

Universidad Técnica Federico Santa María
Departamento de Ingeniería Eléctrica



**Implementación de una Nueva Estrategia de Control de
Transferencia de Energía en un Sistema de Tres Puertos
con Incorporación de una Celda de Combustible**

Tesis presentada por

Alberto Nicolás Estay Huamanciza

Para optar al grado de

MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA ELÉCTRICA

y al título profesional de

INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

Director de tesis

PhD. Antonio Sánchez Squella

NOVIEMBRE DE 2024



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TESIS:

Implementación de una Nueva Estrategia de Control de Transferencia de Energía en un Sistema de Tres Puertos con Incorporación de una Celda de Combustible

CANDIDATO:

Alberto Nicolás Estay Huamanciza

DIRECTOR DE TESIS:

PhD. Antonio Sánchez Squella

TESIS, presentada como requisito parcial para optar al grado de MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA ELÉCTRICA y al título profesional de INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Santiago, Chile, Noviembre de 2024

Esta página se ha dejado en blanco intencionalmente.

Resumen

Este trabajo presenta una extensión del existente "Dynamic Energy Router" (DER) de dos puertos, aplicándolo a un sistema de tres puertos en el contexto de un vehículo eléctrico que integra una celda de combustible de hidrógeno y un supercapacitor. La estrategia de control implementada incluye la linearización por retroalimentación (FL) y el control predictivo basado en modelo (MPC), ambos diseñados para gestionar las dinámicas no lineales del sistema y la distribución eficiente de la energía entre los distintos puertos. Para facilitar las pruebas, tanto las simulaciones como los experimentos se realizan utilizando una batería para emular la celda de combustible de hidrógeno, limitando su operación para replicar las dinámicas de la celda real.

El control MPC se valida exclusivamente mediante simulación, mientras que el control FL se implementa en dos etapas: primero, se simula bajo el mismo perfil de carga utilizado en el MPC para comparar ambos controladores; luego, se simula y experimenta un perfil adicional adaptado a las restricciones del sistema experimental. Este método aborda los desafíos relacionados con la disminución de energía en el DER al permitir que un solo puerto controle la tensión del enlace DC mientras participa activamente en la gestión de energía definida por el DER.

Las simulaciones se realizaron en MATLAB/Simulink y se llevaron a cabo experimentos para probar el DER bajo diferentes variaciones de carga. Los resultados demuestran que el DER de tres puertos propuesto gestiona exitosamente la energía de manera dinámica en los distintos puertos del sistema, manteniendo al mismo tiempo la tensión del enlace DC constante y compensando así las pérdidas de energía.

Esta página se ha dejado en blanco intencionalmente.

Abstract

This work presents an extension of the existing two-port "Dynamic Energy Router" (DER), applying it to a three-port system in the context of an electric vehicle integrating a hydrogen fuel cell and a supercapacitor. The implemented control strategies include Feedback Linearization (FL) and Model Predictive Control (MPC), both designed to manage the nonlinear dynamics of the system and efficiently distribute energy among the multi-ports. For testing purposes, both simulations and experiments are conducted using a battery to emulate the hydrogen fuel cell, with its operation restricted to replicate the real cell's dynamics.

The MPC control is validated exclusively through simulation, while the FL control is implemented in two stages: first, it is simulated under the same load profile used for the MPC to compare both controllers; then, an additional profile is simulated and experimentally tested, tailored to the constraints of the experimental setup. This approach addresses the challenges of energy decay in the DER by allowing a single port to regulate the DC link voltage while actively participating in the energy management defined by the DER.

Simulations were performed in MATLAB/Simulink, and experiments were carried out to test the DER under various load variations. The results demonstrate that the proposed three-port DER dynamically manages energy across the system's ports, maintaining the DC link voltage constant while compensating for energy losses.

Esta página se ha dejado en blanco intencionalmente.

Para mi esposa, mi abuela y mis padres.

Esta página se ha dejado en blanco intencionalmente.

Agradecimientos

Mis más sinceros agradecimientos a mi profesor y director de tesis, Antonio Sánchez, por la confianza y el apoyo brindado durante el desarrollo de mi trabajo. Su disposición constante para ayudar a resolver los problemas que surgían en el camino fue clave para superar los desafíos de esta etapa. Su guía no solo me permitió avanzar en mi investigación, sino que también me inspiró a mantener un alto estándar profesional.

El trabajo de tesis se hizo mucho más ameno gracias a la compañía y la ayuda desinteresada de mis compañeros de laboratorio: Felipe Morales, Ricardo Flores, Andrés Nader, Cristian Jiménez, Ignacio Jara y Diego Castillo, quienes siempre estuvieron dispuestos a ofrecer su apoyo en momentos de dificultad. Su colaboración y compañerismo no solo facilitaron mi trabajo, sino que también hicieron de este proceso una experiencia más enriquecedora.

A lo largo de mi carrera, he contado con el invaluable apoyo y la amistad de Joaquín Penroz, quien estuvo siempre a mi lado para ayudarme a superar múltiples obstáculos académicos. Su lealtad como amigo y su optimismo para hacer las cosas me motivaron a seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles.

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi papá, mi mamá, mi abuela y Jorge Cobos, quienes han sido un pilar fundamental en mi desarrollo profesional desde los inicios. Su apoyo incondicional y su confianza en mí han sido el motor que me impulsó a llegar hasta aquí. A mi esposa, mi compañera durante todo mi proceso universitario, quiero agradecerle por su amor, paciencia y apoyo incondicional, que fueron esenciales para finalizar mis estudios. Su presencia ha sido una luz que me guió en los momentos más oscuros y una inspiración para no rendirme.

Finalmente, quiero dar mis más sinceros agradecimientos a todos los profesores que han sido parte de mi formación profesional. Sus enseñanzas y dedicación dejaron una huella imborrable en mi desarrollo como estudiante y como profesional.

Esta página se ha dejado en blanco intencionalmente.

Índice general

1	Fundamentos y Enfoque del Trabajo	1
1.1	Introducción	1
1.2	Hipótesis	5
1.3	Propósito de la Tesis	5
1.4	Objetivos	6
1.4.1	Principal	6
1.4.2	Específicos	6
1.5	Discusión Bibliográfica	7
1.6	Alcance del Trabajo	9
2	Caracterización del Sistema de 3 puertos	10
2.1	Implementación	13
3	Desarrollo del Dynamic Energy Router	16
3.1	DER en un sistema de 2 puertos	16
3.2	DER en un sistema de 3 puertos	19
3.3	Problema de Decaimiento de Energía	22
4	Estrategia de Control Predictivo Basado en el Modelo (MPC)	28
4.1	Desarrollo Matemático del Control MPC con Horizonte Uno	28
4.2	Simulación y Análisis del DER con Control MPC	32
5	Estrategia de Control de Linealización por Retroalimentación	39
5.1	Desarrollo Matemático del Control FL	39

5.2	Simulación del DER con Control FL	45
5.2.1	Comparación con el Control MPC	45
5.2.2	Simulación con un Perfil de Carga Real	47
5.3	Validación Experimental del Control FL	53
5.3.1	Experimentación con control FL	55
6	Conclusiones Generales	65

Índice de figuras

2.1	Sistema de 3 puertos utilizado con el DER.	10
2.2	Simplificación de carga en el sistema de 3 puertos.	12
2.3	Equipos utilizados en el sistema.	14
2.4	MicroAutoBox III.	15
2.5	Protección digital.	15
3.1	Puerto i con sus respectivas variables de tensión y corriente. ..	16
3.2	Esquema de interconexión para dos puertos.	18
3.3	Esquema de interconexión para 3 puertos.	20
4.1	Simulación de parámetros α_j ante impactos de carga con control MPC.	34
4.2	Simulación de potencia en los puertos ante distintos impactos de carga con control MPC.	35
4.3	Simulación de corrientes en los puertos ante distintos impactos de carga con control MPC.	36
4.4	Pérdidas del sistema con control MPC.	37
4.5	Simulación de la tensión del DC link mientras opera el DER ante impactos de carga con control MPC.	37
5.1	Simulación de potencia en los puertos ante impactos de carga con control FL.	46
5.2	Simulación de corrientes en todos los puertos del sistema ante impactos de carga con control FL.	47
5.3	Simulación de la tensión del DC link mientras opera el DER ante impactos de carga con control FL.	48
5.4	Simulación de parámetros α_j ante impactos de carga reales con control FL.	49
5.5	Simulación de potencia en los puertos ante impactos de carga reales con control FL.	50
5.6	Detalle de la simulación de potencia en los puertos ante impactos de carga reales con control FL.	51
5.7	Simulación de corrientes en todos los puertos del sistema ante impactos de carga reales con control FL.	52

5.8	Error de seguimiento de corriente para la simulación de distintos impactos de carga.	53
5.9	Simulación de tensiones en el sistema mientras opera el DER con impactos de carga.	54
5.10	Simulación de lógica de carga y descarga para el supercapacitor con el DER.	55
5.11	Tensión del dc link durante la partida.	56
5.12	Seguimiento de referencia de corriente del control PI durante la partida.	57
5.13	Generación del parámetro α_{jk} en el DER.	58
5.14	Potencia en cada puerto del sistema.	59
5.15	Detalle de la potencia en cada puerto del sistema para suplir peaks de demanda.	60
5.16	Corrientes de los 3 puertos del sistema ante las variaciones en la carga.	61
5.17	Error de seguimiento de referencia de corrientes de los 3 puertos del sistema ante las variaciones en la carga.	62
5.18	Tensiones de los 3 puertos del sistema ante variaciones en la carga.	63
5.19	Lógica de carga y descarga del supercapacitor con el DER. .	64

Índice de tablas

2.1	Parámetros del sistema.	11
2.2	Valores nominales del SC LS Mtron.	13
2.3	Parámetros de la carga Electrónica Chroma Serie 63803.	13
5.1	Parámetros de los controladores lineales para el FL.	45

Esta página se ha dejado en blanco intencionalmente.

Abreviaciones

DER Dynamic Energy Router es el dispositivo capaz de redireccionar los flujos de energía en un sistema multipuerto.

FC Celda de combustible de hidrógeno (fuel cell).

SC Supercapacitor del sistema de 3 puertos.

BAT Batería del sistema de 3 puertos.

FL Control no lineal por Linearización por Retroalimentación (Feedback Linearization).

AC Señal alterna.

DC Señal continua.

PI Control lineal con componente proporcional y componente integral.

Esta página se ha dejado en blanco intencionalmente.

Capítulo 1

Fundamentos y Enfoque del Trabajo

1.1 Introducción

La liberación de gases de efecto invernadero a la atmósfera desde la industrialización ha dado paso al conocido "Cambio Climático" y a la reciente declaración por parte de la ONU de que la Tierra ha entrado en "La Era de la Ebullición", afectando principalmente al aumento de la temperatura promedio del planeta. Actualmente, se tiene un incremento de al menos 1.1° Celsius, lo cual es grave teniendo en cuenta que fue suficiente una caída de entre 1 y 2° Celsius para llevar a la Tierra a una pequeña era de hielo [1]. Aquí radica la importancia del 'Acuerdo de París' para frenar el aumento de la temperatura promedio, por lo que es fundamental disminuir el consumo de combustibles fósiles. Parte esencial para alcanzar la meta ambiental radica en encontrar una tecnología viable económicamente y tecnológicamente que elimine la dependencia que tienen los vehículos de estos combustibles contaminantes. En este contexto, el hidrógeno verde juega un papel fundamental, principalmente porque produce básicamente cero emisiones al ser utilizado en pilas de combustible, es una fuente de energía renovable, se puede producir localmente y posee una densidad energética 3 veces mayor al combustible fósil tradicional. Además, este puede ser utilizado para combustión y en pilas de combustible (con almacenamiento en tanques adecuados) para producir energía eléctrica [2]. Por lo tanto, es un candidato ideal para reemplazar el combustible en vehículos, ya sea para ser utilizado en la combustión o como parte de un sistema eléctrico. Sin embargo, su masiva utilización requiere superar desafíos tales como los costos de producción y el desarrollo de nuevos sistemas logísticos para su almacenamiento y distribución.

En un tren de propulsión eléctrica, idealmente se requiere que la fuente de alimentación primaria tenga alta energía específica (kWh/kg), alta potencia específica (kW/kg), alta eficiencia, flujo de potencia bidireccional y con dinámicas rápidas para poder satisfacer las necesidades de un vehículo eléctrico en todas sus fases de operación. Sin embargo, no hay ninguna fuente de almacenamiento que sea capaz de satisfacer simultáneamente todas las necesidades de manera óptima. Las pilas de combustible, al utilizar hidrógeno, logran elevadas energías específicas cercanas a los 33 kWh/kg, pero se ven muy limitadas en la potencia específica y en las dinámicas que pueden ser capaces de soportar. Además, un detalle importante es que no permiten flujos de

energía bidireccionales [3], lo que es crucial en los vehículos eléctricos, teniendo en cuenta que siempre se busca un sistema eficiente. Por otro lado, se tienen las baterías, principalmente de ion litio, las cuales históricamente han tenido el problema de baja energía específica y elevados tiempos de carga. Actualmente, las baterías de ion litio utilizadas en vehículos completamente eléctricos han logrado energías específicas de 200 Wh/kg y potencias específicas de 500 W/kg [3], los cuales se pretenden incrementar con nuevas investigaciones en baterías de estado sólido o la incorporación de grafeno en su construcción. Sin embargo, aún con los nuevos esfuerzos tecnológicos, se encuentra lejos de lograr los 12 kWh/kg que posee el combustible fósil. De todas formas, un "city car" como el "Hyundai Ioniq 5" completamente eléctrico vendido en Chile tiene una autonomía de casi 500 km con una batería de polímero de litio, pero con un tiempo de carga de 1 hora a 50 kW de potencia [4]. Por otro lado, los supercapacitores tienen valores de energía específica muy bajos, pero logran potencias específicas elevadas cercanas a los 10 kW/kg [3], es decir, permiten corrientes de carga y descarga considerablemente mayores que las baterías convencionales. Sin embargo, no son utilizados como alimentación principal de vehículos eléctricos. Dada la alta energía específica del hidrógeno, es posible utilizar esta tecnología como fuente de alimentación principal. No obstante, es necesaria una fuente auxiliar de energía, como puede ser la batería o el supercondensador, que permitan sobrellevar la baja potencia específica y las lentas dinámicas de las pilas de combustible, además, de incorporar la capacidad de regenerar energía y devolverlo al sistema para incrementar la eficiencia.

Para poder sobrellevar el problema de transferencia de energía en un sistema multi-puerto se desarrolló el concepto de Power Router primeramente aplicado para el hogar [5] y actualmente aplicado a Smart Grids y sistemas multi-puertos en general como vehículos eléctricos u otros similares. En la literatura se pueden encontrar variadas topologías de Power router como el concepto de "Multi-port Energy Router" introducido por [6] donde los diferentes DC link actúan como un supernodo en una micro red o el concepto de "Power Router Grid" introducido por [7] donde un grupo de convertidores fuente de tensión son conectados a un DC link en común y actúan como puertos hacia un sistema externo en AC, lo que permite controlar las potencias activa y reactiva de cualquier puerto independientemente, otras topologías como aquellas que utilizan convertidores DC/DC conectados a un transformador con tres devanados [8] o aquellas que utilizan convertidores de potencia conectados a un bus DC en común [9], cuya topología será analizada en este trabajo. Este concepto de Power Router tiene su símil en energías ya que también es posible ver de forma análoga a las potencias, la transferencia de energía en un sistema multi-puerto. Sin embargo, para lograr un correcto manejo de múltiples fuentes de energía en el sistema, este Energy Router debe ir acompañado de una adecuada gestión de energía, la cual idealmente, debe ser simple y eficiente.

Varios trabajos como los mostrados en [11], [12] y [13] han propuesto diversas estrategias de gestión de energía en sistemas multipuerto. Dependiendo de su diseño y eficiencia, estas estrategias pueden mejorar el rendimiento en aplicaciones críticas, como en aviones propulsados por hidrógeno [14], ya que un sistema de gestión eficiente permite maximizar el uso de los distintos puertos del sistema y prolongar su vida útil,

sin embargo, ninguno de estos trabajos permite una gestión de energía mediante la asignación de flujos de potencia en cada puerto del sistema.

En términos simples, el Energy Router es un dispositivo capaz de redireccionar los flujos de energía a conveniencia dentro de un sistema multi-puerto [7], el cuál puede ser integrado con diferentes estrategias de gestión energética. La introducción de la nueva estrategia de control dinámica de energía en un sistema de dos puertos, denominada "Dynamic Energy Router" (DER), se presenta en [10]. La principal idea es abordar el problema de transferencia de energía mediante la generación de las referencias de tensión $v_i(t)$ o corriente $i_i(t)$ para los puertos mediante una transformación matricial no lineal en un sistema donde los puertos son capaces de almacenar, generar y/o consumir energía. Las implementaciones actuales del DER solo gestionan energía para sistemas de 2 puertos y no tienen estrategias efectivas para gestionar las pérdidas inevitables de los sistemas reales.

El concepto del DER surge como una solución innovadora para abordar los desafíos de transferir y redireccionar los flujos de energía en un sistema multipuerto de forma simple, flexible y dinámica ajustándose a las necesidades específicas de generación, almacenamiento y consumo de energía eléctrica en los distintos puertos del sistema. Puede ser utilizado en sistemas con distintas fuentes de energía tomando en consideración cada una de las limitaciones que puedan existir para prolongar la vida útil de los distintos dispositivos o efectuar una transferencia de energía eficiente. El DER permite un esquema de asignación de potencia en cada puerto, a través de una transformación matricial, permitiendo al usuario definir como los flujos de potencia son distribuidos dentro del sistema multipuerto de forma mucho más flexible que al utilizar otros esquemas de gestión energética, como puede ocurrir con las estrategias más comunes, como suponer estado estacionario con controles PI. En la implementación de una gestión de transferencia de energía entre multipuertos, es común suponer que el sistema opera en estado estacionario. Luego, la demanda de potencia (tanto en sentido como en magnitud del flujo) de los multipuertos se traduce en referencias de corriente o voltaje. Estas referencias son seguidas por controladores lineales, generalmente proporcionales más integrales (PI). Dado que los multipuertos tienen diferentes tiempos de respuesta, es necesario distinguir entre perfiles de demanda de potencia que cambian rápidamente y aquellos que cambian lentamente. Por ejemplo, debido a restricciones físicas, no se recomienda exigir perfiles de potencia que cambien rápidamente a una unidad de celdas de combustible. Por lo tanto, las demandas pico de la carga suelen ser suministradas por un conjunto de supercondensadores, cuya respuesta temporal es rápida. A pesar de adoptar nuevamente un enfoque de estado estacionario y filtrar las referencias de corriente o voltaje mediante filtros pasa bajos o pasa altos, durante transitorios o cuando se requiere una respuesta dinámica rápida, la respuesta de las transferencias de energía entre los puertos debido al seguimiento de corrientes y/o tensiones, y la acción de respuesta temporal de los filtros, puede estar lejos de ser satisfactoria.

Este trabajo aborda una gestión de transferencia eficiente de energía eléctrica en un sistema y desarrolla el fundamento para el DER de tres puertos compuestos por una celda de combustible de hidrógeno, un supercapacitor y una carga variable, donde cada uno de

los puertos tiene la capacidad de generar, almacenar o consumir energía. La propuesta se implementa con distintas estrategias de control no lineal para el seguimiento de las referencias de corriente como el control "MPC" y el control "Feedback Linearization" (FL) que permiten la correcta implementación del DER para la gestión de energía. En vehículos propulsados con hidrógeno, el DER ayuda a mejorar la eficiencia y la vida útil de las celdas de combustible ya que la potencia de este puerto puede ser controlada para operar en puntos óptimos y limitada para no estresar eléctricamente el dispositivo ante las variaciones de la carga. Dependiendo del modo de operación, es necesario realizar transferencias de energía entre las diversas unidades, denominadas como multipuertos, siguiendo ciertas políticas de gestión energética. Para asegurar el intercambio de energía, la conexión entre los dispositivos de almacenamiento y carga se realiza mediante convertidores de potencia. Esta es una solución integral para la gestión de energía dinámica y eficiente en sistemas con más de dos puertos, es decir, permite una integración flexible en sistemas reales.

La tesis se organiza en seis capítulos, secciones y subsecciones que abordarán las distintas temáticas de la tesis de la siguiente manera:

- **Fundamentos y Enfoque de la Tesis:** Este capítulo introduce los conceptos fundamentales necesarios para comprender el desarrollo del trabajo. Se aborda la motivación y el propósito de la tesis, los objetivos propuestos, y se presenta una discusión bibliográfica que destaca los avances más relevantes en el manejo de energía en sistemas multipuerto. Además, se detalla la hipótesis planteada y se define el alcance del trabajo, estableciendo las bases para las estrategias de control utilizadas.
- **Caracterización del Sistema de Tres Puertos:** En este capítulo se describe en detalle el sistema físico y teórico utilizado para implementar el DER. Se presentan las características principales de cada puerto (batería, supercapacitor y carga variable), así como la configuración de los convertidores asociados. Además, se explican las simplificaciones realizadas tanto en las simulaciones como en los experimentos y se discuten las consideraciones necesarias para evitar problemas operativos durante la experimentación.
- **Desarrollo del Dynamic Energy Router:** Este capítulo desarrolla en detalle el concepto y la implementación del DER aplicado a un sistema de tres puertos. Se explica cómo se generan las referencias de corriente y potencia para cada puerto mediante una política de gestión energética basada en parámetros α_{jk} , diseñados para gestionar dinámicamente los flujos de energía. Además, se discuten los fundamentos teóricos que sustentan el funcionamiento del DER y su capacidad de adaptación en distintos sistemas multipuerto.
- **Estrategia de Control Predictivo Basado en el Modelo (MPC):** Este capítulo se centra en el desarrollo matemático del control MPC para el seguimiento de referencias de corriente en todos los puertos. Se detalla la función de costo multi-objetivo y las restricciones utilizadas, además de describir la implementación del

control mediante simulaciones. Finalmente, se analizan los resultados obtenidos con el control MPC en conjunto con el DER bajo un perfil de carga que incluye regeneración y consumos escalonados.

