puente, tanto con un desfase de 0° como con un desfase de 15° entre ellos. Como se puede observar en las figuras, el ciclo de trabajo (duty cycle) de las señales PWM es de 0.5.

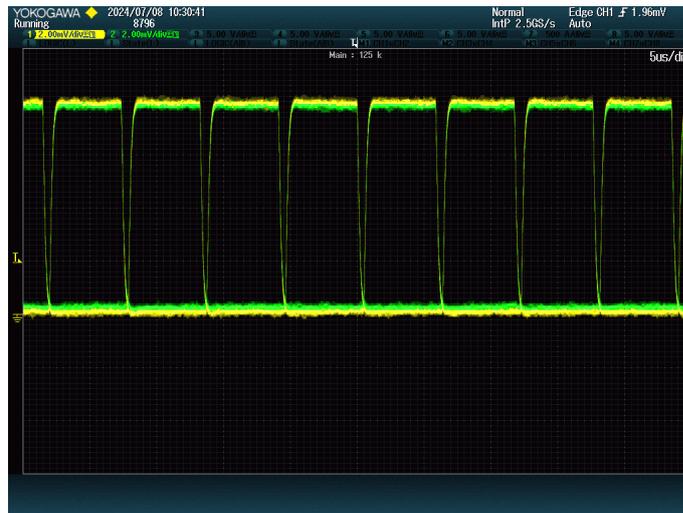


Figura 5.6 PWM en un MOSFET de cada puente con desfase de 0° .



Figura 5.7 PWM en un MOSFET de cada puente con desfase de 15° .

5.2.1 Test 1: Control de Tensión DC con Un Solo Convertidor

En este primer test, se ha implementado el control de tensión en un solo convertidor. El objetivo es comprobar la capacidad del sistema para mantener una tensión constante de 550 V en el lado interno del convertidor mientras se varía la carga en el lado interno. Se han utilizado los siguientes valores de carga:

- Carga: 550Ω → Corriente: 1 A
- Carga: 200Ω → Corriente: 2.77 A
- Carga: 100Ω → Corriente: 5.48 A
- Carga: 75Ω → Corriente: 7.32 A

- Carga: $550\ \Omega$ → Corriente: 1 A

Se han simulado perturbaciones con los cambios de carga (resistencia) para comprobar la estabilidad del sistema de control de tensión. Las imágenes de los equipos muestran el rendimiento del sistema en estos puntos de funcionamiento.



Figura 5.8 Gráfica de la respuesta de la corriente medida y la referencia durante las perturbaciones de carga.

En la figura 5.8, se observa la respuesta del sistema ante los cambios de carga. Los cambios en la corriente medida corresponden a las variaciones de carga aplicadas, y se puede ver cómo el sistema mantiene la tensión de referencia de 550 V. El Canal 1 pertenece a la tensión en el lado interno del convertidor (amarillo), el Canal 2 pertenece a la tensión en el lado externo (verde) y el Canal 7 pertenece a la corriente a la salida del convertidor (azul).

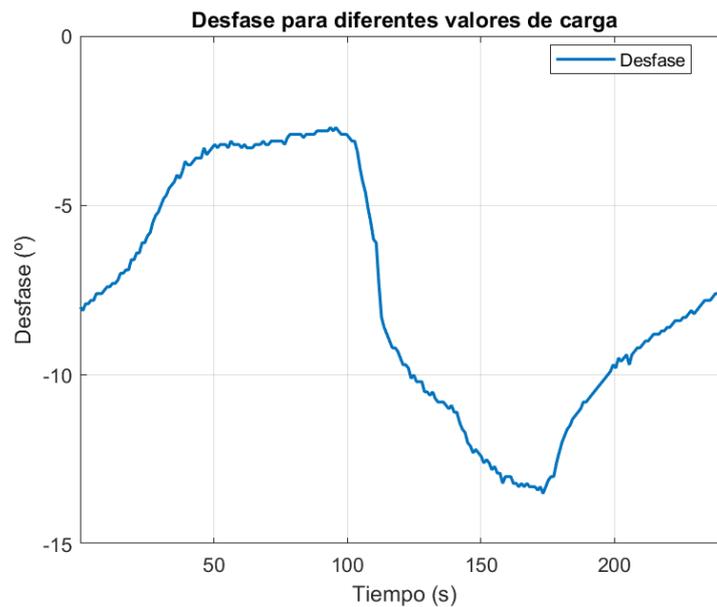


Figura 5.9 Desfase aplicado por el convertidor en función de las perturbaciones de carga.

La figura 5.9 muestra el desfase aplicado por el convertidor durante las variaciones de carga. Este desfase es esencial para el control de la tensión y se ajusta en función de las perturbaciones para mantener la estabilidad del sistema.



Figura 5.10 Mediciones en la fuente externa del convertidor.



Figura 5.11 Mediciones en la fuente interna del convertidor.