- Estrategia de Control de Linealización por Retroalimentación (FL): En este capítulo se presenta el desarrollo del control FL, diseñado para regular tanto la corriente de los puertos como la tensión del DC link. Se incluyen dos simulaciones: una con el mismo perfil de carga utilizado para comparar con el MPC, y otra orientada a validar experimentalmente el DER bajo un perfil de carga diferente. Además, se discuten los resultados de los experimentos realizados y se analiza el desempeño del control FL en la gestión dinámica de energía en el sistema de tres puertos.
- Conclusiones Generales: Finalmente, este capítulo resume los principales hallazgos y aportes de la tesis, destacando la validación del DER en un sistema de tres puertos y su potencial para aplicaciones futuras en sistemas multipuerto. Además, se proponen ideas para continuar este trabajo, incluyendo la implementación en vehículos eléctricos con ciclos de trabajo reales.

1.2 Hipótesis

- Hipótesis 1: Es posible diseñar e implementar un DER con una gestión de transferencia de energía dinámica para tres puertos, incluyendo una celda de combustible de hidrógeno, un supercapacitor y una carga variable con un buen desempeño transitorio.
- Hipótesis 2: Es posible implementar un DER multipuerto con compensación de pérdidas para evitar el problema del decaimiento de energía.

1.3 Propósito de la Tesis

El propósito de esta tesis es desarrollar e implementar una estrategia de control dinámico de energía para sistemas multipuerto alimentados por celdas de combustible, supercapacitores y cargas variables. Se busca extender la eficacia del "Dynamic Energy Router" (DER) a sistemas de tres puertos, incorporando una compensación de pérdidas y entregando la herramienta que facilita el ruteo de energía en un sistema con múltiples puertos para que pueda ser utilizado en distintas aplicaciones. La investigación se centra en la formulación matemática y la implementación experimental de la estrategia, con el objetivo de lograr una gestión dinámica óptima de los flujos de energía en el sistema. Se busca proporcionar una solución viable y robusta para la transferencia de energía en entornos prácticos, con énfasis en la adaptabilidad del DER a sistemas complejos y su capacidad para compensar pérdidas energéticas de manera efectiva. El desarrollo de esta estrategia de control dinámico tiene implicaciones significativas para la eficiencia y la sostenibilidad de los sistemas de energía eléctrica, especialmente en aplicaciones que

involucran, por ejemplo, celdas de combustible y múltiples fuentes de almacenamiento de energía en un sistema.

1.4 Objetivos

En el desarrollo de este trabajo, se logró el objetivo principal y 5 objetivos específicos:

1.4.1 Principal

- Aplicar y posteriormente implementar la nueva estrategia de control de transferencia de energía (DER) en un tren de propulsión de tres puertos, considerando una celda de combustible, un supercapacitor y una carga variable (carga electrónica que simula la corriente demandada por un convertidor DC/AC alimentando un motor de tracción).

1.4.2 Específicos

- Revisar el estado del arte y hacer una discusión bibliográfica sobre las estrategias actuales de transferencia de energía en un sistema multipuerto.
- Integrar el DER en conjunto con un control predictivo para el seguimiento de las referencias de corriente.
- Integrar el DER en conjunto con un control tipo "Feedback Linearization" para el seguimiento de las referencias de corriente.
- Identificar las diferentes condiciones de operación del sistema a trabajar, es decir, las posibles direcciones que pueden tener los flujos de potencia en el sistema.
- Modelar la pila de combustible, el supercapacitor, la carga variable y los convertidores estáticos con la finalidad de poder trabajar sus respectivas dinámicas.
- Aplicar restricciones a los flujos de energía, acorde a las limitaciones físicas de los almacenamientos presentes en el sistema (pila de combustible, supercapacitor y carga), principalmente para mantener una operación segura y confiable.

Es importante destacar que el objetivo principal de este trabajo era implementar el DER en la simulación de lo que sería vehículo con celdas de hidrógeno, por lo tanto, uno de los puertos debería corresponder a la celda de combustible, sin embargo, por temas de tiempo y recursos se utiliza una batería en su remplazo, la cual se limita operacionalmente para replicar las dinámicas de la celda de combustible de hidrógeno. Lo importante es que se puede validar el concepto propuesto sin comprometer la esencia del objetivo inicialmente planteado.

1.5 Discusión Bibliográfica

En el trabajo [15] se propone una arquitectura para un "Household Energy Router" (HER) que consta de varios componentes: una unidad de generación distribuida (PV), un sistema de almacenamiento híbrido de energía (ultracapacitor y batería), cargas y la red, todos conectados con sus respectivos convertidores de potencia. La unidad de generación distribuida y el sistema de almacenamiento híbrido se conectan a un bus DC de 360 V, mientras que las cargas y la red se conectan a una barra AC de 220 V. Ambas barras están conectadas a través de un convertidor DC/AC bidireccional. La estrategia de control de energía se desarrolla para el lado DC del sistema y se centra en la gestión del desequilibrio entre la carga y la generación PV. Esta estrategia implica establecer límites de tensión ($V_{bus-min}$ y $V_{bus-max}$) para el bus DC y límites de estado de carga ($V_{SOC-min}$ y $V_{SOC-max}$) para los sistemas de almacenamiento. Cuando la demanda supera la generación, la tensión del bus DC disminuye hasta alcanzar $V_{bus-min}$. En este punto, los sistemas de almacenamiento se descargan para compensar la falta de energía. Si la tensión del almacenamiento cae por debajo de $V_{SOC-min}$, entonces se recurre a la red para obtener la energía necesaria. Del mismo modo, cuando la demanda es menor que la generación PV, la tensión del bus DC aumenta por encima de $V_{bus-max}$. En este caso, los sistemas de almacenamiento absorben el exceso de energía hasta que su tensión alcance $V_{SOC-max}$, momento en el cual el excedente se entrega a la red. Para implementar esta estrategia, se asume que la generación PV ofrece su máxima potencia disponible en cada momento. Por lo tanto, el control se centra en los sistemas de almacenamiento (batería y ultracapacitor) mediante controles lineales PI anidados, que incluyen un control interno de corriente y un control externo de la tensión del bus DC. Dado que el ultracapacitor tiene una alta densidad de potencia, se utiliza para manejar variaciones de energía de alta frecuencia, mientras que la batería, con alta densidad de energía, se utiliza para variaciones de baja frecuencia. Por lo tanto, en el control lineal se incorpora un filtro pasa-bajos y un limitador de rampa para diferenciar la respuesta dinámica entre ambos sistemas de almacenamiento.

En [16] se presenta la configuración de un Energy Hub (múltiples fuentes de energía y cargas) que incorpora un Energy Router con 4 puertos que permite transferencia de energía entre cargas (DC y AC), la red y las fuentes de energía renovable. La gestión de energía en el Energy Hub y en el Energy Router es en base a una Optimización de Lyapunov que busca minimizar el costo de operación considerando las restricciones de las ecuaciones de balance de energía, los dispositivos de almacenamiento de energía, cargas flexibles y otras restricciones de operación, lo que entrega como resultado la asignación de energía en cada puerto.

En lo que respecta a vehículos eléctricos, el trabajo [17] implementa una gestión de energía basada en el modelo que implementa un Energy Router de tres puertos con una celda de combustible de hidrógeno, una batería y el motor del vehículo como carga. La estrategia de gestión de energía consiste en tener la batería como fuente principal de energía y la celda de combustible para suplir la potencia instantánea demandada por la carga, luego distingue entre tres modos de operación (tracción, freno y detención) los

cuales dependen del flujo de potencia de la carga. La batería alimenta el vehículo en el modo detención y, por el contrario, se carga en los modos de frenado y tracción. El control del DC link se hace mediante un DTC en el convertidor DC/AC que conecta a la carga, mientras que los flujos de energía del sistema son controlados por esta estrategia de control de tres estados que controlan tres interruptores (k_1 , k_2 y k_3) que se encienden y apagan dependiendo del modo de operación en el cual se encuentre. Este trabajo integra una estrategia de gestión simple y que no asigna a gusto la energía en cada puerto, sino que solo permite modificar los sentidos de los flujos.

El trabajo [18] presenta un sistema de gestión de energía basado en "Fuzzy Logic" (FLC) para un sistema de tres puertos con celda de combustible de hidrógeno como fuente de alimentación principal, supercapacitor y batería como fuente de almacenamiento de energía y finalmente una carga variable. La idea es que la batería ayude a la celda de combustible cuando la carga sea muy alta, mientras que el supercapacitor trabaje en las variaciones rápidas de carga. El FLC tiene como entradas el SOC de la batería y la potencia instantánea de la carga, mientras que solo tiene como salida la referencia de potencia de la celda de combustible. Las referencias de potencia de la batería y el supercapacitor se generan con un esquema de control simple en base a la ecuación de balance de potencia, al SOC de la batería y a la tensión del supercapacitor, las cuales permiten mantener los niveles de carga de ambos almacenamientos en un nivel óptimo. La estrategia de control con Lógica Difusa también se presenta en el trabajo [19] aplicada a un powertrain con celda de combustible y batería de litio tomando en consideración las variables de SOC, eficiencia de la celda de combustible y la potencia demandada del vehículo, además, se presenta otra estrategia denominada control por seguimiento de potencia, el cual es un control basado en reglas.

En [13] se presenta una estrategia de control de energía para vehículos con celda de combustible basada en Machine Learning que combina los algoritmos de Support Vector Machine, Naive Bayes y K-nearest neighbor con el propósito de mejorar el rendimiento, eficiencia y operación en general de la celda de combustible optimizando el flujo entre la celda y los sistemas de almacenamiento de energía. Los algoritmos son utilizados para estimar el flujo de potencia óptimo basados en entradas como la velocidad del vehículo, SOC y otros parámetros importantes. Utilizando conjuntamente estos tres algoritmos se desarrolló un mejor rendimiento de gestión energética en el sistema.

En términos simples y de forma general, un Energy Router no es más que un dispositivo capaz de redireccionar los flujos de energía a gusto, dentro de un sistema multipuerto [7], el cual puede ir incorporado con diferentes estrategias de gestión de energía. Con esto, se tienen dos alternativas que permiten al DER compensar las pérdidas para un sistema de dos puertos. En este trabajo, se buscará aplicar y validar experimentalmente el DER a un sistema de tres puertos con celda de combustible, supercondensador y una carga variable. Se tendrán en cuenta las respectivas dinámicas de cada puerto y se buscará explorar la implementación del control MPC y del control FL en conjunto con esta estrategia de control dinámica.

1.6 Alcance del Trabajo

Este trabajo busca validar la aplicabilidad del Dynamic Energy Router (DER) en un sistema de tres puertos compuesto por una celda de combustible de hidrógeno, un supercapacitor y una carga variable. Sin embargo, debido a limitaciones de tiempo y a problemas técnicos con la celda de combustible durante el periodo de experimentación, se decidió utilizar una batería configurada para emular su comportamiento dinámico. Esta batería fue configurada para replicar las dinámicas características de una celda de combustible de hidrógeno, lo que permite validar el concepto del DER en el sistema multipuerto en condiciones representativas.

En la simulación, se optó por utilizar una fuente de tensión constante como la representación más simple de la celda de combustible de hidrógeno. Esta aproximación se justifica porque, en la experimentación, se emula la celda de combustible con una batería real controlada de forma que reproduce sus restricciones dinámicas principales, como la respuesta lenta ante variaciones de carga y la incapacidad de consumir energía desde el sistema. Por lo tanto, utilizar una fuente de tensión en simulación permite mantener la coherencia entre el modelo teórico y la implementación experimental. Se debe tener en consideración que no se emula la curva característica completa de tensión versus corriente propia de las celdas de hidrógeno, ya que dicha implementación es técnicamente compleja de replicar con una batería convencional.

Por otro lado, no se aborda la demanda de un vehículo eléctrico real en el contexto de ciclos de conducción específicos. En su lugar, se analiza la capacidad del sistema para adaptarse y satisfacer la demanda de la carga mediante escalones de potencia. Este enfoque simplifica tanto la simulación como la experimentación, sin desviar el foco del trabajo, que es verificar cómo el DER gestiona la energía de manera eficiente. Eventualmente, este sistema podría extenderse para su implementación en escenarios más complejos, como los ciclos de trabajo de un vehículo eléctrico en operación diaria.

Para el control MPC solo se validará mediante simulación ya que requiere un puerto extra con otro convertidor boost para regular la tensión del DC link, sin embargo, se hubiera requerido más tiempo para instalar y operar ese convertidor extra. Para evaluar su desempeño en el DER se simulará también con control FL con un perfil de demanda en la carga que contiene regeneración de energía al sistema y consumos de forma escalonada.

Por otro lado, se buscará validar el DER con control FL mediante simulación y experimentación, ya que este esquema no requiere un puerto extra para regular las pérdidas del sistema. En este caso, se hará una simulación tal cual como ocurre en la experimentación, por lo tanto, el perfil de demanda no tiene regeneración ya que la carga utilizada corresponde a una carga electrónica que no tiene capacidad de inyectar energía al sistema, solo es capaz de consumir energía.

Esta página se ha dejado en blanco intencionalmente.

Capítulo 2

Caracterización del Sistema de 3 puertos

El DER es incorporado en un sistema de tres puertos como se muestra en la Fig. 2.1, la cual contiene una batería, un supercapacitor y una carga variable que simula el motor de un vehículo eléctrico. En la tabla 2.1 se presentan los parámetros principales del sistema de tres puertos. Este esquema corresponde al sistema que será utilizado en la etapa de experimentación, razón por la cual en la figura se representa explícitamente una batería en el puerto correspondiente y todas las variables asociadas a dicho puerto hacen referencia a la batería, ya que ese es el dispositivo físico que se empleará realmente. No obstante, es importante aclarar que dicha batería ha sido configurada para emular el comportamiento dinámico de una celda de combustible de hidrógeno, replicando dos de sus principales características: su respuesta lenta ante variaciones de carga y su incapacidad de consumir energía desde el sistema (es decir, su operación estrictamente en modo fuente).

Los puertos del SC y de la batería se conectan al DC link a través de un convertidor boost, el cual facilita la transferencia de energía entre los puertos y el sistema. El

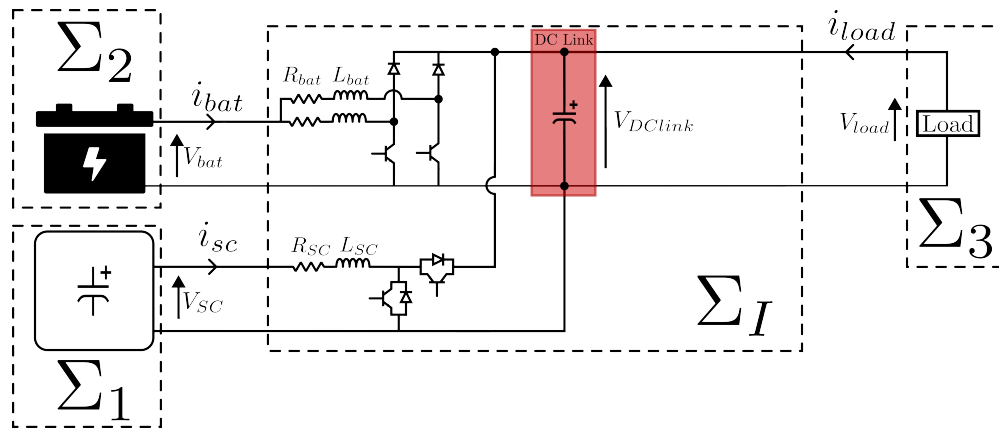


Figura 2.1: Sistema de 3 puertos utilizado con el DER.

Tabla 2.1: Parámetros del sistema.

<i>Parámetros</i>	<i>Valor</i>
L_{sc}	$200 \mu H$
R_{sc}	$100 m\Omega$
C_{sc}	$62.5 F$
L_{bat}	$300 \mu H$
R_{bat}	$0.1 m\Omega$
R_{load}	10000Ω
C_{DCLink}	$8800 \mu F$

SC se conecta con un boost bidireccional y el puerto BAT se conecta con dos boost unidireccionales interleaved ya que se supone que este puerto no puede almacenar energía eléctrica al ser la emulación de una celda de combustible de hidrógeno, por lo tanto, no puede haber flujo de energía hacia este puerto. En lo que respecta a la conexión interleaved, permite reducir el ripple de corriente y aumentar la capacidad de potencia del puerto, sin embargo, en este trabajo el puerto no se lleva a su capacidad nominal, sino que se trabaja a baja potencia. La carga se conecta directamente al DC link, sin pasar por un convertidor boost. En esta topología, la batería actúa como la fuente de energía primaria, aportando la energía específica necesaria por el sistema, mientras que el SC actúa como fuente de energía secundaria aportando la potencia específica requerida por el sistema, capaz de asistir ante requerimientos peak de potencia. Esta topología está diseñada principalmente para prolongar la vida útil de la FC ya que el SC es quien se hace cargo de los peaks de demanda que podría solicitar la carga. Es importante mencionar que el sistema de tres puertos utilizado corresponde al sistema montado en la camioneta reconvertida a hidrógeno del Laboratorio de Electromovilidad.

En lo que respecta a la carga, realmente corresponde a un motor de inducción alimentado por un convertidor DC/AC, sin embargo, para efectos de simulación se simplifica usando una fuente de corriente en modo potencia constante. Esta aproximación representa efectivamente la dinámica de la corriente demandada por el convertidor de una forma simplificada. Lo anterior se usa para reducir la complejidad y al mismo tiempo reflejar precisamente la característica de la interacción entre la carga con el DC link. La simplificación se muestra en la Fig. 2.2.

Dado lo anterior, en la simulación se empleará una fuente de corriente para representar la carga, mientras que en la experimentación se utilizará una carga electrónica variable configurada para operar de manera equivalente a la fuente de corriente. En ambos casos, la carga se utilizará en modo de potencia constante con escalones de potencia.

A partir del sistema mostrado en la Fig. 2.1 y de la simplificación hecha en la carga se pueden desarrollar todas las ecuaciones que modelan la dinámica completa de los tres

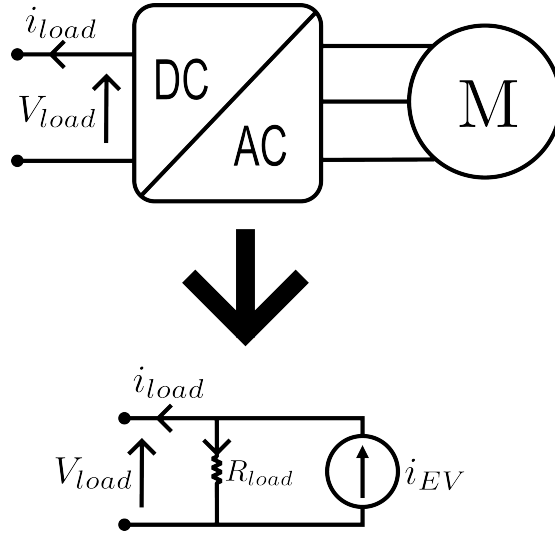


Figura 2.2: Simplificación de carga en el sistema de 3 puertos.

puertos como se muestra en (2.1), (2.2), (2.3), (2.4), (2.5), (2.6) y (2.7).

$$\frac{di_{sc}}{dt} = \frac{1}{L_{sc}} (v_{sc} - i_{sc}R_{sc} - v_{dc}(1 - u_{sc})), \quad (2.1)$$

$$\frac{di_{bat1}}{dt} = \frac{1}{L_{bat}} (v_{bat} - i_{bat1}R_{bat} - v_{bus}(1 - u_{bat1})), \quad (2.2)$$

$$\frac{di_{bat2}}{dt} = \frac{1}{L_{bat}} (v_{bat} - i_{bat2}R_{bat} - v_{bus}(1 - u_{bat2})), \quad (2.3)$$

$$\frac{dv_{sc}}{dt} = -\frac{1}{C_{sc}} i_{sc}, \quad (2.4)$$

$$\frac{dv_{bus}}{dt} = \frac{1}{C_{DClink}} (i_{sc}(1 - u_{sc}) + i_{bat1}(1 - u_{bat1}) + i_{bat2}(1 - u_{bat2}) + i_{load}), \quad (2.5)$$

$$i_{load} = i_{EV} - \frac{V_{bus}}{R_{load}}, \quad (2.6)$$

$$i_{bat} = i_{bat1} + i_{bat2}. \quad (2.7)$$

Teniendo en cuenta las referencias de corriente de la Fig. 2.1 se pueden definir distintos tipos de operación del sistema, los cuales serán simulados y posteriormente experimentados a lo largo de este trabajo. Cuando la carga consume energía desde el sistema $P_{load} < 0$ se tiene que $P_{sc} > 0$ y $P_{bat} > 0$ cumpliendo la relación $P_{bat} = P_{load} - P_{sc}$, además, se pueden dar los siguientes casos: cuando la tensión del supercapacitor v_{sc} ha llegado a un valor límite se procede con la descarga, por lo tanto, se generan las referencias para que se cumpla $P_{sc} > 0$ y $P_{bat} = 0$, es decir, la carga se alimenta completamente del sueprcapacitor y se deja a la batería sin suministrar energía. Por otro

Tabla 2.2: Valores nominales del SC LS Mtron.