Las figuras 5.10 y 5.11 muestran las mediciones en las fuentes externas e internas del convertidor, respectivamente. En estas imágenes se puede observar tanto la tensión, la corriente y la potencia en cada convertidor, permitiendo evaluar el rendimiento del sistema en ese punto de funcionamiento. Se ha capturado la imagen para un valor de carga de 75Ω .

El rendimiento del sistema se puede evaluar mediante la relación entre la potencia de salida y la potencia de entrada. La ecuación para calcular el rendimiento (η) del sistema es la siguiente:

$$\eta = \left(\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \right) \times 100\% \quad (5.1)$$

Donde P_{out} es la potencia de salida medida en el lado interno del convertidor y P_{in} es la potencia de entrada medida en el lado externo del convertidor.

Durante el Test 1, las mediciones de tensión y corriente en ambos lados del convertidor nos permitieron calcular el rendimiento en diferentes puntos de funcionamiento. Para el caso de una carga de 75Ω , las potencias medidas fueron $P_{\text{in}} = 4.268 \text{ kW}$ en el lado externo y $P_{\text{out}} = 4.063 \text{ kW}$ en el lado interno. Por tanto:

$$\eta = \left(\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \right) \times 100\% = \left(\frac{4.063 \text{ kW}}{4.268 \text{ kW}} \right) \times 100\% = 95.1\% \quad (5.2)$$

En resumen, los resultados de este test demuestran que el convertidor es capaz de mantener una tensión constante de 550 V en el lado interno, incluso ante perturbaciones significativas en la carga. La capacidad del sistema para ajustar el desfase y mantener la estabilidad de la tensión indica un control de tensión robusto y eficiente.

5.2.2 Test 2: Control de Corriente DC con Un Solo Convertidor

En este test, como se ha comentado en el Protocolo de Pruebas, se utilizó un solo convertidor operando en modo control de corriente. Se fijaron tensiones de 550 V en ambos lados del convertidor y se variaron las referencias de corriente para comprobar la capacidad de control del sistema.

Durante este test, las referencias de corriente se enviaron al equipo utilizando el protocolo de comunicaciones Modbus TCP, asegurando una transferencia de datos precisa y efectiva para el control del sistema.

La figura 5.12 muestra la respuesta temporal de la corriente DC de salida del convertidor cuando se aplicaron diferentes referencias de corriente.



Figura 5.12 Respuesta temporal del control de corriente.

Para este test, se han realizado los siguientes cambios de referencia de corriente:

- La referencia inicial se estableció en -20 A.
- Luego, se incrementó en 10 A, alcanzando -10 A.
- Posteriormente, se incrementó en 20 A, alcanzando 10 A.
- Finalmente, se incrementó en 10 A, alcanzando 20 A.

Observaciones Clave:

- **Tiempo de Establecimiento:** El sistema tarda un tiempo relativamente corto en alcanzar cada nueva referencia, indicando una respuesta rápida.
- **Precisión:** La corriente de salida se mantiene muy cercana a la referencia, demostrando la precisión del controlador PI.
- **Oscilaciones:** Se observan pequeñas oscilaciones alrededor de las referencias, especialmente justo después de los cambios de referencia, pero están dentro de límites aceptables.

La figura 5.13 muestra la respuesta temporal del desfase aplicado por el convertidor en función de la corriente requerida.

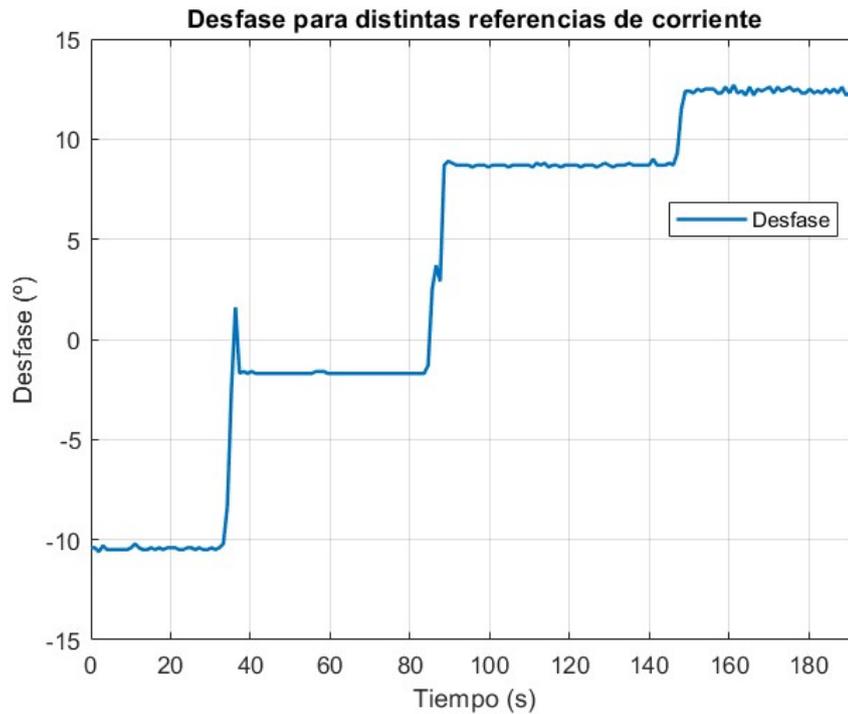


Figura 5.13 Respuesta temporal del desfase con control de corriente..

Observaciones sobre el Desfase:

- Para $I_{ref} = -20$ A, el desfase se establece en -10.4° .
- Para $I_{ref} = -10$ A, el desfase se establece en -1.7° .
- Para $I_{ref} = 10$ A, el desfase se establece en 8.7° .
- Para $I_{ref} = 20$ A, el desfase se establece en 12.4° .

Además, se tomaron fotografías de las fuentes conectadas en el lado externo e interno del convertidor a corriente y tensión nominal, mostrando los valores para evaluar el rendimiento del sistema.



Figura 5.14 Mediciones en la fuente interna del convertidor.



Figura 5.15 Mediciones en la fuente externa del convertidor.

Al igual que en el Test 1, volvemos a calcular el rendimiento del sistema para este punto de operación:

$$\eta = \left(\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \right) \times 100\% = \left(\frac{10.762\text{kW}}{11.060\text{kW}} \right) \times 100\% = 97.3\% \quad (5.3)$$

Podemos observar que para tensión y corriente nominal, el rendimiento del sistema es ligeramente superior que en las condiciones del primer test.

Los resultados del Test demuestran que el convertidor es capaz de seguir y mantener las referencias de corriente proporcionadas de manera precisa, ajustando el desfase en consecuencia. Las mediciones de potencia y corriente confirman que el sistema opera de manera eficiente y estable bajo las condiciones del test.

5.2.3 Test 3: Operación en Paralelo con Tres Convertidores

En este test se han conectado tres convertidores en paralelo, uno de ellos operando en modo control de tensión y los otros dos en modo control de corriente. El objetivo es verificar la capacidad del sistema para distribuir la carga de corriente de manera equitativa y mantener la tensión deseada.

Se han realizado varios cambios en la referencia de corriente para verificar la respuesta del sistema. Las referencias de corriente se aplican mediante variaciones en la carga conectada a la salida. Los valores que se han usado para el Test son:

- Carga de 35 Ω (15 A)
- Carga de 55 Ω (10 A)
- Carga de 110 Ω (5 A)
- Carga de 200 Ω (2.5 A)

Para esta prueba, se utilizó el sensor LF 310-S para medir el valor de corriente total inyectada en el lado interno del convertidor. Cada convertidor está equipado con un sensor individual LA 55-P, que mide la corriente suministrada por ese convertidor específico. La referencia de corriente para cada convertidor se estableció como un tercio de la corriente total del lado interno, con el fin de distribuir equitativamente la corriente entre los tres convertidores.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante el test.

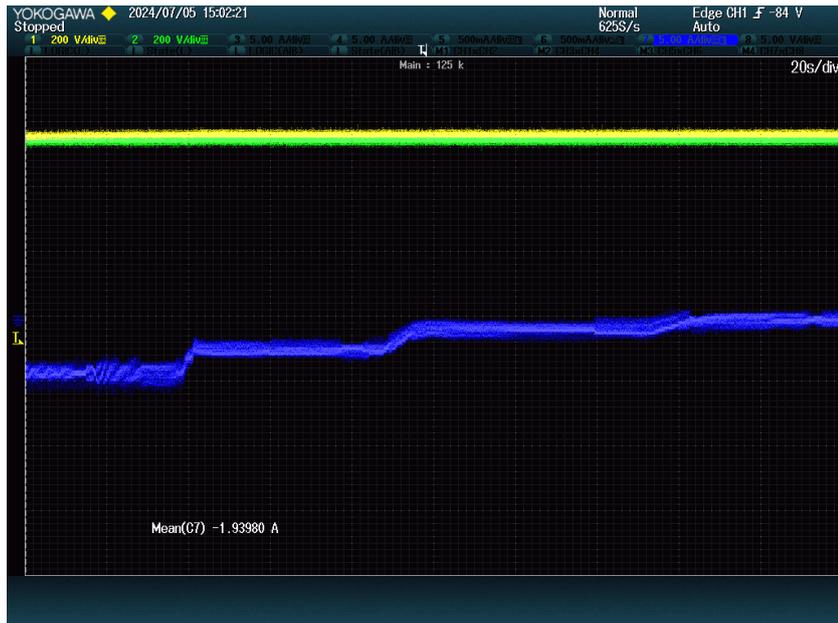


Figura 5.16 Tensión y corriente medidas en el equipo de control de corriente.

En esta imagen se han obtenidos los valores medidos de tensión en el lado externa del convertidor en el Canal 1 (señal verde), la tensión en ellado interno en el Canal 2 (señal amarilla) y la corriente DC del lado interno por uno de los tres convertidores en el Canal 7 (señal azul). Podemos observar como antes perturbaciones (cambio del valor de la carga) la tensión permanece constante y estable.

Para analizar el funcionamiento individual de cada equipo, se recogieron datos utilizando el protocolo de comunicación Modbus TCP (Modbus Poll). Esto permitió observar el comportamiento de cada convertidor.