<i>Parámetros</i>	<i>Valor</i>
C [F]	62.5
V_{nom}	129.6 V
V_{mx}	136.8 V
E_{mx}	144.6 Wh

Tabla 2.3: Parámetros de la carga Electrónica Chroma Serie 63803.

<i>Parámetros</i>	<i>Valor</i>
P_{nom}	3.6 kW
V_{rango}	50-350 V_{rms}
I_{mx}	36 A_{rms}
I_{peak}	108 A

lado, cuando la tensión v_{sc} ha disminuido por debajo del límite inferior, entonces se tiene $P_{sc} < 0$ y $P_{bat} > 0$, donde la potencia de la batería incrementa para poder cargar el supercapacitor al mismo tiempo que suministra la energía requerida por la carga. Cuando la carga regenera $P_{load} > 0$ se tiene $P_{sc} < 0$ y $P_{bat} = 0$, es decir, toda la regeneración se inyecta al supercapacitor y no a la batería, ya que se supone que este puerto emula una celda de combustible, la cual, por definición, no puede absorber energía del sistema, solo puede inyectar energía hacia la red. Sin embargo, la regeneración no se verá como operación en este trabajo.

2.1 Implementación

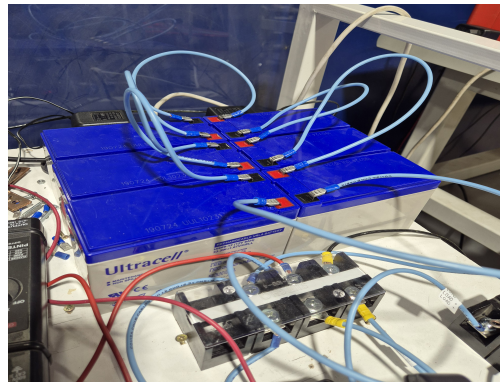
El sistema mostrado en la Fig. 2.1 se implementa con los equipos mostrados en la Fig. 2.3, correspondientes al supercapacitor 2.3(a), batería 2.3(b) y carga electrónica 2.3(c). Es importante destacar que, para la experimentación del DER, no se utilizará el motor del vehículo como carga, sino en su reemplazo, se utilizará la carga electrónica en modo potencia constante que simula la demanda del motor bajo condiciones simplificadas.

El supercapacitor es de LS Mtron mostrado en la Fig. 2.3(a) y sus valores se resumen en la tabla 2.2.

Por otro lado, la carga electrónica mostrada en la Fig. 2.3(c) corresponde a un equipo Chroma Serie 63803 con sus valores de operación resumidos en la tabla 2.3. Este equipo permite distintos tipos de simulación de carga como a tensión constante, resistencia constante, corriente constante y potencia constante, por lo tanto, para probar el DER frente a escalones de carga, se utilizará la opción de potencia constante con escalones que varían entre 0 y 1.5 kW.



(a) Supercapacitor LS Mtron.



(b) Batería.



(c) Carga electrónica Chroma.

Figura 2.3: Equipos utilizados en el sistema.

La batería corresponde a 6 módulos conectados en serie de 12 V cada uno con 9 Ah de capacidad, lo cual permite simular sin problemas el sistema con una máxima potencia de 1.5 kW ya que la duración del experimento será de unos cuantos minutos.

Es importante mencionar que el DC link del sistema será el punto de interconexión de todos los puertos y trabaja a una tensión de 144 [V_{DC}] y corresponde físicamente a 4 condensadores de 2200 [μ F] cada uno conectados en paralelo.

Finalmente, el control para experimentar el DER se realizará en MATLAB/Simulink integrado con el MicroAutoBox III mostrado en la Fig. 2.4 para la implementación en tiempo real.

La experimentación en tiempo real en el MicroAutoBox III se hace con una frecuencia de toma de muestras y frecuencia de paso fundamental de 10 kHz, lo que es suficiente para operar el DER de manera óptima.

La implementación requiere sistemas que eviten fallas en los equipos por sobre corriente y/o sobre voltaje, por lo tanto, se implementa un sistema de protección digital. Para no dañar los componentes del sistema, se utilizará la protección digital mostrada



Figura 2.4: MicroAutoBox III.

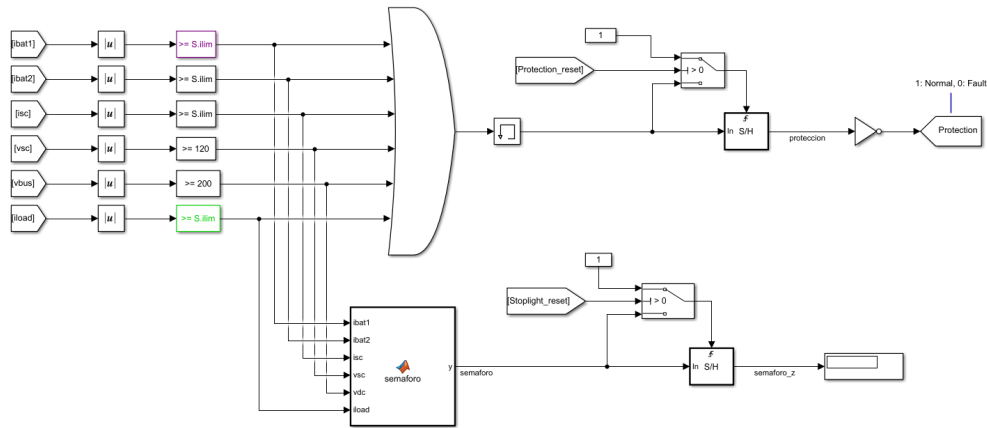


Figura 2.5: Protección digital.

en la Fig. 2.5 que limite todas las señales principales utilizadas por el control. En este caso, las corrientes se limitan a 60 A, v_{sc} se limita en 120 V, y la tensión V_{bus} se limita entre 130 y 200 V para la operación normal. Opera con una señal de salida normalmente encendida la cual se genera en una compuerta tipo 'OR'. La protección digital exige un reinicio manual posterior a la falla, lo que evita que el sistema vuelva a operar de forma automática si es que la señal en cuestión baja de su valor límite. Además, se incorpora un semáforo que indica la señal donde ocurre la falla.

Esta página se ha dejado en blanco intencionalmente.

Capítulo 3

Desarrollo del Dynamic Energy Router

3.1 DER en un sistema de 2 puertos

La introducción de la nueva estrategia de control dinámica de energía en un sistema de dos puertos, denominada como "Dynamic Energy Router" (DER), se presenta en [10]. La idea principal es abordar el problema de transferencia de energía generando dinámicamente las referencias de corrientes $i_i(t)$ de los m puertos denotados por Σ_i , $i = 1, \dots, m$ acorde a una política de transferencia de energía previamente definida, donde las referencias se generan en base a la energía asignada en cada instante de tiempo y en cada puerto del sistema. En la Fig. 3.1 se presenta gráficamente un puerto genérico con sus respectivas variables de puerto.

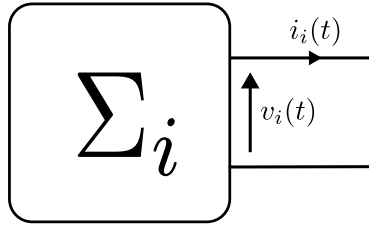


Figura 3.1: Puerto i con sus respectivas variables de tensión y corriente.

La transferencia de energía ocurre a través de una transformación matricial no lineal que relaciona todas las variables de puerto del sistema y permite generar las referencias de corriente, suponiendo que hay un lazo de control para su correcto seguimiento. En la formulación del problema de transferencia de energía, se asume un sistema sin disipación de energía, además, el trabajo mostrado se limitó a implementar el DER para dos puertos. En un puerto donde se cumple la conservación de energía, se tiene la expresión de conservación de energía dada por (3.1).

$$\begin{aligned} \text{Energía almacenada} &= \text{Energía suministrada} - \text{Energía disipada}, \\ H_i(t) &= H_{si}(t) - d_i(t). \end{aligned} \tag{3.1}$$

Donde $H_i(t)$ es una función escalar no negativa que representa la energía almacenada del puerto i , $d_i(t)$ representa la energía disipada del puerto y la función $H_{si}(t)$ representa la energía suministrada por el puerto como se presenta en (3.2).

$$H_{si}(t) = \int_0^t v_i^T(s) i_i(s) ds. \quad (3.2)$$

Al derivar la expresión (3.1) se logra (3.3), teniendo en consideración $d_i(t) \geq 0$. En otras palabras, la razón de incremento de la energía almacenada será siempre menor o igual a la energía suministrada al puerto desde el sistema.

$$\dot{H}_i(t) \leq v_i^T(t) i_i(t). \quad (3.3)$$

Como se muestra en [10], en un sistema de dos puertos sin disipación de energía, para lograr la transferencia dinámica de energía del puerto 1 al puerto 2, por conservación de energía se debe cumplir (3.4) con $\dot{H}_1(t) > 0$ y $\dot{H}_2(t) < 0$.

$$\dot{H}_1(t) + \dot{H}_2(t) = 0 \longrightarrow v_1^T(t) i_1(t) + v_2^T(t) i_2(t) = 0. \quad (3.4)$$

La parte derecha de (3.4) se puede reescribir agregando ceros convenientes como se muestra en el siguiente desarrollo de ecuaciones:

$$v_1^T(t) i_1(t) + v_2^T(t) i_2(t) = \alpha_{12}(t) v_1^2(t) v_2^2(t) + \alpha_{21}(t) v_1^2(t) v_2^2(t) = 0, \quad (3.5)$$

$$\rightarrow v_1^T(t) i_1(t) + v_2^T(t) i_2(t) = \begin{bmatrix} \alpha_{12}(t) v_1^T(t) v_2^2(t) & \alpha_{21}(t) v_1^2(t) v_2^T(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix}, \quad (3.6)$$

$$\rightarrow \begin{bmatrix} v_1^T(t) & v_2^T(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1^T(t) & v_2^T(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & \alpha_{12}(t) v_1(t) v_2^T(t) \\ \alpha_{21}(t) v_1^T(t) v_2(t) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix}. \quad (3.7)$$

Lo anterior, teniendo en cuenta la relación $\alpha_{12} = -\alpha_{21}$. Finalmente, se tiene la matriz de interconexión (3.9) que permite relacionar las variables de puerto del sistema.

$$\begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha_{12}(t) v_1(t) v_2^T(t) \\ \alpha_{21}(t) v_1^T(t) v_2(t) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

$$\rightarrow \Sigma_I = \begin{bmatrix} 0 & \alpha_{12}(t)v_1(t)v_2^T(t) \\ \alpha_{21}(t)v_1^T(t)v_2(t) & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

El desarrollo algebraico anterior se obtiene una matriz $\Sigma_I \in \mathbb{R}^2$ que relaciona las variables de puerto mediante la manipulación algebraica de (3.4). El DER es el sistema de interconexión Σ_I sin disipación de energía que incorpora el conjunto de todos los convertidores de potencia. Permite conectar los puertos del sistema y, además, facilita satisfacer la relación (3.4) al ser un sistema sin disipación. En (3.10) se muestra la relación entre las variables de puertos del sistema.

$$\begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \end{bmatrix} = \Sigma_I \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix}. \quad (3.10)$$

Se debe tener en consideración que el DER se crea para un sistema sin pérdidas, ya que por definición, es un dispositivo simple para gestionar la energía. Las pérdidas del sistema se manejan con otros métodos que se verán más adelante.

En la Fig. 3.2 se muestra gráficamente como el DER permite interconectar los dos puertos.

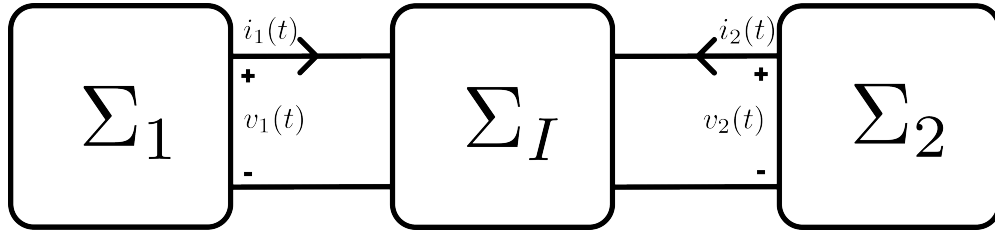


Figura 3.2: Esquema de interconexión para dos puertos.

En (3.11) se muestra la matriz DER, la cual permite transferir energía entre puertos de forma instantánea. Multiplicando (3.10) a la izquierda por el vector fila $[v_1^T(t) \ v_2^T(t)]$, se logra nuevamente (3.4).

$$\Sigma_I = \begin{bmatrix} 0 & \alpha(t)v_1(t)v_2^T(t) \\ -\alpha(t)v_2(t)v_1^T(t) & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.11)$$

La matriz tiene expresiones que dependen de las tensiones y de una función $\alpha(t) \in \mathbb{R}$ diseñada por el usuario acorde a la gestión deseada. Dada la relación (3.10), es posible expresar potencia en cada puerto como se muestra en (3.12), es decir, podemos asignar en cada paso de simulación la potencia requerida por cada puerto.

$$\begin{aligned}\dot{H}_1(t) &= \alpha(t) |v_1(t)|^2 |v_2(t)|^2, \\ \dot{H}_2(t) &= -\alpha(t) |v_1(t)|^2 |v_2(t)|^2.\end{aligned}\tag{3.12}$$

De la misma forma, es fácil obtener las referencias de corrientes entregadas por el DER en cada puerto como se muestra en (3.13).

$$\begin{aligned}i_1(t) &= \alpha(t) |v_1(t)| |v_2(t)|^2, \\ i_2(t) &= -\alpha(t) |v_1(t)|^2 |v_2(t)|.\end{aligned}\tag{3.13}$$

Teniendo en consideración que las tensiones en cada puerto pueden ser medidas y generalmente son distintas de cero, el DER permite efectuar una transferencia dinámica de energía en este sistema de dos puertos mediante la variación de un único parámetro $\alpha(t)$, el cual permite manipular el sentido de transferencia de energía y la respectiva razón de cambio de forma simple, cumpliendo con la relación (3.4). El parámetro $\alpha(t)$ se selecciona considerando las limitaciones físicas de los elementos involucrados.

Se debe tener en cuenta que esta estrategia entrega las referencias de corriente a partir de los requerimientos de energía en cada puerto, por lo tanto, debe existir un lazo de control interno que permita seguir las referencias de corriente en todos los puertos del sistema, el cual puede ser lineal o no lineal.

3.2 DER en un sistema de 3 puertos

En este trabajo, se desarrollará el fundamento matemático para el DER de 3 puertos, el cual fue diseñado inicialmente para 2 puertos, mediante el diseño de una nueva matriz de interconexión que ya no depende solo de un parámetro $\alpha_j(t) \in \mathbb{R}$, sino que ahora depende de $\alpha_{ji}(t) \in \mathbb{R}^{m \times m}$ con $j, i = 1, \dots, m$. En otras palabras, la transferencia de energía entre los puertos j e i del sistema pueden ser regulados mediante la correcta elección de los valores de $\alpha_{ji}(t)$. Esto permitirá un DER más flexible para ser utilizado en sistemas reales de potencia. En la Fig. 3.3 se muestra gráficamente la interconexión de los 3 puertos representados por Σ_j y el DER que interconecta todos los puertos representado por Σ_I .

En un sistema sin pérdidas de 3 puertos, por balance de energía se obtiene (3.14).

$$\begin{aligned}\dot{H}_1(t) + \dot{H}_2(t) + \dot{H}_3(t) &= 0, \\ \longrightarrow v_1^T(t)i_1(t) + v_2^T(t)i_2(t) + v_3^T(t)i_3(t) &= 0.\end{aligned}\tag{3.14}$$

Se debe notar que para 2 puertos, el parámetro α puede ser resumido como un solo

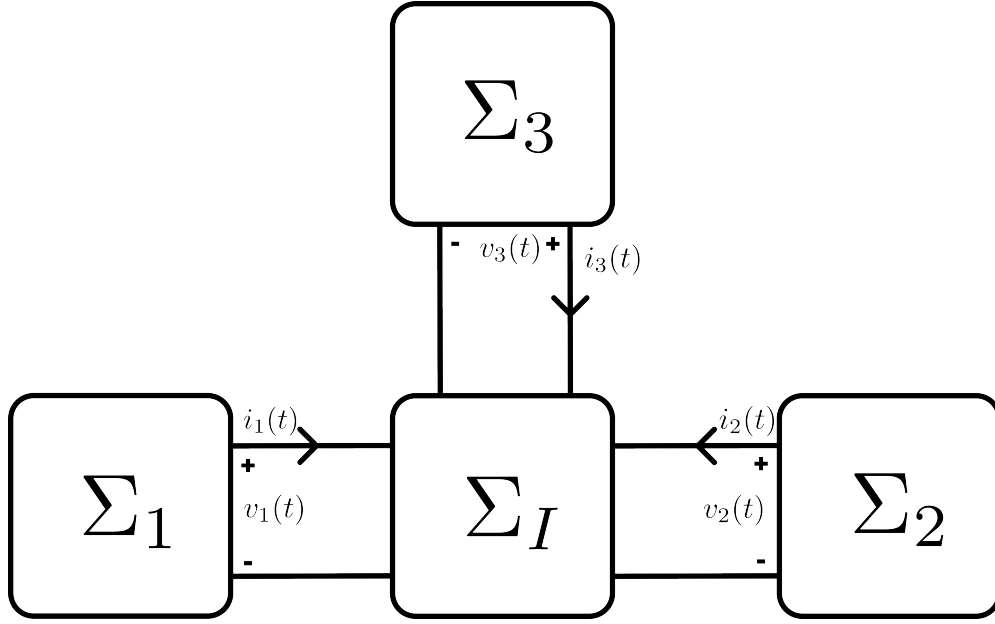


Figura 3.3: Esquema de interconexión para 3 puertos.

valor que regula las razones de cambio, amplitud y dirección del flujo de energía, dada la relación (3.15).

$$\alpha = \alpha_{12} = -\alpha_{21}. \quad (3.15)$$

En el caso de 3 puertos, la nueva matriz de interconexión se obtiene de la misma forma que para el caso de 2 puertos, es decir, se manipula algebraicamente (3.14) para lograr tener la relación (3.16) y obtener finalmente (3.17) que ahora es de dimensión $\mathbb{R}^{3 \times 3}$. Multiplicando (3.16) a la izquierda por el vector $[v_1^T(t) \quad v_2^T(t) \quad v_3^T(t)]$, se obtiene nuevamente (3.14).

$$\begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \\ i_3(t) \end{bmatrix} = \Sigma_I \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \\ v_3(t) \end{bmatrix}. \quad (3.16)$$

$$\Sigma_I = \begin{bmatrix} 0 & \alpha_{12}(t)v_1(t)v_2(t)v_3^2(t) & \alpha_{13}(t)v_1(t)v_2^2(t)v_3(t) \\ \alpha_{21}(t)v_1(t)v_2(t)v_3^2(t) & 0 & \alpha_{23}(t)v_1^2(t)v_2(t)v_3(t) \\ \alpha_{31}(t)v_1(t)v_2^2(t)v_3(t) & \alpha_{32}(t)v_1^2(t)v_2(t)v_3(t) & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.17)$$

Ahora es posible redireccionar los flujos de energía de forma simple desde un puerto hasta otro puerto del sistema. Al igual como ocurre para 2 puertos, la relación (3.16) permite entregar fácilmente las referencias de corriente (3.18) y las referencias de (3.19) en cada puerto del sistema para cada paso de simulación.

$$\begin{aligned} i_1(t) &= (\alpha_{12}(t) + \alpha_{13}(t)) v_1(t)v_2^2(t)v_3^2(t) = \alpha_1(t)v_1(t)v_2^2(t)v_3^2(t), \\ i_2(t) &= (\alpha_{21}(t) + \alpha_{23}(t)) v_1^2(t)v_2(t)v_3^2(t) = \alpha_2(t)v_1^2(t)v_2(t)v_3^2(t), \\ i_3(t) &= (\alpha_{31}(t) + \alpha_{32}(t)) v_1^2(t)v_2^2(t)v_3(t) = \alpha_3(t)v_1^2(t)v_2^2(t)v_3(t). \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} \dot{H}_1(t) &= (\alpha_{12}(t) + \alpha_{13}(t)) v_1^2(t)v_2^2(t)v_3^2(t) = \alpha_1(t)v_1^2(t)v_2^2(t)v_3^2(t), \\ \dot{H}_2(t) &= (\alpha_{21}(t) + \alpha_{23}(t)) v_1^2(t)v_2^2(t)v_3^2(t) = \alpha_2(t)v_1^2(t)v_2^2(t)v_3^2(t), \\ \dot{H}_3(t) &= (\alpha_{31}(t) + \alpha_{32}(t)) v_1^2(t)v_2^2(t)v_3^2(t) = \alpha_3(t)v_1^2(t)v_2^2(t)v_3^2(t). \end{aligned} \quad (3.19)$$

Cabe destacar que ahora la energía de cada puerto se puede manipular con $\alpha_j(t) = \alpha_{ji}(t) + \alpha_{jk}(t)$, es decir, es posible decidir que porcentaje de la energía total suministrada por el puerto j irá al puerto k y que porcentaje irá al puerto i .