Corriente Individual de Cada Equipo

Las Figuras 5.17, 5.18 y 5.19 muestran la corriente individual medida para cada uno de los equipos.

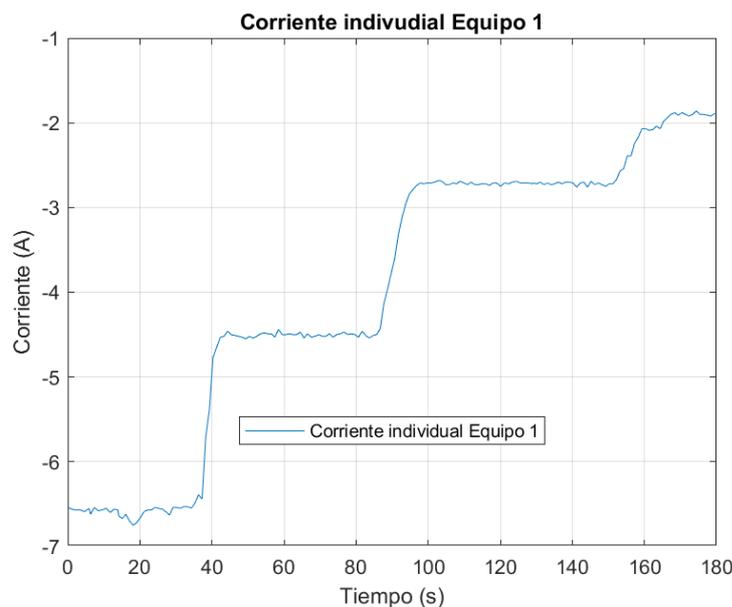


Figura 5.17 Corriente individual del Convertidor 1 (control de tensión).

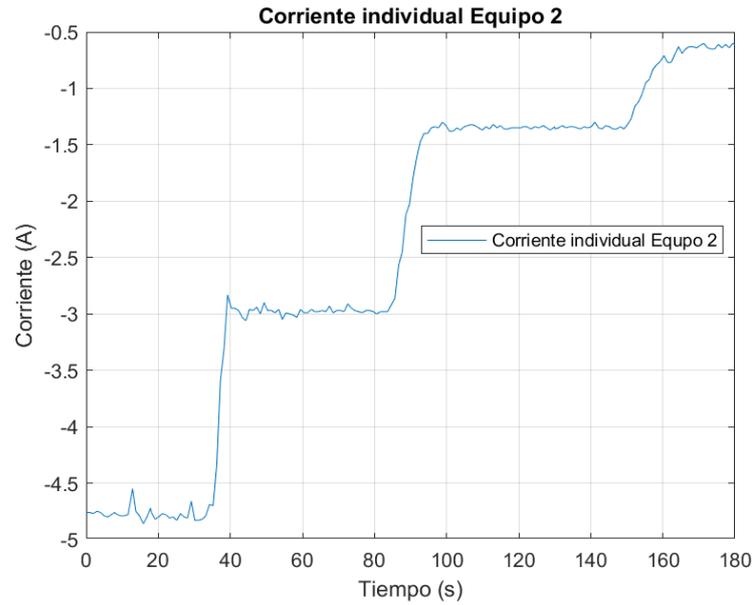


Figura 5.18 Corriente individual del Convertidor 2 (control de corriente).

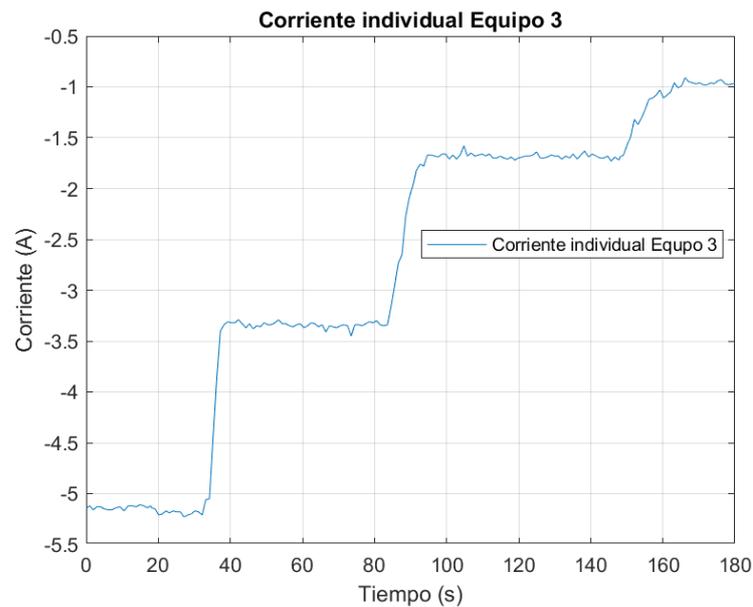


Figura 5.19 Corriente individual del Convertidor 3 (control de corriente).

Las gráficas muestran que cada convertidor ajusta su corriente de acuerdo con las referencias establecidas, aportando cada uno de ellos un tercio de la corriente medida en el sensor de corriente total en el lado interno del convertidor.

Desfase de Cada Equipo

Las Figuras 5.20, 5.21 y 5.22 muestran el desfase aplicado por cada uno de los convertidores durante el test.

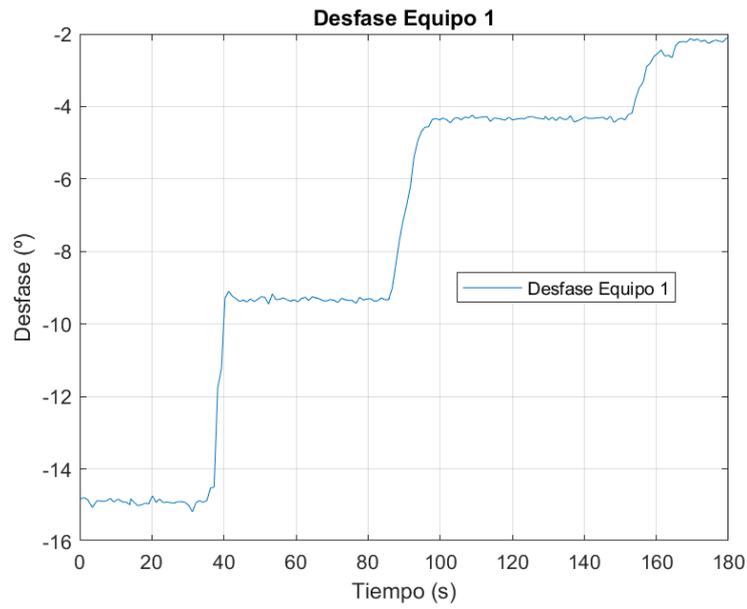


Figura 5.20 Desfase del Convertidor 1 (control de tensión).

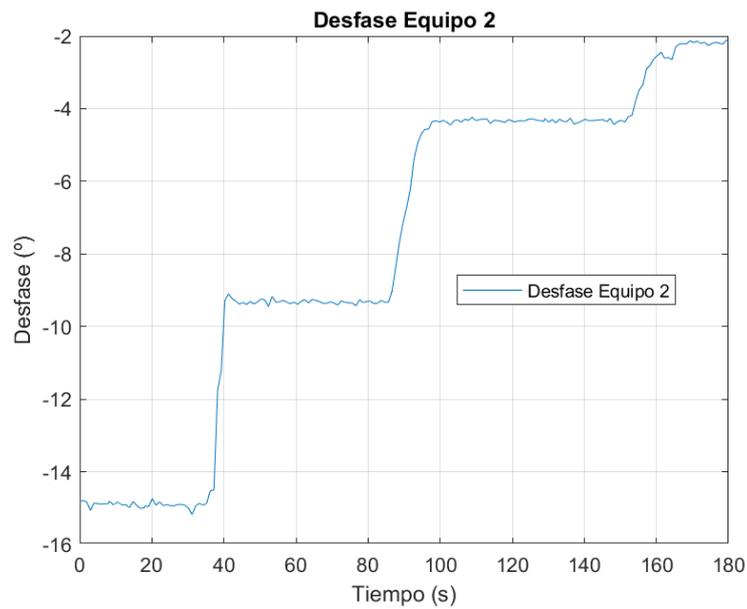


Figura 5.21 Desfase del Convertidor 2 (control de corriente).

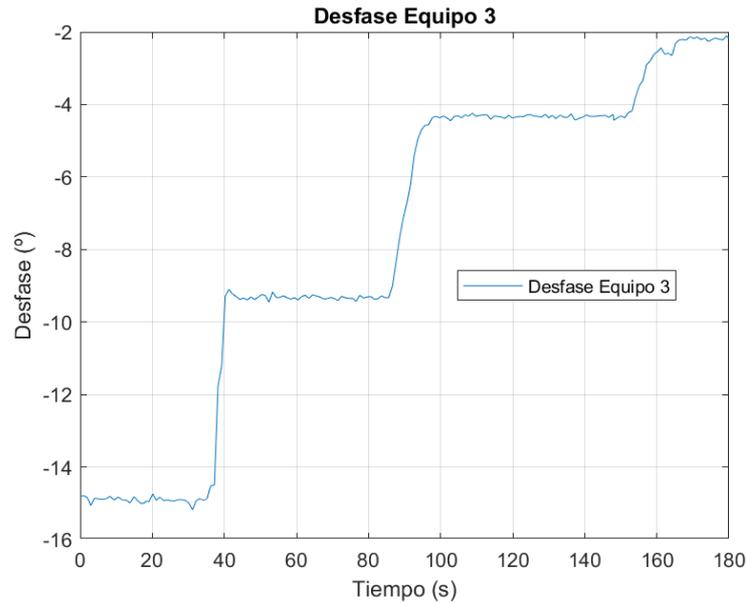


Figura 5.22 Desfase del Convertidor 3 (control de corriente).