Se debe tener en consideración que la base fundamental del DER es el cumplimiento del balance de energía en el sistema para poder operar, por lo tanto, es importante verificar el balance de energía a través de las ecuaciones dinámicas del sistema de 3 puertos presentado en la sección 2. La función de energía total del sistema de 3 puertos $H_T(t)$ está dada por (3.20).

$$H_T(t) = \frac{1}{2}L_{sc}i_{sc}^2 + \frac{1}{2}L_{bat}i_{bat1}^2 + \frac{1}{2}L_{bat}i_{bat2}^2 + \frac{1}{2}C_{DCLink}v_{bus}^2 \quad (3.20)$$

Para obtener el balance energético se debe obtener la derivada de la función de energía como se muestra en (3.21).

$$\dot{H}_T(t) = L_{sc}i_{sc}\frac{di_{sc}}{dt} + L_{bat}i_{bat1}\frac{di_{bat1}}{dt} + L_{bat}i_{bat2}\frac{di_{bat2}}{dt} + C_{DCLink}v_{bus}\frac{dv_{bus}}{dt} \quad (3.21)$$

Utilizando las ecuaciones dinámicas del sistema en (3.21) es posible obtener la expresión completa (3.22).

$$\begin{aligned}\dot{H}_T(t) = & i_{sc}v_{sc} - i_{sc}^2 R_{sc} - v_{bus}i_{sc}(1 - u_{sc}) + i_{bat1}v_{bat} - i_{bat1}^2 R_{bat} - v_{bus}i_{bat1}(1 - u_{bat1}) \\ & + i_{fc2}v_{bat} - i_{bat2}^2 R_{bat} - v_{bus}i_{bat2}(1 - u_{bat2}) + v_{bus}i_{sc}(1 - u_{sc}) + v_{bus}i_{bat1}(1 - u_{bat1}) \\ & + v_{bus}i_{bat2}(1 - u_{bat2}) + v_{bus}i_{load} \quad (3.22)\end{aligned}$$

Finalmente, reduciendo algebraicamente (3.22) se obtiene la comprobación del balance de energía en el sistema como se muestra en (3.23), por lo tanto, el DER puede ser utilizado sin problemas en este sistema.

$$\dot{H}_T(t) = -d(t) + i_{sc}v_{sc} + i_{bat1}v_{bat} + i_{bat2}v_{bat} + i_{load}v_{bus} \quad (3.23)$$

Donde $d(t) = i_{sc}^2 R_{sc} + i_{bat1}^2 R_{bat} + i_{bat2}^2 R_{bat}$ corresponde a la disipación de energía del sistema por los efectos de las resistencias. Es importante mencionar que las pérdidas totales del sistema no solo corresponden a la disipación resistiva ya que los semiconductores también aportan a disminuir la eficiencia, por lo tanto, las pérdidas totales corresponden a $d_I(t) = d(t) + d_{conduccion}(t) + d_{conmutacion}(t) + d_{parasitas}$. No siempre es trivial estimar o medir con precisión las pérdidas totales, sobre todo cuando se trata de pérdidas por conmutación y en resistencias parásitas del sistema.

3.3 Problema de Decaimiento de Energía

En [10], se describe que el DER está limitado a sistemas sin disipación de energía. Es decir, si el puerto 2 requiere una energía de $H_2(t)$, entonces el DER asignará al puerto 1 la entrega de energía $H_1(t)$ tal que se cumpla $|H_1(t)| = |H_2(t)|$. En caso de tener disipación de energía $d_I(t) > 0$ (lo cual ocurre inevitablemente en un sistema), el DER no será capaz de compensarlo. El DER físicamente corresponde al conjunto de todos los convertidores de potencia que permiten interconectar los puertos del sistema, por lo tanto, el DER es un subsistema de m puertos que tiene su función de energía interna almacenada dada por $H_I(t)$ y sus variables de puerto dadas por $i_{Ij}(t)$ y $v_{Ij}(t)$ para la corriente y la tensión respectivamente, donde se cumple $i_{Ij}(t) = -i_j(t)$ y $v_{Ij}(t) = v_j(t)$. En efecto, en un sistema real se tiene $d_I(t) > 0$ (las pérdidas son inevitables), por lo tanto, la energía interna estará dada por (3.24), la cual depende explícitamente de las pérdidas $d_I(t)$. Estas pérdidas pueden ser o no ser conocidas.

$$\dot{H}_{Ireal}(t) = - \sum_{j=1}^m (v_j^T(t) i_j(t)) - d_I(t) = 0 \quad (3.24)$$

Por otro lado, el DER por definición asume un sistema sin pérdidas, es decir, asume una expresión dada por (3.25).

$$\dot{H}_I(t) = - \sum_{j=1}^m v_j^T(t) i_j(t) = 0 \quad (3.25)$$

Por lo tanto, al generar las referencias de energía para cada puerto utilizando el DER (no considera pérdidas) como sistema de control de flujo de energía se tendrá (3.26), la cual se obtiene reemplazando (3.25) en (3.24). La expresión (3.26) indica una disminución constante de la energía del DER cuando el sistema sigue las referencias de corriente entregadas por este sistema de gestión de energía. Lo anterior implica que en algún momento el sistema dejará de operar de forma óptima.

$$\dot{H}_{Ireal}(t) = -d_I(t) \quad (3.26)$$

Idealmente, si el sistema no tuviera pérdidas, se tendría que la razón de cambio de la energía interna del DER estaría dada por la expresión (3.27), indicando que su energía se mantiene constante durante el traspaso de energía desde un punto a otro.

$$\dot{H}_{Ireal}(t) = 0 \quad (3.27)$$

El problema anterior se puede ejemplificar de forma simple en un sistema de dos puertos como en la Fig. 3.2. Si el puerto 2 requiere 10 W de potencia, es lógico que el DER va a generar las referencias de corriente para que el puerto 2 reciba los 10 W y el puerto 1 entregue los 10 W en cuestión. Sin embargo, el sistema por naturaleza tiene pérdidas dadas por $d_I(t)$, por lo tanto, como las referencias entregadas por el DER no toman en consideración esta disipación de energía, la energía interna del subsistema Σ_I es la que se hará responsable de suplir esas pérdidas para que la transferencia de energía entre ambos puertos sea acorde a lo requerido por la política de gestión de energía establecida. Lo anterior se traduce en el decaimiento de la energía almacenada en el subsistema (3.26). En este caso, el decaimiento de energía en el subsistema Σ_I se traduce en la disminución de la tensión del DC link, ya que sería este capacitor quien se

haga cargo de las pérdidas.

En el trabajo [20], se trata de compensar las pérdidas implementando un "nuevo DER" suponiendo que se conoce $d_I(t)$. Se fija, por simplicidad, la potencia requerida en los $m - 1$ puertos, mientras que el puerto m se designa especialmente para compensar las pérdidas del sistema. De la expresión (3.12), se extrapola la expresión de potencia para m puertos como se muestra en (3.28), donde se puede elegir $\alpha_j(t)$ para definir magnitud, razón de cambio y sentido de la potencia en los puertos j .

$$\dot{H}_j(t) = P_j(t) = \alpha_j(t) \prod_{k=1}^m |v_j(t)|^2 \quad (3.28)$$

Se fija la potencia deseada de los $m-1$ puertos como se muestra en (3.29).

$$\alpha_j(t) = \frac{P_j^*(t)}{\prod_{k=1}^m |v_j(t)|^2} \quad (3.29)$$

Por otro lado, en el puerto m se elige $\alpha_m(t)$ para que este asuma las pérdidas del sistema como se muestra en (3.30), el cual depende explícitamente de la expresión $d_I(t)$.

$$\alpha_m(t) = \frac{d_I(t)}{\prod_{k=1}^m |v_j(t)|^2} \quad (3.30)$$

Por lo tanto, el "nuevo DER" define las referencias de corriente de todos los puertos como (3.31), lo que en el caso escalar se reduce a (3.32).

$$i_j^*(t) = \frac{P_j^*(t)}{|v_j(t)|^2} v_j(t)^2 \quad (3.31)$$

$$i_j^*(t) = \frac{P_j^*(t)}{v_j(t)} \quad (3.32)$$

Lo que permite la transferencia de energía deseada en cada puerto como se muestra en (3.33) y suplir las pérdidas desde el puerto m como se muestra en la expresión (3.34).

$$\dot{H}j(t) = P_j^* \quad (3.33)$$

$$\dot{H}m(t) = d_I(t) \quad (3.34)$$

En este trabajo se define que solo el puerto m aporta energía para las pérdidas, pero esta política de energía es por simplicidad ya que eventualmente se puede distribuir el aporte de energía para las pérdidas $d_I(t)$ entre todos los puertos.

El principal problema sobre la robustez de este control es que depende del conocimiento de las pérdidas del sistema $d_I(t)$, lo cual incluye pérdidas tanto resistivas como aquellas propias de la conmutación de los interruptores controlados. Además, los parámetros concentrados que modelan las pérdidas del sistema se requieren para diseñar el lazo de control interno que hace seguimiento a las referencias de corriente, por lo tanto, el correcto conocimiento de estos datos influye en los resultados.

La validación del "nuevo DER" se hace mediante experimentación y comparándolo con la experimentación del DER de dos puertos sin compensación de pérdidas. Para compensar las pérdidas en [20], se agrega un nuevo puerto con una batería y se implementa esta nueva estrategia de despacho tal que este nuevo puerto supla las pérdidas dadas por $d_I(t) = R_1 i_1(t) + R_2 i_2(t) + R_3 i_3(t)$. Esto permite que los otros dos puertos, compuestos de un supercondensador cada uno, puedan transferir energía entre ellos sin el problema del decaimiento de energía, logrando un comportamiento deseado y una regulación del DC link adecuada. Sin embargo, este trabajo no muestra la energía del DC link en una ventana de tiempo grande, por lo tanto, no permite comprobar si efectivamente la energía del DER se mantiene constante o decae en el tiempo. Además, como conclusión, se habla de la necesidad de un DER adaptativo para estimar de forma más efectiva el valor de las pérdidas $d_I(t)$, ya que el valor estimado difiere del valor real según se concluye en este trabajo. Finalmente, este "nuevo DER" no fue probado experimentalmente en un sistema con celdas de combustible de hidrógeno y, además, no muestra una formalidad matemática para aplicar el DER a más de dos puertos.

Inicialmente, este trabajo contempla solucionar el problema de las pérdidas mediante la incorporación explícita de $d_I(t)$ en la matriz de interconexión. Para que el DER pueda incorporar las pérdidas, se sumará a las referencias de corriente de cada puerto entregadas por el DER un delta de corriente equivalente a un porcentaje del total de las pérdidas, mediante la incorporación de un parámetro λ_j . Para incluir el delta de corriente en las referencias entregadas por el DER, la matriz de interconexión de 3 puertos debe adquirir la forma (3.35).

$$\Sigma_I = \begin{bmatrix} 0 & \alpha_{12}\Phi_1 v_1 v_2 v_3^2 + \frac{\lambda_{12} d_I(t)}{v_1 v_2} & \alpha_{13}\Phi_1 v_1 v_2^2 v_3 + \frac{\lambda_{13} d_I}{v_1 v_3} \\ \alpha_{21}\Phi_2 v_1 v_2 v_3^2 + \frac{\lambda_{21} d_I(t)}{v_1 v_2} & 0 & \alpha_{23}\Phi_2 v_1^2 v_2 v_3 + \frac{\lambda_{23} d_I}{v_2 v_3} \\ \alpha_{32}\Phi_3 v_1 v_2^2 v_3 + \frac{\lambda_{31} d_I(t)}{v_1 v_3} & \alpha_{31}\Phi_3 v_1^2 v_2 v_3 + \frac{\lambda_{32} d_I}{v_2 v_3} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

De la matriz de interconexión mostrada anteriormente, las referencias de potencia en cada puerto entregadas por el DSER con compensación de pérdidas se muestran en (3.36), mientras que las respectivas referencias de corriente se presentan en (3.37).

$$\begin{aligned} \dot{H}_1(t) &= \alpha_1 \Phi_1 v_1^2 v_2^2 v_3^2 + \lambda_1 d_I \\ \dot{H}_2(t) &= \alpha_2 \Phi_2 v_1^2 v_2^2 v_3^2 + \lambda_2 d_I \\ \dot{H}_3(t) &= \alpha_3 \Phi_3 v_1^2 v_2^2 v_3^2 + \lambda_3 d_I \end{aligned} \quad (3.36)$$

$$\begin{aligned} i_1(t) &= \alpha_1 \Phi_1 v_1 v_2^2 v_3^2 + \frac{\lambda_1 d_I}{v_1} \\ i_2(t) &= \alpha_2 \Phi_2 v_1^2 v_2 v_3^2 + \frac{\lambda_2 d_I}{v_2} \\ i_3(t) &= \alpha_3 \Phi_3 v_1^2 v_2^2 v_3 + \frac{\lambda_3 d_I}{v_3} \end{aligned} \quad (3.37)$$

El parámetro $\lambda_j \in [0, 1]$, donde $j = 1, \dots, m$ y $\sum_{j=1}^m \lambda_j = 1$, permite asignar a voluntad el porcentaje de las pérdidas $d_I(t)$ que suministrará cada puerto. Por ejemplo, si por políticas de despacho se requiere que el puerto 1 y el puerto 2 suministren la mitad de las pérdidas en todo momento, entonces se tendrá $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.5$ y $\lambda_3 = 0$.

El problema de esta alternativa para integrar las pérdidas, es que tambien depende explícitamente de la función de disipación $d_I(t)$, el cual no siempre puede ser medido o estimado de forma adecuada y/o simple, por lo tanto, se desarrolla este trabajo con otros mecanismos de alimentación de las pérdidas.

En el trabajo [21], se presenta otra forma de controlar las pérdidas del sistema utilizando el DER con una batería externa en el DC link. Pero en este caso, la tensión se regula con un control PI anidado para la corriente (lazo interno) y la tensión (lazo externo) en la batería incorporada, logrando una transferencia de energía deseada entre los otros 2 puertos y un comportamiento completamente adecuado para la tensión del bus DC. En este caso, la batería no se considera como un puerto extra, ya que no se asignan referencias dinámicas de corriente desde el DER. Por lo tanto, es un sistema con

2 puertos, pero con compensación de pérdidas con una batería que mantiene la tensión del DC link constante. En este caso, no se requiere un conocimiento de las pérdidas $d_I(t)$, pero sí de los parámetros concentrados resistivos para diseñar los lazos internos de corriente. Sin embargo, tener un control de gestión de transferencia de energía que requiera una batería externa para regular solo pérdidas no tiene sentido, idealmente se debería poder regular las pérdidas con alguno de los puertos que actúan activamente en la transferencia de energía dentro del sistema.

En este trabajo se busca resolver el problema de las pérdidas del DER haciendo que un puerto se encargue de controlar la tensión del DC link constante en 144 V, lo que permite alimentar las pérdidas indirectamente como se muestra en el trabajo [21]. Sin embargo, esta solución se abordará de dos formas distintas dependiendo del control utilizado. En el caso del FL se hará que el puerto no solo controle las pérdidas, sino que también participe activamente de la transferencia de energía en el sistema multipuerto acorde a las referencias entregadas por el DER. En este caso el puerto encargado de suplir las pérdidas será el del SC, principalmente, por su gran capacidad de potencia específica. Este control de las pérdidas se realizará mediante el control FL el cual permitirá realizar un seguimiento de referencias de corriente en cada puerto, al mismo tiempo que mantiene la tensión del DC link constante como se verá más adelante. Por otro lado, cuando se utiliza control MPC se hará solo seguimiento de referencias de corriente en los 3 puertos que actúan activamente de la transferencia de energía, mientras que se instalará otro puerto auxiliar encargado de mantener la tensión del DC link constante.

Esta página se ha dejado en blanco intencionalmente.

Capítulo 4

Estrategia de Control Predictivo Basado en el Modelo (MPC)

En este capítulo se presenta el desarrollo matemático y la implementación de la estrategia de control Predictivo Basado en Modelo aplicada al Dynamic Energy Router de tres puertos. La metodología se centra en utilizar un modelo discreto del sistema para predecir su comportamiento y seleccionar las acciones de control óptimas mediante la minimización de una función de costo. Este control se diseña para gestionar de manera eficiente el flujo de energía entre los puertos, garantizando el seguimiento de la referencia de corriente generada por el DER.

En la fase de simulación, se incluye un puerto auxiliar adicional diseñado exclusivamente para regular el voltaje del DC link. Este puerto no participa activamente en la transferencia de energía entre los demás puertos, sino que tiene como objetivo garantizar la estabilidad de la tensión en el DC link durante las simulaciones, permitiendo que el control MPC opere sin el lidiar con el problema de las pérdidas en el sistema.

4.1 Desarrollo Matemático del Control MPC con Horizonte Uno

En esta sección se busca controlar la corriente del convertidor boost de cada puerto del sistema. El control MPC busca optimizar la acción de control u resolviendo en cada instante de simulación k el problema de optimización (4.1), donde $u \in \mathbb{U}$ representa las restricciones en la entrada. Por temas de simplicidad, se anotará la corriente en el instante $k+1$ como $i(k+1)$, mientras que la corriente en el instante k solo se escribirá como i , lo mismo se hará para todas las variables del desarrollo.

$$\begin{aligned} u &= \arg \min_u \{J(u)\} \\ s.t. \quad i(k+1) &= Fi + Gu + d \\ u &\in \mathbb{U} \end{aligned} \tag{4.1}$$

Para obtener la acción de control óptima se introduce la función de costo (4.2).

$$J(u) = \|i(k+1) - i^*(k+1)\|_2^2 + \lambda \|u - u^*\|_2^2 \quad (4.2)$$

El parámetro de ajuste λ se usa para regular la respuesta dinámica. Si el parámetro λ es muy pequeño, el controlador se convierte en un controlador deadbeat, es decir, tratará de llevar la corriente a la referencia en un paso de simulación. Por otro lado, si λ es muy grande, la solución óptima tiende a u^* lo que es equivalente a operar en lazo abierto. Se debe tener en consideración que en estado estacionario, ambos objetivos de control tienden aproximadamente al mismo punto.

El análisis inicia con la ecuación dinámica de corriente del puerto del supercapacitor (4.3) y las ecuaciones dinámicas de corriente de los puertos de la batería (4.4) y (4.5).

$$\frac{di_{sc}}{dt} = \frac{1}{L_{sc}} (v_{sc} - i_{sc}R_{sc} - v_{dc}(1 - u_{sc})), \quad (4.3)$$

$$\frac{di_{bat1}}{dt} = \frac{1}{L_{bat}} (v_{bat} - i_{bat1}R_{bat} - v_{dc}(1 - u_{bat1})), \quad (4.4)$$

$$\frac{di_{bat2}}{dt} = \frac{1}{L_{bat}} (v_{bat} - i_{bat2}R_{bat} - v_{dc}(1 - u_{bat2})). \quad (4.5)$$

Para aplicar el control MPC se debe discretizar las ecuaciones dinámicas, por lo tanto, se aplicará el método de Euler hacia adelante, lo cual se logra en (4.6), (4.7) y (4.8).

$$\begin{aligned} \frac{i_{sc}(k+1) - i_{sc}}{T_s} &= \frac{1}{L_{sc}} (v_{sc} - i_{sc}R_{sc} - v_{bus}(1 - u_{sc})), \\ \rightarrow i_{sc}(k+1) &= \left(1 - \frac{R_{sc}T_s}{L_{sc}}\right) i_{sc} + \frac{T_s}{L_{sc}} v_{bus} u_{sc} + \frac{T_s}{L_{sc}} (v_{sc} - v_{bus}), \\ \rightarrow i_{sc}(k+1) &= F_{sc} i_{sc} + G_{sc} u_{sc} + d_{sc}. \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{i_{bat1}(k+1) - i_{bat1}}{T_s} &= \frac{1}{L_{bat}} (v_{bat} - i_{bat1}R_{bat} - v_{bus}(1 - u_{bat1})), \\ \rightarrow i_{bat1}(k+1) &= \left(1 - \frac{R_{bat}T_s}{L_{bat}}\right) i_{bat1} + \frac{T_s}{L_{bat}} v_{bus} u_{bat1} + \frac{T_s}{L_{bat}} (v_{bat} - v_{bus}), \\ \rightarrow i_{bat1}(k+1) &= F_{bat} i_{bat1} + G_{bat} u_{bat1} + d_{bat}. \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned}
\frac{i_{bat2}(k+1) - i_{bat2}}{T_s} &= \frac{1}{L_{bat}} (v_{bat} - i_{bat2}R_{bat} - v_{bus}(1 - u_{bat2})), \\
\rightarrow i_{bat2}(k+1) &= \left(1 - \frac{R_{bat}T_s}{L_{bat}}\right) i_{bat2} + \frac{T_s}{L_{bat}} v_{bus} u_{bat2} + \frac{T_s}{L_{bat}} (v_{bat} - v_{bus}), \\
\rightarrow i_{bat2}(k+1) &= F_{bat} i_{bat2} + G_{bat} u_{bat2} + d_{bat}.
\end{aligned} \tag{4.8}$$

Donde se definen las variables (4.9) y (4.10) para mayor simplicidad.

$$\begin{aligned}
F_{sc} &= \left(1 - \frac{R_{sc}T_s}{L_{sc}}\right), \\
G_{sc} &= \frac{T_s}{L_{sc}} v_{bus}, \\
d_{sc} &= \frac{T_s}{L_{sc}} (v_{sc} - v_{bus}).
\end{aligned} \tag{4.9}$$

$$\begin{aligned}
F_{bat} &= \left(1 - \frac{R_{bat}T_s}{L_{bat}}\right), \\
G_{bat} &= \frac{T_s}{L_{bat}} v_{bus}, \\
d_{bat} &= \frac{T_s}{L_{bat}} (v_{bat} - v_{bus}).
\end{aligned} \tag{4.10}$$

Para optimizar la función de costo multiobjetivo (4.2) se puede dejar de la forma (4.11), lo cual permite ser optimizada en la función "quadprog" de "MATLAB" fácilmente.

$$J(u) = \frac{1}{2} u^T H u + f^T u + v. \tag{4.11}$$

La función "quadprog" pide como entradas las variables H y f de la expresión (4.11), por lo tanto, el objetivo es encontrar estas variables para cada puerto.