En las gráficas de desfase, se puede observar cómo cada convertidor ajusta su desfase en respuesta a los cambios en la referencia de corriente, manteniendo la estabilidad del sistema.

Para verificar el reparto equitativo de la corriente, vamos a representar en una misma gráfica los datos sacados de corriente de cada convertidor individual y la corriente total aportada por los tres convertidores.

Corriente Individual y Total de los Equipos

En la Figura 5.23 se muestra la corriente medida para cada uno de los convertidores y la corriente total del sistema.

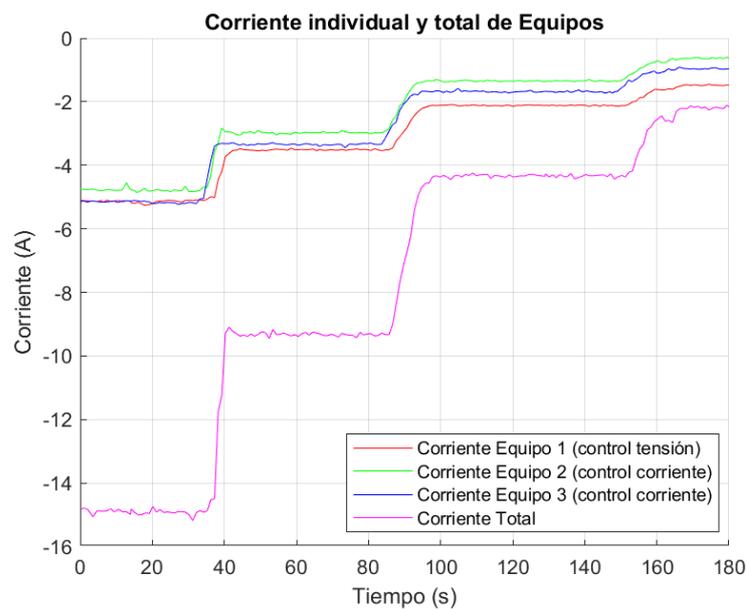


Figura 5.23 Corriente individual y total de los equipos.

Se observa como los tres convertidores están distribuyendo correctamente la potencia aportada. También se puede ver que a medida que nos acercamos a los valores nominales de corriente, el reparto es más equitativo. Podemos ver una ligera diferencia entre la suma de cada corriente individual con respecto a la corriente total. Esto se debe a un margen de error en la calibración de cada sensor, por lo que la suma nunca será exacta.

Conclusión

Los resultados del test demuestran la capacidad del sistema de control para operar de manera estable y eficiente en una configuración paralela de convertidores. Los convertidores ajustaron correctamente sus corrientes y desfases, manteniendo la tensión deseada y distribuyendo equitativamente la carga.

Tensiones AC a cada lado del Transformador y Corriente AC

Similar a la simulación, se han medido las tensiones AC en ambos lados del convertidor para asegurar que los valores se mantengan dentro de los rangos esperados. Además, se ha medido la corriente AC para verificar el cumplimiento del principio de conmutación sin corriente (ZCS). Este procedimiento es crucial para asegurar una conmutación eficiente y reducir las pérdidas en el sistema.

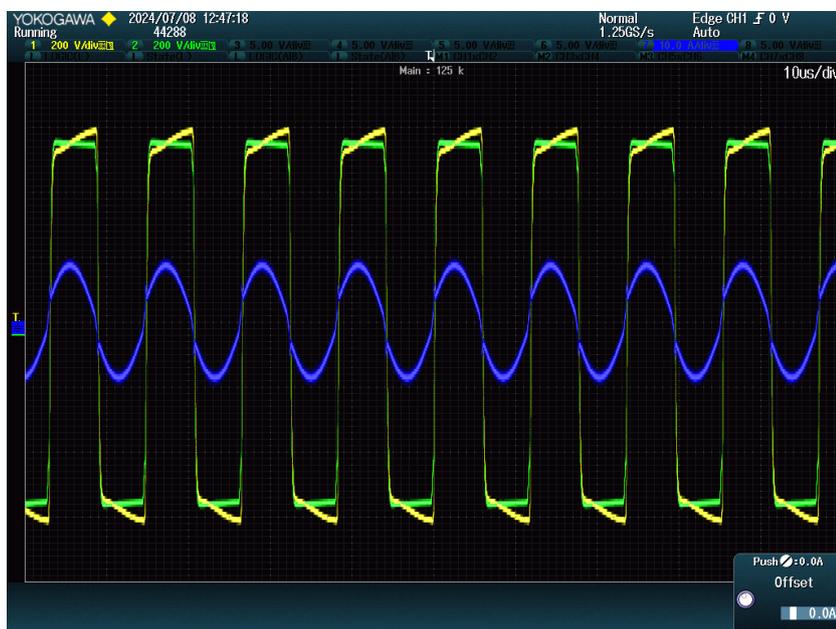


Figura 5.24 Tensiones AC a cada lado del convertidor y Corriente AC.

En la Figura 5.24 se puede observar cómo hemos logrado este funcionamiento, mostrando la correcta implementación del principio de ZCS y la estabilidad de las tensiones AC medidas.

5.3 Conclusión de los Resultados Obtenidos

A continuación, se presentan las conclusiones generales de los tres tests.

- **Estabilidad del Control de Tensión:** Tanto en el Test 1 como en el Test 3, el sistema de convertidores mostró una excelente capacidad para mantener una tensión constante de 550 V en el lado interno del convertidor, a pesar de las variaciones significativas en la carga. La respuesta del sistema fue rápida y precisa, ajustando el desfase necesario para mantener la estabilidad de la tensión.
- **Precisión en el Control de Corriente:** Tanto el Test 2 como el 3, demuestran que el convertidor es capaz de seguir y mantener referencias de corriente con precisión. Los cambios en la referencia de

corriente fueron seguidos de manera eficiente, con tiempos de establecimiento cortos y oscilaciones mínimas. Esto valida la efectividad del controlador PI implementado para el control de corriente.

- **Operación en Paralelo:** En el Test 3, se evaluó la capacidad del sistema para operar con tres convertidores conectados en paralelo. Los resultados mostraron que los convertidores distribuyeron la carga de corriente de manera equitativa, ajustando correctamente sus corrientes y desfases en respuesta a las variaciones de carga. La estabilidad del sistema se mantuvo, y la distribución de la corriente fue especialmente equitativa con valores cercanos a las corrientes nominales.
- **Rendimiento del Sistema:** Los Tests de rendimiento realizados en diferentes condiciones de operación indicaron eficiencias satisfactorias. En el Test 1, el rendimiento del sistema fue del 95.1 % para una carga de 75 Ω . En el Test 2, el rendimiento alcanzó el 97.3 % a corriente nominal. Estos resultados validan la eficiencia energética del sistema de convertidores.
- **Robustez y Fiabilidad:** En todos los tests, el sistema mostró ser robusto y fiable, respondiendo adecuadamente a las perturbaciones y manteniendo la estabilidad de las variables controladas. La capacidad del sistema para operar en diferentes modos de control y configuraciones sin comprometer la estabilidad o la precisión es un indicador de su fiabilidad para aplicaciones prácticas en sistemas de conversión de energía.

6 Conclusiones

Actualmente, los sistemas de microrredes DC están ganando una relevancia significativa debido a su capacidad para integrar fuentes de energía renovable y mejorar la eficiencia energética. Este trabajo ha presentado el desarrollo, simulación y prueba de un convertidor DC-DC DAB resonante para su posible implementación en una microrred DC. A continuación, se resumen las conclusiones obtenidas.

6.1 Conclusiones Generales del Proyecto

1. Diseño y Simulación del Convertidor:

- **Elección de la Topología:** Se seleccionó la topología de convertidor DC-DC Dual Active Bridge (DAB) resonante, destacando su alta eficiencia y capacidad para mantener la estabilidad de tensión y corriente bajo diferentes condiciones de carga.
- **Validación Mediante Simulaciones:** Las simulaciones realizadas confirmaron que el convertidor puede mantener una alta eficiencia energética (hasta un 98.67%) y estabilidad en la conmutación mediante el principio de Zero Current Switching (ZCS). Esto minimiza las pérdidas de conmutación y reduce el estrés en los componentes, aumentando la vida útil del sistema.

2. Control y Operación del Convertidor:

- **Control de Tensión:** Se demostró que el convertidor puede mantener una tensión constante de 550 V en el lado interno del convertidor a pesar de las variaciones significativas en la carga, gracias a la implementación efectiva del control de desfase.
- **Control de Corriente:** Las pruebas indicaron que el convertidor es capaz de seguir y mantener referencias de corriente con precisión, con tiempos de establecimiento cortos y oscilaciones mínimas. Esto valida la efectividad del controlador PI implementado.

3. Pruebas y Validación del Sistema:

- **Operación en Paralelo:** La capacidad del sistema para operar con tres convertidores conectados en paralelo fue evaluada y validada. Los convertidores distribuyeron la carga de corriente de manera equitativa, ajustando correctamente sus corrientes y desfases en respuesta a las variaciones de carga.
- **Rendimiento del Sistema:** En diversas condiciones de operación, el sistema mostró eficiencias satisfactorias, alcanzando hasta un 97.3% a corriente nominal. Estos resultados confirman la eficiencia energética del sistema de convertidores.

- **Robustez y Fiabilidad:** El sistema demostró ser robusto y fiable en todos los tests, respondiendo adecuadamente a las perturbaciones y manteniendo la estabilidad de las variables controladas. Esto indica que el sistema es adecuado para aplicaciones prácticas en sistemas de conversión de energía.