Primero se busca simplificar la expresión $\lambda ||u - u^*||_2^2$ como se muestra en (4.12), donde se puede obtener fácilmente una expresión de la forma (4.11). Si bien esta expresión se obtuvo de forma general, es fácil notar que se puede obtener la misma forma para u_{sc} , u_{bat1} y para u_{bat2} .

$$\begin{aligned}
\lambda ||u - u^*||_2^2 &= \lambda (u - u^*)^T (u - u^*), \\
&= \lambda (u^T - u^{*T})(u - u^*), \\
&= \lambda (u^T u - 2u^{*T} u + u^{*T} u^*).
\end{aligned} \tag{4.12}$$

Ahora se busca simplificar la expresión $||i(k+1) - i^*(k+1)||_2^2$. Como las corrientes $i_{sc}(k+1)$, $i_{bat1}(k+1)$ y $i_{bat2}(k+1)$ tienen la misma forma genérica dada por $i(k+1) = Fi + Gu + d$, se resolverá de forma general y luego se extenderá a las 3 corrientes. La expresión (4.13) se simplifica creando la variable D representada en (4.14).

$$\begin{aligned}
||i(k+1) - i^*(k+1)||_2^2 &= ||Fi + Gu + d - i^*(k+1)||_2^2, \\
||i(k+1) - i^*(k+1)||_2^2 &= ||Gu - D||_2^2.
\end{aligned} \tag{4.13}$$

$$D = i^*(k+1) - Fi - d. \tag{4.14}$$

Por lo tanto, es posible reformular la expresión $||Gu - D||_2^2$ de la forma (4.15) obteniendo una expresión similar a la de (4.12).

$$\begin{aligned}
||Gu - D||_2^2 &= (Gu - D)^T (Gu - D), \\
&= (u^T G^T - D^T)(Gu - D), \\
&= u^T G^T Gu - 2D^T Gu + D^T D.
\end{aligned} \tag{4.15}$$

De (4.15) y (4.12) se puede obtener la expresión general (4.16).

$$\begin{aligned}
H &= 2(G^T G + \lambda), \\
f &= -2(D^T G - u^{*T} \lambda)^T, \\
v &= D^T D + \lambda u^{*T} u^*.
\end{aligned} \tag{4.16}$$

Luego es posible obtener las variables H y f para cada corriente a controlar en el sistema como se muestra en (4.17), (4.18) y (4.19).

$$\begin{aligned}
H_{sc} &= 2(G_{sc}^T G_{sc} + \lambda_{sc}), \\
f_{sc} &= -2(D_{sc}^T G_{sc} - u_{sc}^{*T} \lambda_{sc})^T, \\
v_{sc} &= D_{sc}^T D_{sc} + \lambda_{sc} u_{sc}^{*T} u_{sc}^*.
\end{aligned} \tag{4.17}$$

$$\begin{aligned}
H_{bat1} &= 2(G_{bat}^T G_{bat} + \lambda_{bat1}), \\
f_{bat1} &= -2(D_{bat1}^T G_{bat} - u_{bat1}^{*T} \lambda_{bat1})^T, \\
v_{bat1} &= D_{bat1}^T D_{bat1} + \lambda_{bat1} u_{bat1}^{*T} u_{bat1}^*.
\end{aligned} \tag{4.18}$$

$$\begin{aligned}
H_{bat2} &= 2(G_{bat}^T G_{bat} + \lambda_{bat2}), \\
f_{bat2} &= -2(D_{bat2}^T G_{bat} - u_{bat2}^{*T} \lambda_{bat2})^T, \\
v_{bat2} &= D_{bat2}^T D_{bat2} + \lambda_{bat2} u_{bat2}^{*T} u_{bat2}^*.
\end{aligned} \tag{4.19}$$

Es importante destacar que la variable v no depende de la entrada del sistema u_{sc} , por lo tanto, no participa en la optimización.

Con respecto a los límites de la variable optimizada, se tiene que debe cumplir $0 \leq u \leq 1$, por lo tanto, se pueden establecer las variables de entrada LB (lower bound) y UB (upper bound) de la función "quadprog" como $LB = 0$ y $UB = 1$.

En este caso, el controlador es simple de sintonizar ya que es suficiente manipular el parámetro λ . En este caso se selecciona $\lambda = 0.8$ para el seguimiento de referencias de corriente.

4.2 Simulación y Análisis del DER con Control MPC

En esta sección se analizará la efectividad del control MPC en conjunto con el DER. El control MPC se diseñó solo para el seguimiento de referencias de corriente en todos los puertos del sistema, sin embargo, no considera control de tensión del DC link ya que no hay una forma directa y simple de hacer que un puerto controle la tensión del DC link mediante MPC al mismo tiempo que permita seguir las referencias de corriente entregadas por el DER, como sí se puede diseñar en el control FL. Para controlar el problema de las pérdidas del DER, se utilizará la estrategia mostrada en el trabajo [21] la cual se discutió en la sección 3.3. Por lo tanto, se utilizará una batería (no es la misma que la utilizada en el puerto de batería) conectada al DC link mediante un convertidor boost bi direccional para controlar la tensión en un valor constante de 144 V, mediante un control anidado PI. Se debe tener en consideración que esta batería externa no opera

como un puerto extra en el sistema y no participa activamente de la transferencia de energía como ocurre con los puertos del supercapacitor, la batería y la carga.

Para probar los distintos controladores no lineales utilizados en conjunto con el DER, se utilizará un perfil de carga que incluye consumo y regeneración al sistema, lo cual permitirá obtener un comportamiento cercano al que puede ocurrir con la carga en un sistema real. A los 0.5 segundos la carga regenera 700 W de potencia al sistema, a los 1.2 segundos la carga pasa a consumir 1500 W, a los 3 segundos la carga disminuye su potencia a 400 W y finalmente a los 4 segundos la carga deja de operar.

En la Fig. 4.1 se muestran los parámetros α_j que se diseñan para operar la inyección de energía de cada puerto dependiendo de los requerimientos de la carga. El parámetro α_{load} es generado a partir de la potencia que consume la carga y permite regular los parámetros α_j de los otros 2 puertos. La lógica de transferencia de energía entre los puertos durante la regeneración es que toda la inyección de potencia desde la carga se direcciona al supercapacitor ya que es el único puerto capaz de consumir energía desde el sistema. Se debe tener en cuenta que la batería emula una celda de combustible de hidrógeno, por lo tanto, solo es capaz de inyectar energía hacia el sistema y no de requerir energía desde el sistema. Por otro lado, cuando la carga demanda un escalón de potencia, la batería aumenta su potencia con un limitador de rampa hasta suplir completamente la carga; sin embargo, durante el incremento de la potencia de la batería, el puerto del supercapacitor suple la diferencia de potencia.

Los parámetros α_j de cada puerto del sistema permiten definir las potencias en los 3 puertos como se observa en la Fig. 4.2 donde se muestra la potencia del puerto SC, del puerto BAT y del puerto de la carga en ese orden. Se puede apreciar como la potencia de cada puerto se adapta acorde a lo diseñado por los parámetros α_j . En la potencia del puerto de carga se observa el perfil de demanda que debe suplir el sistema durante 5 segundos. Se observa como la potencia del puerto del SC puede seguir la demanda de la carga de forma prácticamente instantánea, mientras la batería incrementa su potencia con limitador de rampa. Se aprecia como en todo momento la demanda se alimenta correctamente del sistema independientemente de las limitaciones tecnológicas de cada puerto.

Las corrientes de los puertos del sistema junto con sus respectivas referencias se pueden ver en la Fig. 4.3 donde se puede observar la efectividad del control de corriente MPC para el seguimiento de referencias. Se puede apreciar en los recuadros de zoom cómo el control tiene un tiempo de estabilización de aproximadamente 0.2 ms y un error de seguimiento máximo de 13 mA que se da en la corriente del puerto SC cuando la referencia es cero, además, el ripple es prácticamente nulo según lo que se observa en las gráficas.

Como se mencionó anteriormente, las pérdidas son reguladas por un puerto auxiliar conectado al DC link para mantener su tensión constante en 144 V, lo que permite regular las pérdidas de manera indirecta. La corriente y la potencia entregadas por el puerto auxiliar se muestran en la Fig. 4.4, las cuales ayudan a alimentar las pérdidas durante la transferencia de energía entre el puerto del SC, el puerto de la BAT y el puerto de la carga.

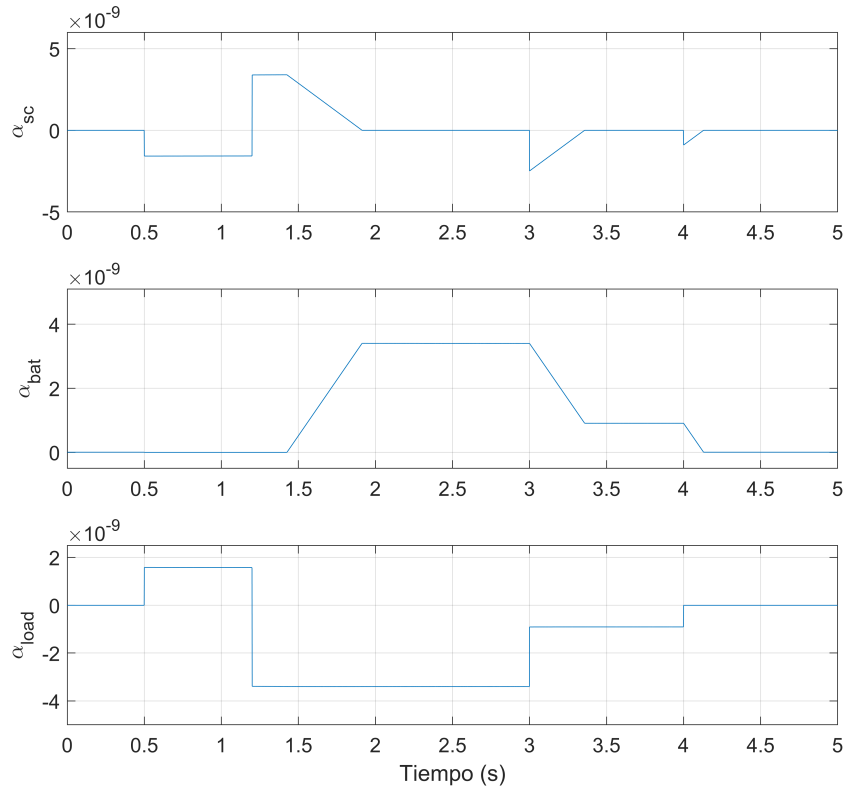


Figura 4.1: Simulación de parámetros α_j ante impactos de carga con control MPC.

Finalmente, la tensión del DC link se mantiene constante gracias a la acción del control PI del puerto auxiliar como se muestra en la Fig. 4.5. La transferencia de energía con el control MPC ocurre de manera óptima y la tensión del DC link se mantiene constante con un error de seguimiento despreciable para la operación del sistema, sin disminuir la efectividad del DER. Esta solución permite alimentar las pérdidas de forma indirecta en el sistema ya que el DER por si solo no es capaz de hacerlo.

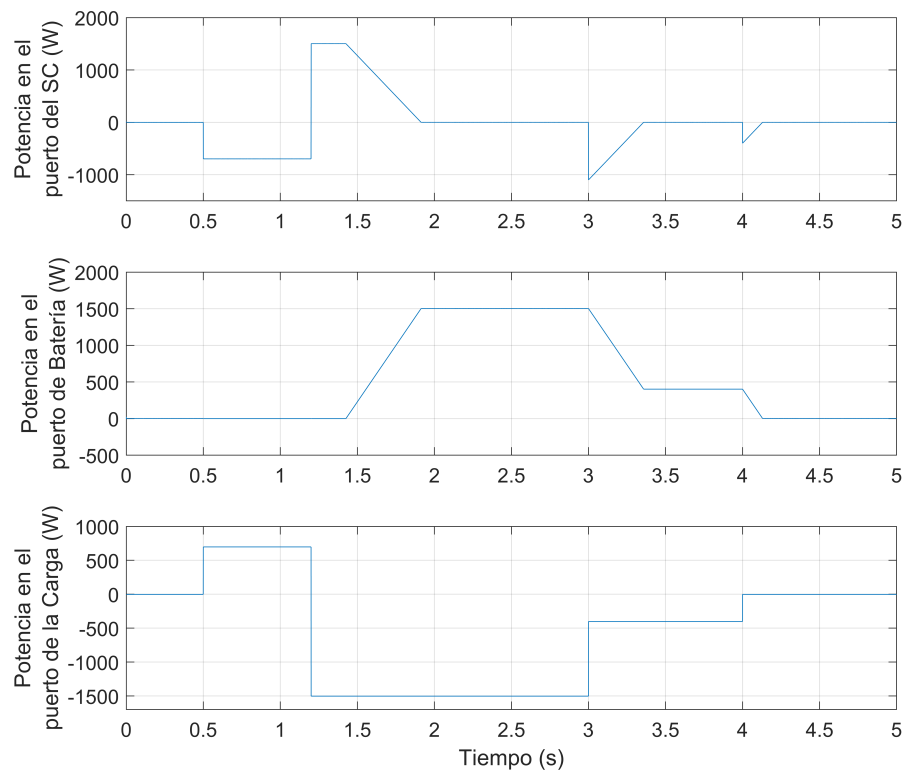


Figura 4.2: Simulación de potencia en los puertos ante distintos impactos de carga con control MPC.

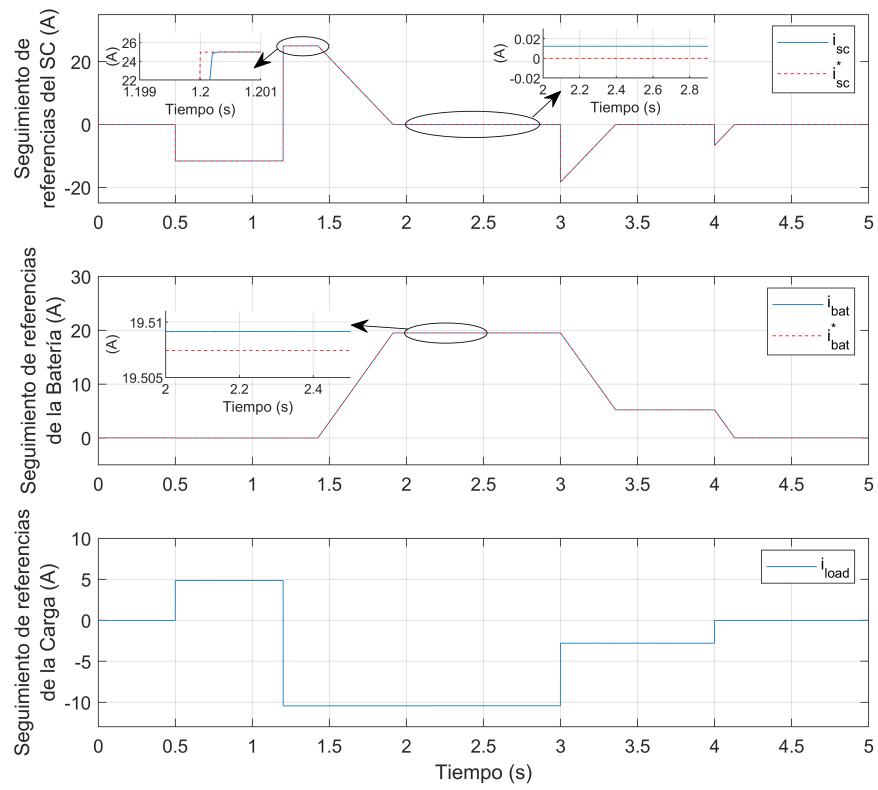


Figura 4.3: Simulación de corrientes en los puertos ante distintos impactos de carga con control MPC.

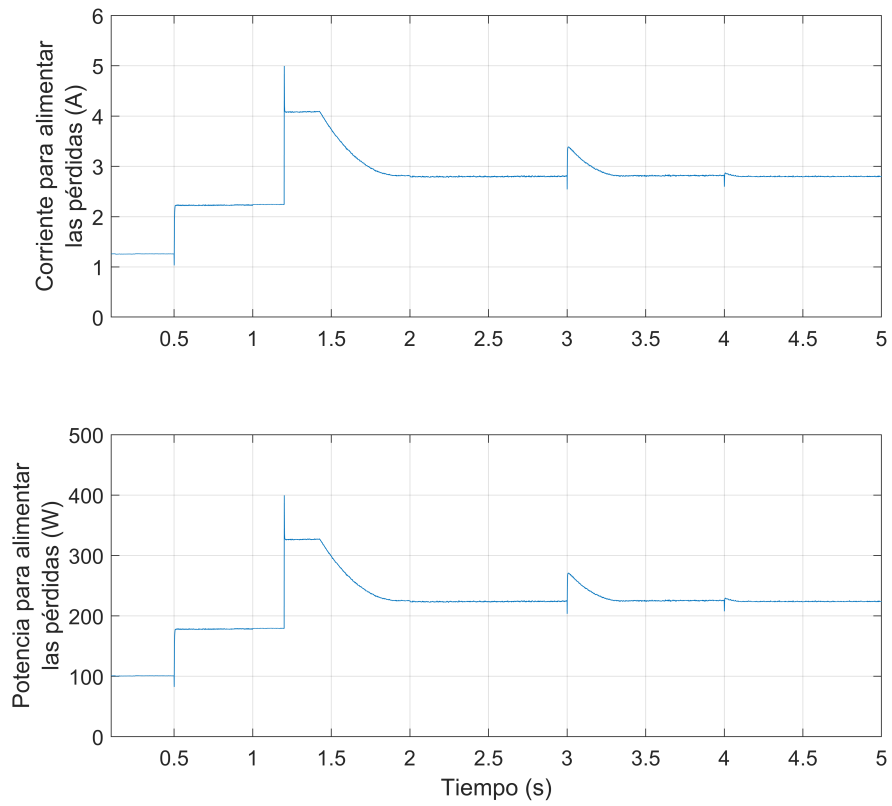


Figura 4.4: Pérdidas del sistema con control MPC.

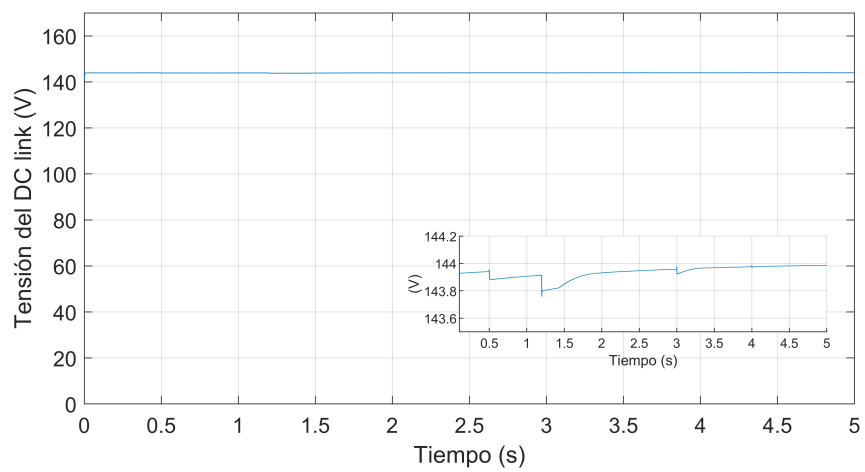


Figura 4.5: Simulación de la tensión del DC link mientras opera el DER ante impactos de carga con control MPC.

Esta página se ha dejado en blanco intencionalmente.