6.2 Aplicación del Convertidor en el Contexto de una Microrred DC

Los convertidores DC-DC DAB resonantes, como el desarrollado en este proyecto, presentan una amplia gama de aplicaciones en el contexto de microrredes DC debido a sus características de alta eficiencia, capacidad de control preciso y operación en paralelo. Algunas de las principales aplicaciones son:

- **Integración de Energías Renovables:** Los convertidores pueden ser utilizados para integrar fuentes de energía renovable, como paneles solares, a una microrred DC. La capacidad de mantener una tensión constante y de ajustar la corriente según las condiciones de generación hace que estos convertidores sean ideales para gestionar la variabilidad inherente de las fuentes renovables.
- **Sistemas de Almacenamiento de Energía:** También pueden ser aplicados para gestionar sistemas de almacenamiento de energía, como baterías y supercondensadores. Estos convertidores pueden controlar eficientemente la carga y descarga de los sistemas de almacenamiento, optimizando el uso de la energía almacenada y mejorando la estabilidad de la microrred.
- **Vehículos Eléctricos:** Pueden ser utilizados en la infraestructura de carga de vehículos eléctricos, proporcionando un control preciso de la tensión y la corriente durante el proceso de carga.
- **Distribución de Energía:** La capacidad de operar múltiples convertidores en paralelo, como se demostró en las pruebas, permite distribuir equitativamente la carga entre varios convertidores. Esto es útil en aplicaciones de distribución de energía dentro de edificios inteligentes, centros de datos y sistemas de telecomunicaciones, donde la demanda de energía puede variar significativamente.

6.3 Líneas Futuras de Investigación

A partir de los resultados obtenidos, se identifican varias líneas futuras de investigación que pueden contribuir a mejorar aún más el rendimiento y la aplicabilidad del convertidor en microrredes DC:

- **Optimización del Control:** Investigar y desarrollar algoritmos de control avanzados, como el control predictivo y el control adaptativo, que puedan mejorar la respuesta del sistema a cambios rápidos en la carga y las condiciones de operación.
- **Análisis de Fiabilidad:** Realizar estudios de fiabilidad y durabilidad del convertidor en condiciones de operación prolongadas y bajo diferentes escenarios de carga, para garantizar su robustez y longevidad en aplicaciones reales.
- **Reducción de Costos:** Investigar métodos para reducir los costos de fabricación y mantenimiento del convertidor, haciendo uso de componentes más económicos y técnicas de diseño eficientes.

Estas líneas de investigación pueden proporcionar mejoras significativas en el rendimiento, la eficiencia y la viabilidad económica de los convertidores DC-DC DAB resonantes en microrredes DC. Continuar explorando estas áreas contribuirá al avance de la tecnología de microrredes y al desarrollo de soluciones energéticas sostenibles y eficientes.

Bibliografía

- [1] Tze-Zhang Ang, Mohamed Salem, Mohamad Kamarol, Himadry Shekhar Das, Mohammad Alhuyi Nazari, and Natarajan Prabakaran, *A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions*, Energy Strategy Reviews **43** (2022).
- [2] Danilo Bregolin, Paolo Mattavelli, and Leonardo Rossetto, *An overview of zero-voltage-switching techniques for high-frequency isolated dc–dc converters*, IEEE Transactions on Power Electronics **32** (2016), no. 1, 764–779.
- [3] Robert W. Erickson and Dragan Maksimovic, *Fundamentals of power electronics*, Springer, 2017.
- [4] Jang Ho Hwang, Joo Won Baek, Jong Woo Lee, and Kwang Bum Lee, *A review of dual active bridge converter*, Journal of Power Electronics **15** (2015), no. 4, 886–896.
- [5] John G. Kassakian, Martin F. Schlecht, and George C. Verghese, *Principles of power electronics*, Addison-Wesley, 2010.
- [6] J. Lee, G. W. Moon, and D. W. Yoo, *A new phase-shifted full-bridge converter with voltage-doubler-type rectifier for high-efficiency pdp sustaining power module*, IEEE Transactions on Industrial Electronics **60** (2013), no. 11, 5033–5045.
- [7] Z. Li, X. Wang, and J. Sun, *Analysis and design of clc resonant converters for wireless power transfer*, IEEE Transactions on Power Electronics **31** (2016), no. 12, 8343–8352.
- [8] X. Liu, W. Chen, Y. Zhang, and L. Zheng, *A novel control strategy for high efficiency and wide load range of full-bridge clc resonant converter*, IEEE Transactions on Power Electronics **30** (2015), no. 9, 4858–4863.
- [9] Y. Liu, M. Han, and H. He, *A unified control strategy for interleaved parallel-operated dc-dc converters*, IEEE Transactions on Industrial Electronics **66** (2019), no. 8, 6138–6148.
- [10] W. Ma and F. L. Luo, *An innovative control strategy for parallel-connected dc/dc converters with improved efficiency and stability*, IEEE Transactions on Industrial Applications **48** (2012), no. 5, 1658–1667.
- [11] H. Wang, H. Zhang, and D. Xu, *Control strategy for three-phase four-leg converters in standalone ac supply systems*, IEEE Transactions on Industrial Electronics **61** (2014), no. 12, 6866–6876.
- [12] B. Wu, D. Yu, X. Qu, C. Mi, and X. Wang, *A new transformerless pv inverter topology suitable for leakage current reduction and partial power processing*, IEEE Transactions on Power Electronics **31** (2016), no. 9, 6552–6563.