Capítulo 5

Estrategia de Control de Linealización por Retroalimentación

En este capítulo se aborda la estrategia de control por Linealización por Retroalimentación aplicada al Dynamic Energy Router de tres puertos. Se presenta inicialmente el desarrollo matemático, que permite transformar las dinámicas no lineales del sistema en un sistema equivalente lineal para el control. Esta estrategia se diseña para mantener la tensión del DC link constante y para gestionar eficientemente los flujos de energía siguiendo referencias de corriente generadas por el DER. El capítulo se divide en tres partes principales:

- Desarrollar matemáticamente el control FL en el sistema de tres puertos.
- Comparación con el control MPC mediante la simulación bajo el mismo perfil de carga utilizado en el capítulo 4, que incluye fases de regeneración y consumo, para comparar el desempeño dinámico entre ambos controladores.
- Simulación y experimentación con un perfil alternativo de carga. Debido a las limitaciones de la carga electrónica experimental, que opera únicamente en modo de consumo, se simula un segundo perfil de carga sin regeneración para validarlo con datos experimentales. Los resultados de esta validación permiten evaluar la aplicabilidad práctica del controlador Feedback Linearization en sistemas reales.

5.1 Desarrollo Matemático del Control FL

El control de Linealización por Retroalimentación puede ser aplicado a sistemas no lineales de la forma (5.1), donde x representa el estado, u es la señal de control e y representa la salida del sistema.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x) + g(x)u, \\ y &= h(x).\end{aligned}\tag{5.1}$$

El sistema linealizado mediante feedback toma la forma (5.2), donde los estados x son transformados a los estados en z . La expresión $L_f h(x)$ representa la derivada de Lie de la función $h(x)$ a lo largo del vector $f(x)$.

$$\dot{z} = A \begin{bmatrix} L_f^{2-1} h(x) \\ L_f^{3-1} h(x) \\ \dots \\ L_f^{r-1} h(x) \end{bmatrix} + B \left(L_f^r h(x) + L_g L_f^{r-1} h(x) u \right). \quad (5.2)$$

La ley de control que permite linealizar el sistema se encuentra dada por u en (5.3), donde v se obtiene mediante técnicas de control lineales, mientras que u es la entrada al sistema.

$$\begin{aligned} v &= L_f^r h(x) + L_g L_f^{r-1} h(x) u, \\ \longrightarrow u &= \frac{v - L_f^r h(x)}{L_g L_f^{r-1} h(x)}. \end{aligned} \quad (5.3)$$

El grado relativo del sistema es representado por r , $1 \leq r \leq n$ y corresponde a la cantidad de veces que la salida y debe ser derivada con respecto al tiempo para obtener explícitamente la entrada u . El sistema es considerado exactamente linealizado cuando el grado relativo es $r = n$. El sistema es considerado parcialmente linealizado cuando el grado relativo es $r < n$, donde n es la dimensión del vector de estados.

Definiendo la salida del sistema como la corriente de cada puerto, es fácil notar que 2.1, 2.2 y 2.3 tienen grado relativo $r = 1$ ya que la entrada aparece explícitamente en la primera derivada de la corriente, por lo tanto, es posible afirmar que el sistema dinámico de las corrientes de cada puerto es exactamente linealizable.

La ley de control para el FL será aplicada paso a paso para el puerto del supercapacitor y para el puerto de la batería tomando en consideración todas las dinámicas del sistema.

Aplicando la expresión para la ley de control del FL dada por (5.3) en el puerto j , donde $j = \{SC, BAT\}$ se obtiene de forma genérica (5.5).

$$u_j = \frac{v_j - \frac{1}{L_j}(v_j - v_{bus}) + i_j \frac{R_j}{L_j}}{\frac{v_{bus}}{L_j}}, \quad (5.4)$$

$$\longrightarrow u_j = \frac{L_j}{v_{bus}} v_j - \frac{v_j}{v_{bus}} + i_j \frac{R_j}{v_{bus}} + 1. \quad (5.5)$$

Definiendo el error de la corriente como (5.6) y la variable v como la derivada de la corriente del puerto j como se expresa en (5.7), es posible obtener la expresión (5.8). Es importante destacar que $\dot{e}$ representa la salida de un control lineal del error de corriente del sistema que se desea controlar, el cual puede ser un PI o simplemente un control proporcional, donde $e_j = 0 \rightarrow \dot{e}_j = 0$, es decir, el control puede hacer seguimiento de referencias llevando el error de la señal a cero o llevando la derivada del error de la señal a cero.

$$e_j = i_j - i_j^* \longrightarrow \dot{e}_j = \frac{di_j}{dt} - \frac{di_j^*}{dt}, \quad (5.6)$$

$$v_j = \frac{di_j}{dt} \longrightarrow v_j = \dot{e}_j + \frac{di_j^*}{dt}, \quad (5.7)$$

$$v_j = \dot{e}_j + \frac{di_j^*}{dt}. \quad (5.8)$$

Por lo tanto, la ley de control para el puerto SC esta dada por (5.9), por otro lado, la ley de control para el puerto BAT está dada por (5.10) y (5.11) para las dos corrientes del convertidor boost interleaved correspondientemente.

$$u_{sc} = -\frac{L_{sc}}{v_{bus}} \left(\frac{v_{sc}}{L_{sc}} - \frac{v_{dc}}{L_{sc}} - i_{sc} \frac{R_{sc}}{L_{sc}} - \frac{di_{sc}^*}{dt} - \dot{e}_{sc} \right). \quad (5.9)$$

$$u_{bat1} = -\frac{L_{bat}}{v_{bus}} \left(\frac{v_{bat}}{L_{bat}} - \frac{v_{dc}}{L_{bat}} - i_{bat} \frac{R_{bat}}{L_{bat}} - \frac{di_{bat1}^*}{dt} - \dot{e}_{bat1} \right). \quad (5.10)$$

$$u_{bat2} = -\frac{L_{bat}}{v_{bus}} \left(\frac{v_{bat}}{L_{bat}} - \frac{v_{dc}}{L_{bat}} - i_{bat} \frac{R_{bat}}{L_{bat}} - \frac{di_{bat2}^*}{dt} - \dot{e}_{bat2} \right). \quad (5.11)$$

Dado que el DER se utiliza para generar las referencias de corriente en todos los puertos del sistema, es posible expresar la derivada de la referencia de corriente de la expresión de u_{sc} , de la expresión u_{bat1} y de la expresión u_{bat2} en función de los

parámetros α_{jk} . Luego, derivando la expresión para la referencia de corriente entregada por el DER (3.18) para los puertos del supercapacitor y de la batería se obtiene (5.12), (5.13) y (5.14) respectivamente. Esto teniendo en cuenta la conexión interleaved de la batería.

$$\frac{di_{sc}^*}{dt} = \alpha_{sc} v_{bat}^2 v_{load}^2 \frac{dv_{sc}}{dt} + 2\alpha_{sc} v_{sc} v_{bat}^2 v_{load} \frac{dv_{load}}{dt}. \quad (5.12)$$

$$\frac{di_{bat1}^*}{dt} = 2\alpha_{bat1} v_{sc} v_{bat} v_{bus}^2 \frac{dv_{sc}}{dt} + 2\alpha_{bat1} v_{sc}^2 v_{bat} v_{bus} \frac{dv_{bus}}{dt}. \quad (5.13)$$

$$\frac{di_{bat2}^*}{dt} = 2\alpha_{bat2} v_{sc} v_{bat} v_{bus}^2 \frac{dv_{sc}}{dt} + 2\alpha_{bat2} v_{sc}^2 v_{bat} v_{bus} \frac{dv_{bus}}{dt}. \quad (5.14)$$

Dado que la carga es un puerto que se conecta directamente al DC link, se tiene $v_{load} = v_{bus}$ ya que son la misma tensión. Teniendo en cuenta la ecuación dinámica del SC (2.4) y la ecuación dinámica del DC link (2.5) se logra (5.15), (5.16) y (5.17).

$$\begin{aligned} \frac{di_{sc}^*}{dt} = & -\alpha_{sc} v_{bat}^2 v_{bus}^2 \frac{i_{sc}}{C_{sc}} + 2\alpha_{sc} v_{sc} v_{bat}^2 v_{bus} \frac{i_{load} + i_{sc} + i_{bat1} + i_{bat2}}{C_{DClink}} \\ & - 2\alpha_{sc} v_{sc} v_{bat}^2 v_{bus} \frac{i_{sc}}{C_{DClink}} u_{sc} - 2\alpha_{sc} v_{sc} v_{bat}^2 v_{bus} \frac{i_{bat1} u_{bat1} + i_{bat2} u_{bat2}}{C_{DClink}}. \end{aligned} \quad (5.15)$$

$$\begin{aligned} \frac{di_{bat1}^*}{dt} = & -\alpha_{bat1} v_{sc} v_{bat} v_{bus}^2 \frac{i_{sc}}{C_{sc}} + 2\alpha_{bat1} v_{sc}^2 v_{bat} v_{bus} \frac{i_{load} + i_{sc} + i_{bat1} + i_{bat2}}{C_{DClink}} \\ & - 2\alpha_{bat1} v_{sc}^2 v_{bat} v_{bus} \frac{i_{bat1} u_{bat1}}{C_{DClink}} - 2\alpha_{bat1} v_{sc}^2 v_{bat} v_{bus} \frac{i_{sc} u_{sc} + i_{bat2} u_{bat2}}{C_{DClink}}. \end{aligned} \quad (5.16)$$

$$\begin{aligned} \frac{di_{bat2}^*}{dt} = & -\alpha_{bat2} v_{sc} v_{bat} v_{bus}^2 \frac{i_{sc}}{C_{sc}} + 2\alpha_{bat2} v_{sc}^2 v_{bat} v_{bus} \frac{i_{load} + i_{sc} + i_{bat1} + i_{bat2}}{C_{DCLink}} \\ & - 2\alpha_{bat2} v_{sc}^2 v_{bat} v_{bus} \frac{i_{bat2} u_{bat2}}{C_{DCLink}} - 2\alpha_{bat2} v_{sc}^2 v_{bat} v_{bus} \frac{i_{sc} u_{sc} + i_{bat1} u_{bat1}}{C_{DCLink}}. \end{aligned} \quad (5.17)$$

Ahora que se tienen las derivadas de las referencias de corriente, se puede reemplazar (5.15), (5.16) y (5.17) en (5.9), (5.10) y (5.11) respectivamente. De lo anterior, se obtienen las ecuaciones (5.18), (5.19) y (5.20).

$$\begin{aligned} u_{sc} = A_{sc} \left(2\alpha_{sc} v_{sc} v_{bat}^2 v_{bus} \frac{(i_{load} + i_{sc} + i_{bat1} + i_{bat2})}{C_{DCLink}} - \alpha_{sc} v_{bat}^2 v_{bus}^2 \frac{i_{sc}}{C_{sc}} \right. \\ \left. - 2\alpha_{sc} v_{sc} v_{bat}^2 v_{bus} \frac{(i_{bat1} u_{bat1} + i_{bat2} u_{bat2})}{C_{DCLink}} + \frac{v_{bus} - v_{sc} + i_{sc} R_{sc}}{L_{sc}} + \dot{e}_{sc} \right). \end{aligned} \quad (5.18)$$

$$\begin{aligned} u_{bat1} = A_{bat1} \left(2\alpha_{bat1} v_{sc}^2 v_{bat} v_{bus} \frac{(i_{load} + i_{sc} + i_{bat1} + i_{bat2})}{C_{DCLink}} - 2\alpha_{bat1} v_{sc} v_{bat} v_{bus}^2 \frac{i_{sc}}{C_{sc}} \right. \\ \left. - 2\alpha_{bat1} v_{sc}^2 v_{bat} v_{bus} \frac{(i_{sc} u_{sc} + i_{bat2} u_{bat2})}{C_{DCLink}} + \frac{v_{bus} - v_{bat} + i_{bat1} R_{bat}}{L_{bat}} + \dot{e}_{bat1} \right). \end{aligned} \quad (5.19)$$

$$\begin{aligned} u_{bat2} = A_{bat2} \left(2\alpha_{bat2} v_{sc}^2 v_{bat} v_{bus} \frac{(i_{load} + i_{sc} + i_{bat1} + i_{bat2})}{C_{DCLink}} - 2\alpha_{bat2} v_{sc} v_{bat} v_{bus}^2 \frac{i_{sc}}{C_{sc}} \right. \\ \left. - 2\alpha_{bat2} v_{sc}^2 v_{bat} v_{bus} \frac{(i_{sc} u_{sc} + i_{bat1} u_{bat1})}{C_{DCLink}} + \frac{v_{bus} - v_{bat} + i_{bat2} R_{bat}}{L_{bat}} + \dot{e}_{bat2} \right). \end{aligned} \quad (5.20)$$

Donde se definen las variables A_{sc} , A_{bat1} y A_{bat2} en (5.21), (5.22) y (5.23) respectivamente solo para simplificar el resultado final.

$$A_{sc} = \frac{L_{sc} C_{DCLink} v_{bus}}{2v_{bus} \alpha_{sc} v_{sc} v_{bat}^2 v_{bus} i_{sc} L_{sc} + v_{bus}^2 C_{DCLink}}. \quad (5.21)$$

$$A_{bat1} = \frac{L_{bat} C_{DCLink} v_{bus}}{2v_{bus} \alpha_{bat1} v_{sc}^2 v_{bat} v_{bus} i_{bat1} L_{bat} + v_{bus}^2 C_{DCLink}}. \quad (5.22)$$

$$A_{bat2} = \frac{L_{bat} C_{DCLink} v_{bus}}{2v_{bus} \alpha_{bat2} v_{sc}^2 v_{bat} v_{bus} i_{bat2} L_{bat} + v_{bus}^2 C_{DCLink}}. \quad (5.23)$$

Además, se debe tener en consideración la relación (5.24) la cual permite que las leyes de control u_{bat1} y u_{bat2} generen en cada pierna del interleaved la mitad de la corriente total que es suministrada o consumida por la batería.

$$\alpha_{bat1} = \alpha_{bat2} = \frac{\alpha_{bat}}{2}. \quad (5.24)$$

Hasta el momento se ha desarrollado la ley de control del FL para el seguimiento de referencias de corriente en los puertos del supercapacitor y de la batería. Se asignará el puerto del SC para mantener la tensión del DC link constante en los 144 V y así suplir las pérdidas de forma indirecta en el sistema, es decir, no se requiere el conocimiento de la función $d_I(t)$. Para lograr el seguimiento de referencias de la tensión del DC link mediante el control FL se define la salida $e_{dc} = v_{dc} - v_{dc}^*$ la cual necesita ser llevada a cero. El supercapacitor puede controlar esta salida e_{dc} incorporándola en la ley de control (5.18) y usando cualquier técnica de control lineal, en este caso se utiliza un PI. Luego la ley de control para el puerto SC con control de corriente y control de la tensión del DC link queda como se muestra en (5.25).

$$u_{sc} = A_{sc} \left(2\alpha_{sc} v_{sc} v_{bat}^2 v_{bus} \frac{(i_{load} + i_{sc} + i_{bat1} + i_{bat2})}{C_{DCLink}} - \alpha_{sc} v_{bat}^2 v_{bus}^2 \frac{i_{sc}}{C_{sc}} \right. \\ \left. - 2\alpha_{sc} v_{sc} v_{bat}^2 v_{bus} \frac{(i_{bat1} u_{bat1} + i_{bat2} u_{bat2})}{C_{DCLink}} + \frac{v_{bus} - v_{sc} + i_{sc} R_{sc}}{L_{sc}} + \dot{e}_{sc} + e_{dc} \right). \quad (5.25)$$

Esta estrategia para compensar las pérdidas permite el seguimiento de las referencias de corriente entregadas por el DER, asegurando la transferencia de energía acorde a la política de gestión definida, mientras se mantiene la tensión del DC link constante agregando un delta de corriente Δi_{sc} a la referencia generada i_{sc}^* .

En la tabla 5.1 se resumen los parámetros de las constantes proporcionales e integrales utilizadas para los controladores lineales de la estrategia FL.

Tabla 5.1: Parámetros de los controladores lineales para el FL.

<i>Salida</i>	k_p	k_I
$\dot{e}_{sc}$	-20000	0
$\dot{e}_{bat}$	-10000	-20000
e_{dc}	300000	100000

5.2 Simulación del DER con Control FL

5.2.1 Comparación con el Control MPC

En esta sección se simula el mismo perfil de carga utilizado con el control MPC para comparar ambos controladores en el seguimiento de referencias dadas por el DER. Es importante mencionar que la regulación de pérdidas del sistema no se hace de la misma forma que con el control MPC ya que el control FL permite de forma simple hacer que un solo puerto regule la tensión del DC link al mismo tiempo que participe activamente de la gestión de energía dada por el DER, es decir, en este caso no se utiliza un puerto auxiliar únicamente para compensar las pérdidas, sino que ese trabajo se hace ahora con el puerto del SC quien suplirá la energía necesaria a las pérdidas.

La generación de los parámetros α_j para el control FL son iguales a los generados para el control MPC ya que no hay variación en de las tensiones del sistema y el perfil de demanda en ambos casos es el mismo, por lo tanto, las gráficas también corresponden a las mostradas en la Fig. 4.1

Dado lo anterior, en la Fig. 5.1 se puede ver la potencia de los 3 puertos. El perfil de demanda de la tercera gráfica es exactamente la misma a la mostrada en la Fig. 4.2 y las gráficas de los otros dos puertos son bastante similares a las del control MPC, pero hay leves diferencias principalmente por el desempeño dinámico de ambos controladores, como se puede observar en la potencia del puerto SC un leve overshoot en el segundo 1.2 el cual se verá con más detalle en la gráfica de corriente. Sin embargo, de forma general el sistema alimenta la carga de la misma forma como ocurre con el control MPC. Se debe tener en cuenta que solo cambia el control con el cual se hace seguimiento de referencias de corriente, pero todo lo demás sigue operando igual.

En la Fig. 5.2 se muestra las corrientes de los 3 puertos con sus respectivas referencias. Se observa como en la corriente del supercapacitor ahora existe un overshoot que sobrepasa en aproximadamente 5 A la referencia, lo que corresponde a un valor de 4.9 % de sobrepaso con respecto a la referencia, como se observa en el cuadro de zoom del escalón en los 1.2 segundos y con un tiempo de estabilización de 0.2 segundos, igual al tiempo de estabilización del control MPC, sin embargo, el overshoot y la dinámica general del control no afecta la correcta operación del DER en el sistema y no ocurren corrientes peligrosas que puedan dañar los equipos. En lo que respecta al error de seguimiento que se aprecia tanto en el cuadro de zoom del puerto SC como del puerto BAT tiene un valor máximo de 190 mA, lo cual es casi 15 veces el error del control

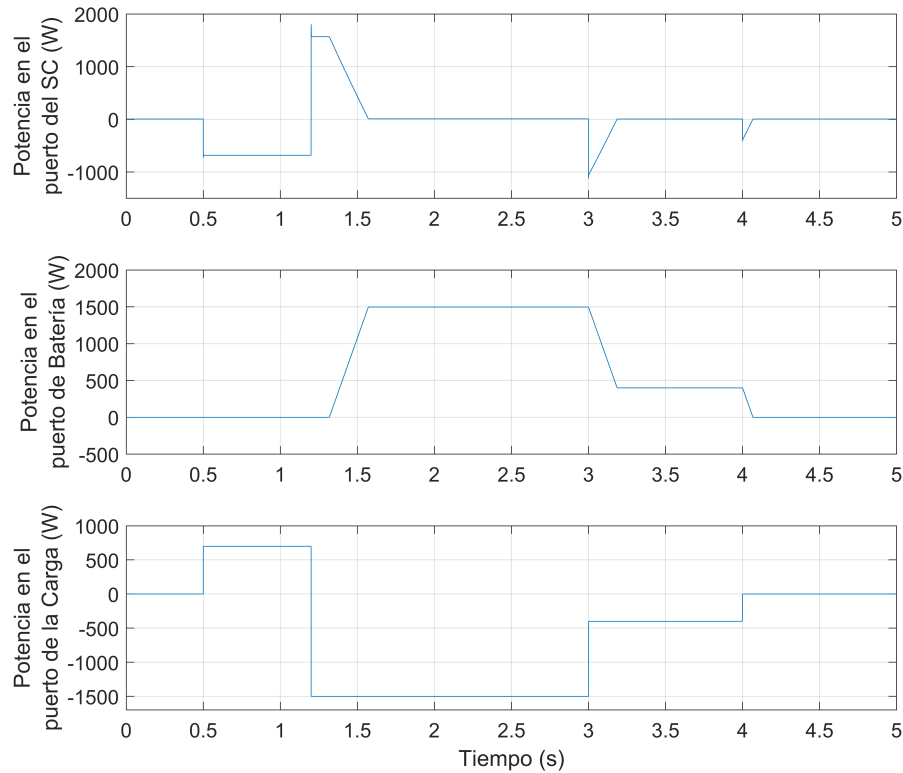


Figura 5.1: Simulación de potencia en los puertos ante impactos de carga con control FL.

MPC, sin embargo, esto se debe principalmente a la estrategia utilizada para el puerto del SC. La ley de control del FL para el puerto del supercapacitor se diseña para seguir la referencia de corriente entregada por el DER y para seguir la referencia de tensión del DC link de 144 V constantes, por lo tanto, como el DER entrega una referencia suponiendo un sistema sin pérdidas, el control agrega un delta de corriente Δi_{sc} al puerto para efectos de mantener la tensión constante, es decir, permite efectuar la alimentación indirecta de las pérdidas del sistema. Por lo tanto, es lógico que en este puerto existirá un error de seguimiento mayor ya que la referencia como tal no está considerando este delta de corriente destinado al control indirecto de las pérdidas.

En la Fig. 5.3 se muestra la tensión del DC link con el control FL teniendo en cuenta que es regulada por el puerto del SC. El error de seguimiento de referencia de la tensión es prácticamente despreciable, incluso es menor al error producido por el control de tensión que entrega un puerto auxiliar como ocurre con el control MPC y como se aprecia en la Fig. 4.5.

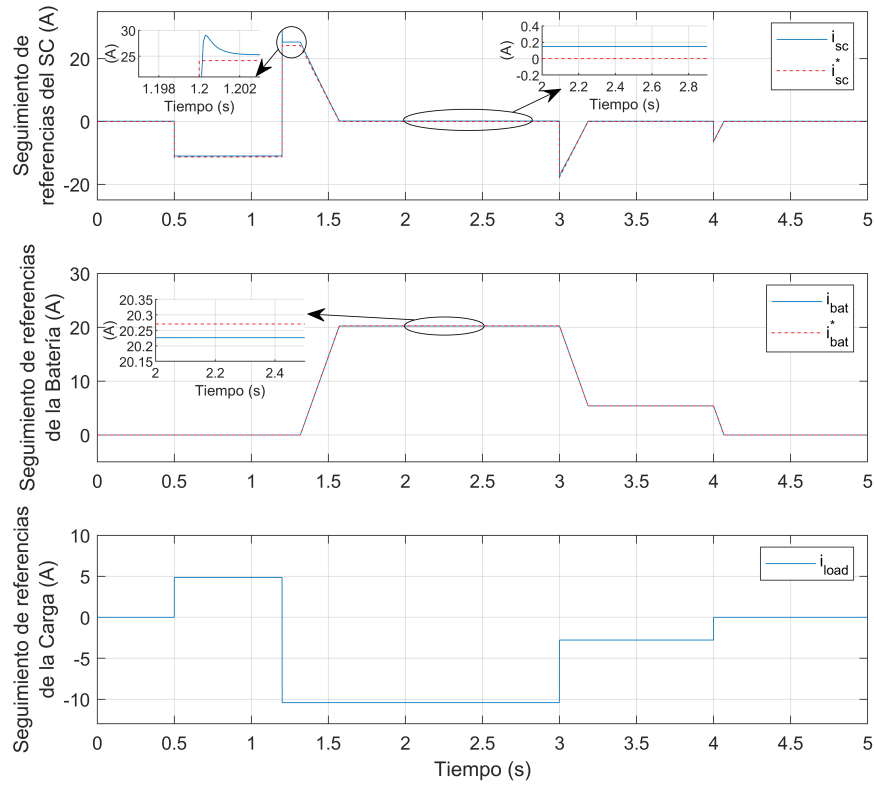


Figura 5.2: Simulación de corrientes en todos los puertos del sistema ante impactos de carga con control FL.

5.2.2 Simulación con un Perfil de Carga Real

Para el control FL se simulará el DER con distintos impactos de carga para ver como se adapta el sistema acorde a la estrategia de control definida. Luego se realiza un experimento que valide el comportamiento del DER para 3 puertos.

El sistema se simula con distintos escalones de potencia que simulan la demanda de la carga con valores de 200, 800, 400, 1500, 700 y 0 W respectivamente. La idea es que el sistema se adapte de forma de suplir la demanda sin problemas, por otro lado, este mismo esquema de simulación se probará experimentalmente más adelante. La máxima potencia con la que se simulará el DER es con 1500 W, sin embargo, este gestor de energía en el sistema multi puerto puede ser fácilmente ampliable a distintos niveles de potencia incluso mayores.

En la Fig. 5.4 se aprecia como los parámetros α_j de los puertos de la batería y del supercapacitor se generan para alimentar la demanda acorde a la política de gestión previamente definida. En un vehículo alimentado con celdas de hidrógeno, este actúa como la fuente principal de energía por su alta energía específica y el supercapacitor actúa como la fuente secundaria por su alta potencia específica, ya que permite alimentar

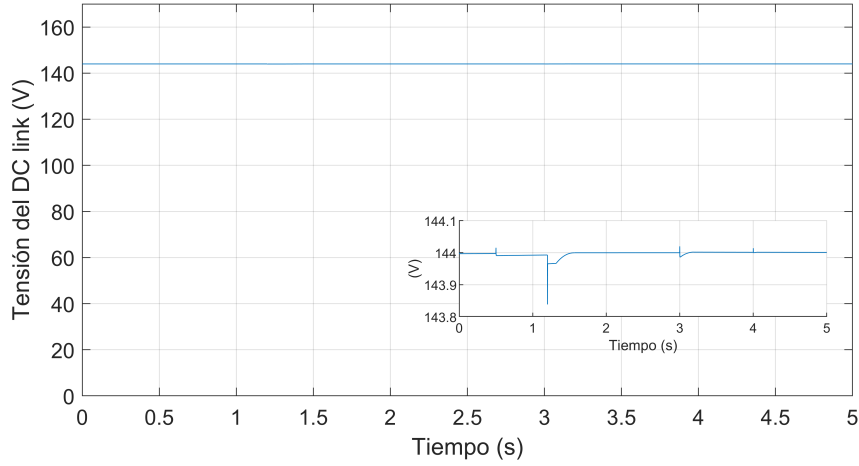


Figura 5.3: Simulación de la tensión del DC link mientras opera el DER ante impactos de carga con control FL.

la carga en los peaks de demanda. Lo anterior tiene su fundamento en prolongar la vida útil y para no estresar eléctricamente la celda de combustible de hidrógeno. En este caso, la batería se simula como una fuente de hidrógeno, lo que se hace principalmente limitando las rampas de potencia del puerto y obligando a que el flujo de potencia del puerto sea solo unidireccional hacia el sistema ya que realmente las celdas de combustible no pueden almacenar energía. Se observa como el parámetro α_{bat} trata de seguir la demanda de la carga, pero con la limitación de rampa propia de las celdas de combustible, por lo tanto, el supercapacitor aporta esa diferencia de energía como se muestra en la primera gráfica de la Fig. 5.4.

Es fácil notar que las potencias de la Fig. 5.5 tienen una forma similar a las gráficas de los parámetros α_j de la Fig. 5.4 lo que se debe principalmente a que el parámetro α_j define la potencia del puerto j como se puede apreciar en (3.19). En este caso, se puede apreciar nuevamente como el puerto del supercapacitor entrega la diferencia de potencia que no puede entregar la batería, principalmente, en el instante cuando ocurre el escalón de demanda por parte de la carga.

Es importante destacar que el esquema de control se diseña para que el puerto del supercapacitor controle la tensión del DC link al mismo tiempo que permite el seguimiento de las referencias entregadas por el DER. Lo anterior implica que va a suplir las pérdidas del sistema para evitar que la tensión del DC link disminuya haciendo que la potencia real del puerto sea siempre levemente mayor a la potencia de referencia entregada por el DER, teniendo en cuenta que el DER entrega la referencia suponiendo que el sistema no tiene pérdidas. Si el sistema no tuviera pérdidas, una vez que la batería alimenta completamente la carga, la potencia del supercapacitor debería ser cero hasta que no ocurra nuevamente un escalón de potencia en la carga, sin embargo, en la Fig. 5.5 se observa que la potencia del puerto no llega a cero, sino que llega a un valor cercano a los 400 W. Lo anterior se hizo a propósito para simular lo que ocurre en los resultados

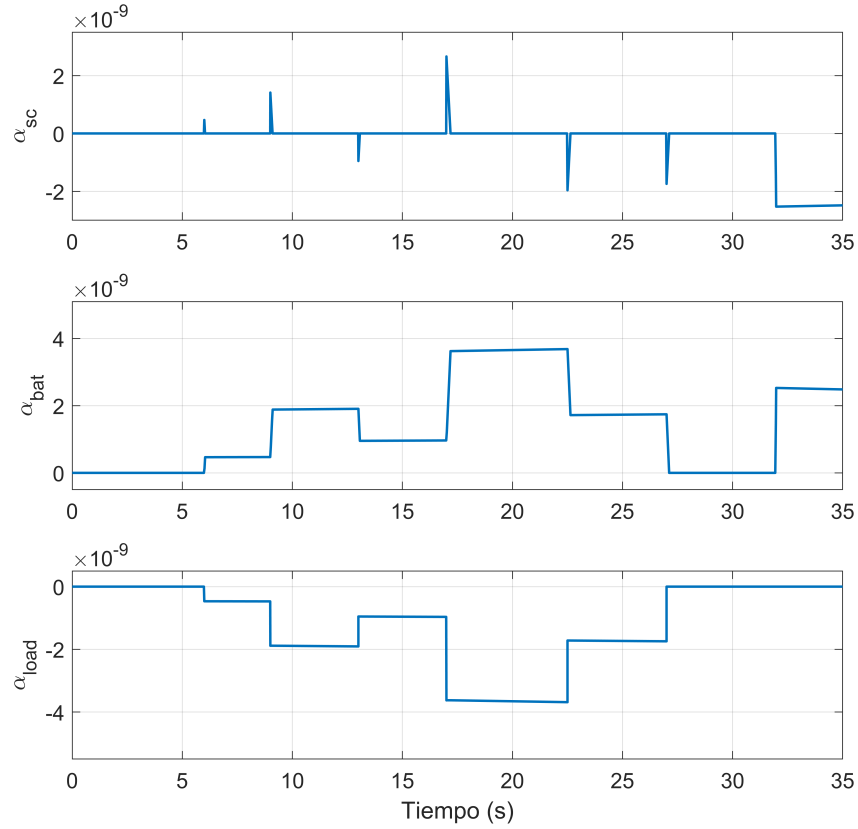


Figura 5.4: Simulación de parámetros α_j ante impactos de carga reales con control FL.

experimentales que se mostrarán más adelante. El sistema real tiene una resistencia que no se pudo identificar físicamente entre el puerto de la batería y el DC link, lo cual genera que el puerto del supercapacitor deba considerarla como pérdida y, por lo tanto, suplir esa potencia para evitar que el DC link varíe de su valor de operación. Mientras el supercapacitor sea capaz de suplir las pérdidas del sistema (incluida las pérdidas generadas por las resistencias sin identificar en el sistema), además de entregar la potencia requerida por el DER, el sistema debería operar normalmente.

En base a lo anterior, es fácil darse cuenta que el puerto del supercapacitor alimenta las pérdidas motivo por el cual su potencia de puerto no llega a cero en los instantes donde debería ser cero, sin embargo, en la Fig. 5.4 no se refleja eso en el parámetro α_{sc} ya que este parámetro si llega a cero. Esto se debe a lo mencionado en otras ocasiones, que el DER no considera las pérdidas, por lo tanto, entrega las referencias suponiendo que el puerto no debe suplir nada más que las referencias requeridas para alimentar la demanda.

Lo anterior se puede ver con mayor detalle en la Fig. 5.6, donde se detallan un aumento de demanda y una disminución de demanda tanto para la potencia del supercapacitor

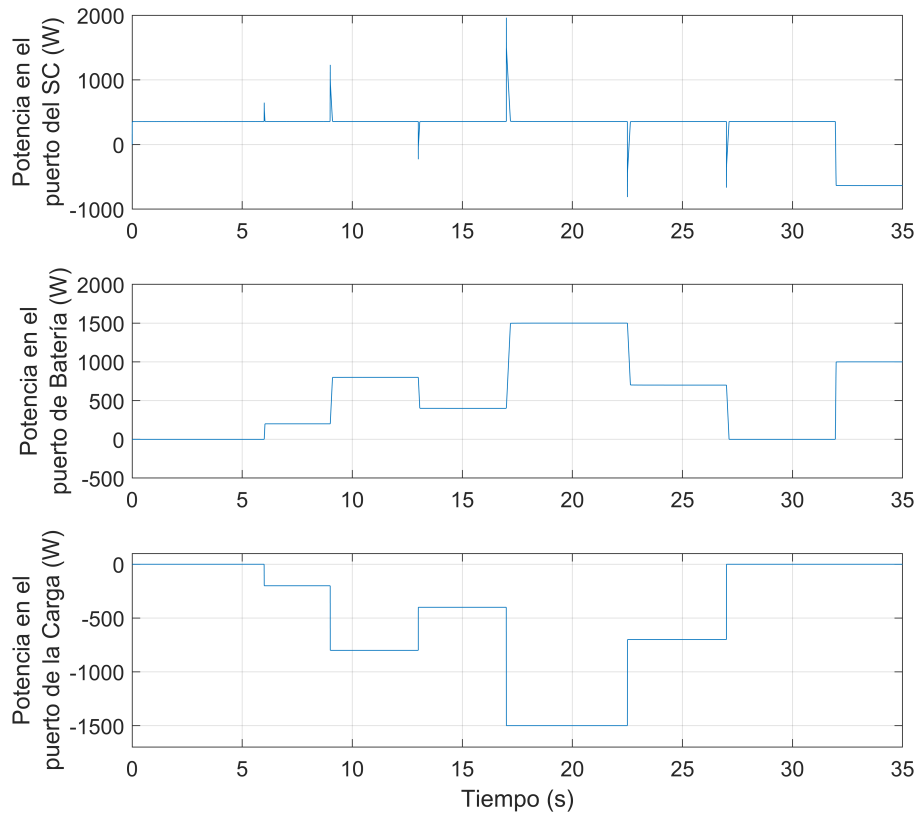


Figura 5.5: Simulación de potencia en los puertos ante impactos de carga reales con control FL.

como para la potencia de la batería. En la gráfica de potencia de la batería se observa como, tras ocurrir el escalón de demanda, la batería la trata de suplir completamente, pero en el tiempo que la batería aumenta su potencia entregada, el supercapacitor actúa entregando la potencia faltante hasta que la batería logra suplir completamente toda la demanda.

En la Fig. 5.7 se muestran las corrientes de los 3 puertos del sistema con sus respectivas referencias. Se aprecia nuevamente como el supercapacitor actúa como fuente secundaria para suplir los peaks de potencia requeridos por la carga. De forma general, se aprecia como el control tiene un buen comportamiento dinámico y en la batería el seguimiento de referencia es básicamente perfecto. Sin embargo, en el supercapacitor hay un error de seguimiento que no es asociado a una mala sintonización del control, sino que la referencia mostrada es la que entrega el DER para el puerto y, como se ha mencionado anteriormente, el control se diseñó para que el puerto regule las pérdidas controlando la tensión del dc link, por lo tanto, ese error corresponde a la corriente necesaria para suplir las pérdidas del sistema, las cuales no se ven reflejadas

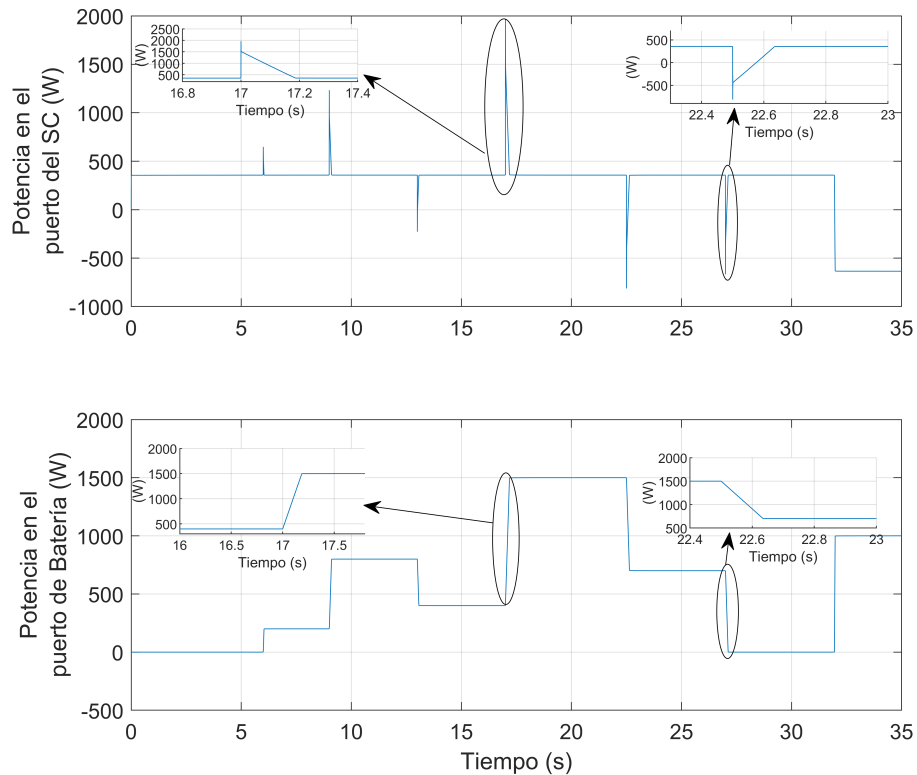


Figura 5.6: Detalle de la simulación de potencia en los puertos ante impactos de carga reales con control FL.

en el DER.

En la Fig. 5.8 se aprecian las gráficas de errores para los seguimientos de referencia de corriente en los puertos de batería y supercapacitor. Se aprecia como el puerto de la batería tiene un error despreciable, pero el puerto del supercapacitor tiene un error considerable lo que se debe a lo comentado anteriormente respecto a la gestión de las pérdidas por parte de este puerto. Se aprecia que existen unos peaks que llegan incluso más allá de los 10 A, sin embargo, esto se debe al tiempo de estabilización que tiene la corriente para llegar a su referencia, teniendo en cuenta que no se sigue referencia de forma instantánea.

Finalmente, en la Fig. 5.9 se aprecian las tensiones de los puertos del sistema y la tensión del DC link. De forma general no hay variaciones importantes teniendo en cuenta que la batería se simula como una fuente de tensión constante y que el supercapacitor almacena una gran cantidad de energía evitando que se descargue rápidamente, por otro lado, el supercapacitor tiene incorporada una lógica de carga y descarga para mantener la tensión de este puerto dentro de un rango preestablecido. En el recuadro de zoom de la tensión del DC link se aprecia como el seguimiento de la referencia de los 144 V es prácticamente perfecto pese a que al mismo tiempo se está gestionando la energía entre

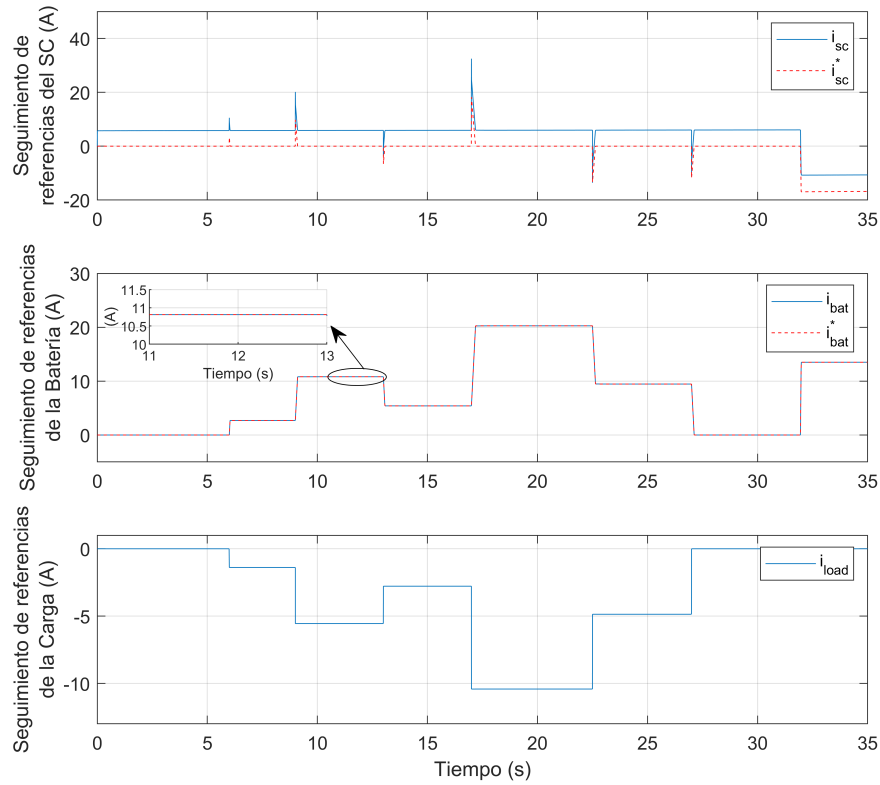


Figura 5.7: Simulación de corrientes en todos los puertos del sistema ante impactos de carga reales con control FL.

los distintos puertos del sistema. En lo que respecta al supercapacitor, la lógica de carga y descarga opera como un lazo de histéresis que permite descargar la tensión cuando esta sobre pasa el valor límite y carga la tensión con el puerto de la batería cuando se encuentra por debajo del valor límite. La descarga inicia cuando la tensión sobre pasa el valor límite y consiste en alimentar el requerimiento de la carga completamente con el supercapacitor hasta que la tensión vuelve a sus valores de operación normal, luego el sistema vuelve a alimentar la carga mediante la batería.

Es posible establecer mecanismos de carga y descarga para el SC de forma simple durante la operación del sistema. La idea es mantener la tensión del SC v_{sc} dentro de los límites de operación para evitar daños por sobre tensión en el sistema o en el propio SC como se observa en la Fig. 5.10. La tensión máxima de operación es de 129 V, pero por seguridad se trabaja con 60 V como límite superior y se diseña la lógica de carga y descarga para mantener la tensión entre 57 V y 65 V. Cuando la tensión se encuentra bajo el nivel pre establecido, se carga con la batería mientras esta alimenta la carga. Por otro lado, cuando la tensión del SC se eleva por sobre el límite pre establecido, lo cual puede ocurrir al regenerar, se comienza a utilizar el SC como fuente de alimentación primaria

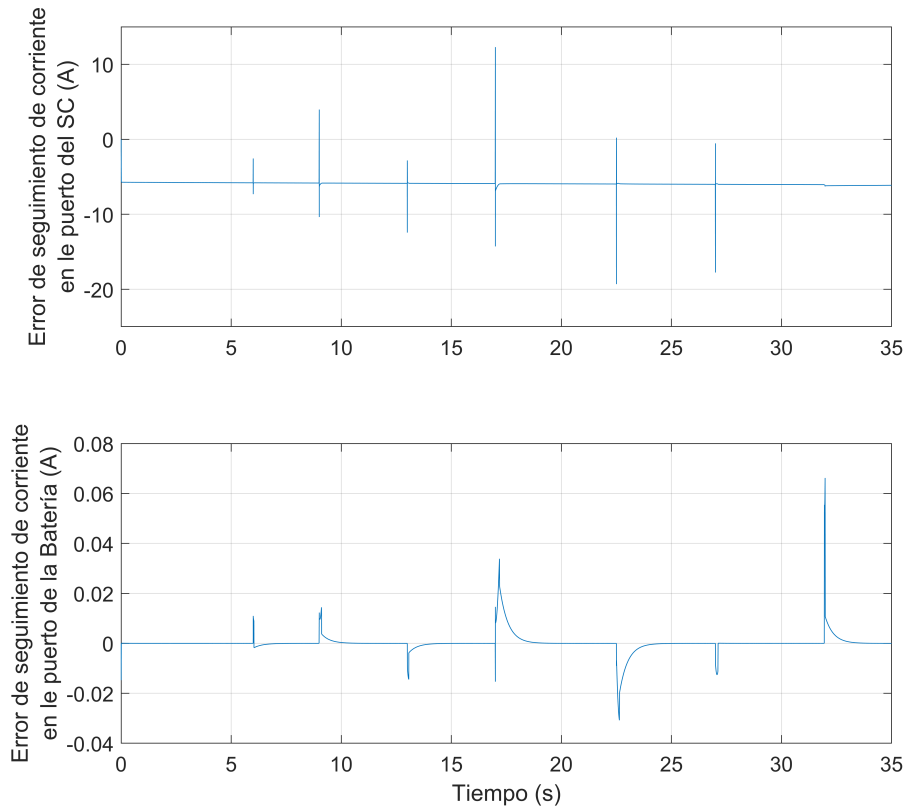


Figura 5.8: Error de seguimiento de corriente para la simulación de distintos impactos de carga.

(dejando la batería sin suministrar energía al sistema) hasta que el supercapacitor alcance una tensión de operación normal, para luego operar nuevamente con la batería como fuente primaria de energía. Se puede observar como los puertos deben adaptar las corrientes a esta lógica de carga y descarga del SC.

5.3 Validación Experimental del Control FL

Para experimentar el DER en el sistema de 3 puertos se deben tener en cuenta algunas consideraciones que se deben realizar para evitar quemar alguno de los equipos. El primero es que las tensiones de los condensadores (incluyendo el supercapacitor) inicialmente no se encuentran a la tensión de operación, por otro lado, se debe verificar que la tensión inicial de la batería o del supercapacitor sea menor a la tensión del DC link o en su defecto se encuentren sin conexión al sistema mediante un interruptor manual; esto para evitar un cortocircuito entre el puerto y la fuente. Lo anterior implica efectuar un procedimiento de inicio del sistema para operar de forma normal el DER. En este caso, cada puerto tiene la opción de conectarse y desconectarse de forma manual

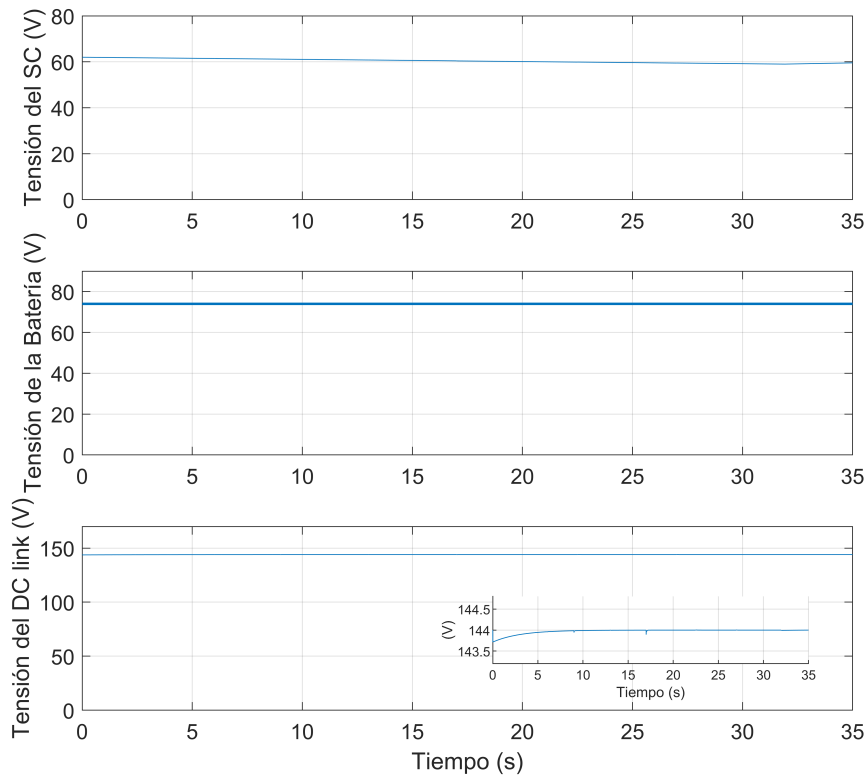


Figura 5.9: Simulación de tensiones en el sistema mientras opera el DER con impactos de carga.

mediante un interruptor.

Para iniciar la operación, se debe cargar primeramente el DC link hasta los 144 V que es la tensión de operación normal. Lo anterior se hace por etapas como se muestra en la Fig. 5.11. En primera instancia se carga el DC link con el puerto de batería mediante un circuito de pre carga con una resistencia de aproximadamente 100Ω que evita una sobre corriente, este circuito se conecta de forma manual y lleva el DC link a 74 V que es la tensión inicial de la batería. Cuando la tensión del DC link llega a la tensión de la batería, se conecta el puerto de la batería y se desconecta el circuito de pre carga. Luego a los 16 segundos se inicia el control PI de tensión con una tensión inicial de referencia de 80 V para evitar sobre corrientes, luego a los 22 segundos la referencia aumenta con un limitador de rampa hasta los 144 V como se aprecia en el recuadro amplificador de la Fig. 5.11

En la Fig. 5.12 se muestra la corriente del puerto de la batería durante el inicio de la operación del sistema. Se aprecian principalmente los dos escalones de referencia de tensión dados por el control PI. Una vez que la tensión se establezca en los 144 V, realmente la referencia de corriente debería ser un valor cercano a cero, pero en este caso se aprecia que la corriente se estaciona cercano a los 5 A. Lo anterior se debe a que se

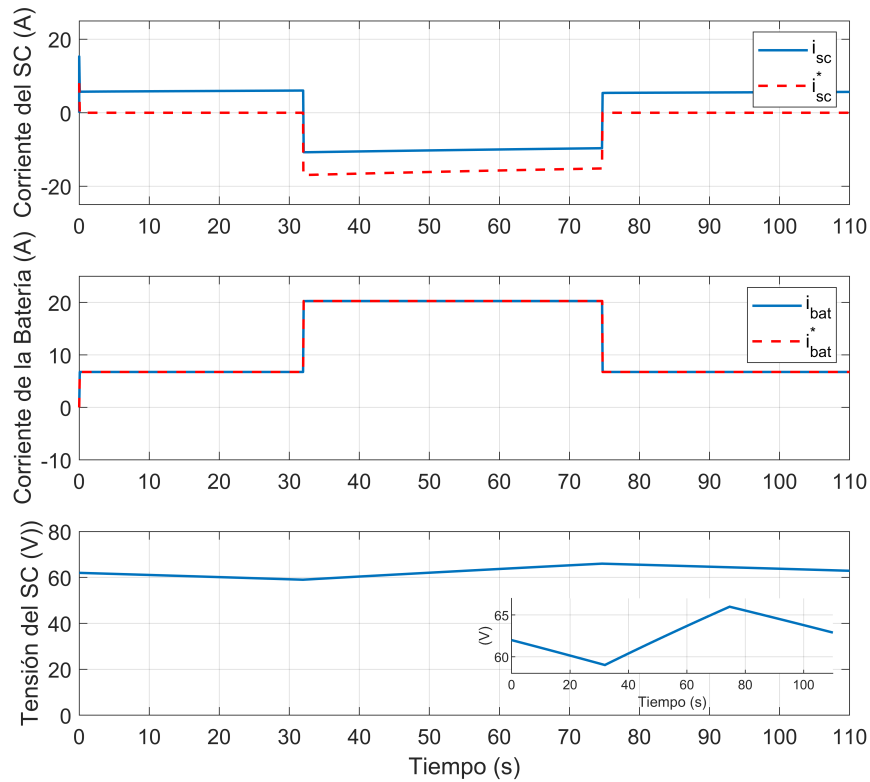


Figura 5.10: Simulación de lógica de carga y descarga para el supercapacitor con el DER.

trabaja en el sistema de la camioneta reconvertida a hidrógeno y en alguna parte existía una resistencia conectada entre el puerto de la batería y el DC link que no pudo ser identificado, por lo tanto, existe esta corriente que representa las pérdidas del sistema por la presencia de este elemento indeseado, sin embargo, se trabajará teniendo en cuenta esta fuga de corriente y el sistema simplemente la tratará como si fueran pérdidas a nivel general.

5.3.1 Experimentación con control FL

Para probar el DER se configura la carga electrónica para demandar 200, 800, 400, 1500, 700 y 0 W de potencia en ese orden respectivamente. La idea es que el sistema se adapte para suplir la demanda requerida por la carga electrónica ante los distintos impactos de carga.

Como se ha mencionado anteriormente, el DER genera las referencias de corriente en los distintos puertos del sistema acorde a una política de gestión de energía previamente definida. El usuario define la política mediante el ajuste de los parámetros α_{jk} los cuales posteriormente definen la potencia en cada puerto, esto teniendo en consideración que

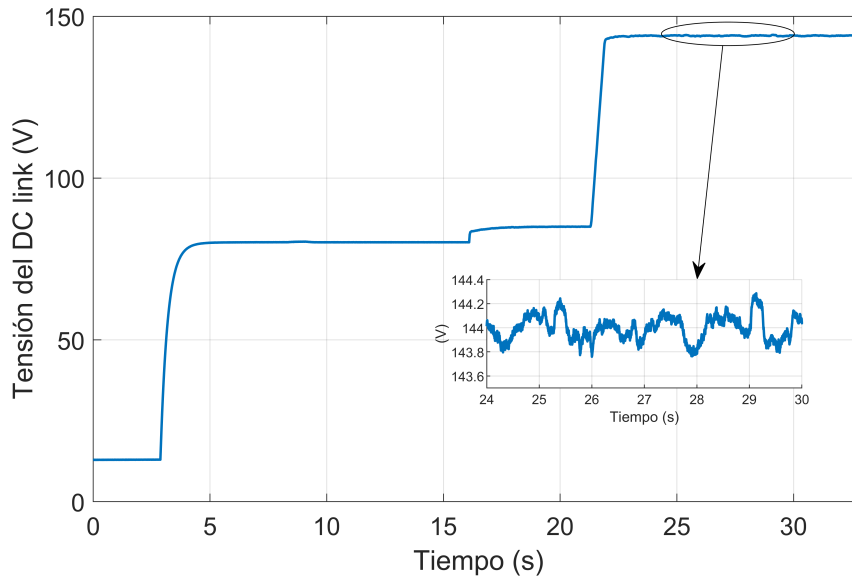


Figura 5.11: Tensión del dc link durante la partida.

la batería actúa como fuente principal y el supercapacitor como fuente secundaria de energía en el sistema. Esto se aprecia en la Fig. 5.13 donde se grafican los parámetros α_{sc} , α_{bat} y α_{load} generados por los escalones de carga de la siguiente manera: en el segundo 6 ocurre el primer escalón a los 200 W, a los 9 segundos se logran los 800 W, a los 13 segundos la carga disminuye a los 400 W, a los 17 segundos la carga aumenta a 1500 W, a los 22.5 segundos la carga disminuye a los 700 W y finalmente a los 27 segundos la carga deja de demandar potencia al sistema.

En la Fig. 5.14 se muestra la potencia inyectada o consumida por cada puerto del sistema. En la tercera gráfica se aprecia los escalones de potencia requeridos por la carga, mientras que en la primera y segunda gráfica se presentan la potencia del supercapacitor y de la batería respectivamente. Lo primero que se puede notar es que las gráficas de α_{jk} en la Fig. 5.13 y las gráficas de potencia 5.14 tienen un perfil muy similar, esto ocurre por la forma en la que se define las referencias de potencia dadas por el DER en (3.19), donde la potencia es directamente proporcional al parámetro α_{jk} , por lo tanto, si es que las tensiones tienen poca variación es de esperar que las curvas de alfa y las curvas de las respectivas potencias sean similares.

Es importante mencionar que la celda de combustible de hidrógeno tiene dinámicas que suelen ser más lentas que otros dispositivos de almacenamiento de energía, por lo tanto, se acompaña con el supercapacitor el cual es capaz de aportar la potencia específica necesaria para suplir la diferencia que la celda no puede aportar en los peaks de demanda. En este caso, se usa una batería, pero se simula de forma exagerada una celda de combustible limitando las rampas de subida y de bajada para evitar que la batería supla de forma instantánea la demanda, por lo tanto, el supercapacitor se hace cargo de esa diferencia faltante mientras la batería llega a la potencia requerida por

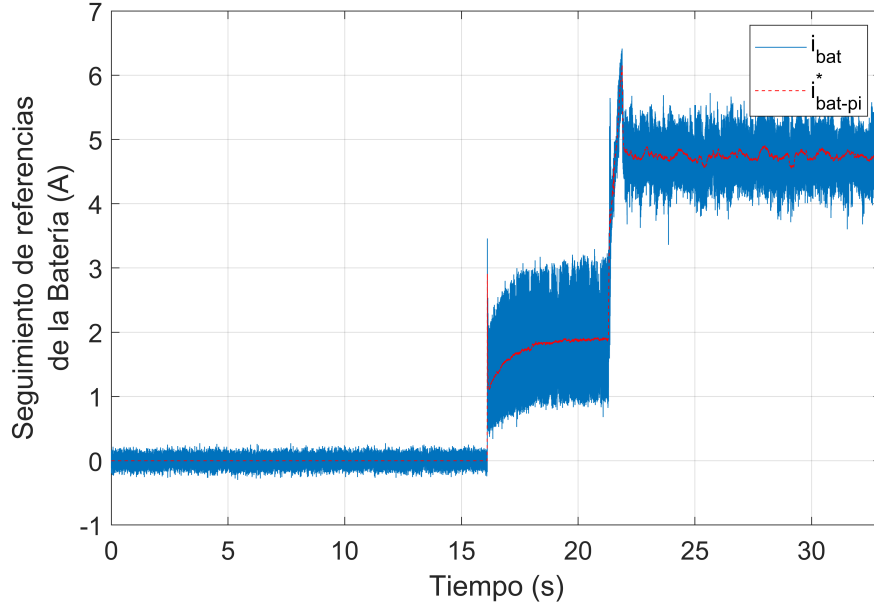


Figura 5.12: Seguimiento de referencia de corriente del control PI durante la partida.

la carga. Lo anterior se aprecia en forma macro en la curva de potencia de la batería donde al cambiar de una potencia a otra existe una leve rampa que no se distingue considerablemente por la gran ventana de tiempo existente. En la gráfica de potencia del supercondensador se aprecian unos peaks de potencia en cortos periodos de tiempo que permiten cumplir con la condición $P_{load} = P_{sc} + P_{bat}$ y así mantener la carga con el suministro de potencia que requiere en todo momento, principalmente en los periodos donde la potencia de la batería aumenta o disminuye con la limitación de rampa. En la Fig. 5.15 se muestra el detalle de lo que ocurre durante la demanda de escalón y se observa claramente como en la segunda gráfica la potencia de la batería aumenta con la limitación de rampa y en la primera gráfica la potencia del supercapacitor se adapta para suplir esa diferencia. Lo anterior ocurre en cada escalón de potencia demandada por la carga.

Es fácil notar en la Fig. 5.14 que la potencia de la batería llega a cero cuando la carga no demanda potencia, pero por el contrario, la potencia del SC se mantiene de forma constante en un valor cercano a los 800 W mientras la batería se encuentra suministrando toda la potencia demandada por la carga. Lo anterior se debe principalmente al diseño de la gestión de energía donde se asigna al puerto del supercapacitor para alimentar todas las pérdidas del sistema manteniendo la tensión del DC link constante en los 144 V, por lo tanto al haber, además, una corriente parásita se tiene que esos 800 W corresponden a todas las pérdidas que tiene el sistema. Eventualmente si el sistema fuera conservativo, la potencia del puerto del supercapacitor llegaría a cero ya que no habrían pérdidas que suplir.

En la Fig. 5.16 se muestra la corriente con sus respectivas referencias para los 3

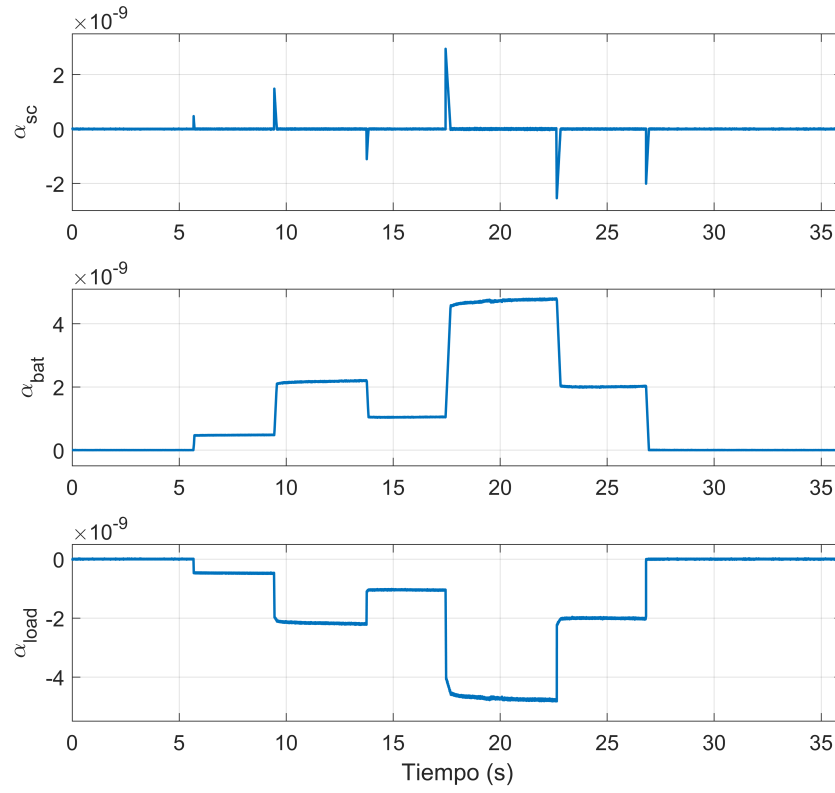


Figura 5.13: Generación del parámetro α_{jk} en el DER.

puertos del sistema. Al igual como ocurre con las gráficas de potencia, se observa como las corrientes varían acorde a las variaciones de demanda. En la primera gráfica correspondiente al puerto del supercapacitor se observa como debería ser la corriente idealmente en un sistema sin pérdidas, ya que como se mencionó anteriormente, el DER genera estas referencias suponiendo un sistema ideal. Como las referencias no consideran estas pérdidas, se aprecia que este puerto tiene un error de seguimiento considerable, esto se debe a que ese Δi_{sc} entre la referencia y la corriente real corresponde a la corriente necesaria para suplir las pérdidas del sistema y mantener el DC link a una tensión constante de 144 V. En este caso el error es considerablemente más grande al error que existiría en un sistema con pérdidas normales de operación, por el motivo que se mencionó en un inicio donde existe una corriente de fuga que no se pudo identificar en el sistema, por lo tanto, se asume como pérdidas que el puerto del SC debe suplir. Con respecto a la dinámica del control, se aprecia que no hay overshoots ni undershoots en el seguimiento de referencias y el error de seguimiento es prácticamente despreciable como se aprecia en la segunda el recuadro de zoom de la segunda gráfica de la Fig. 5.16.

Pese a que el puerto del supercapacitor se encuentra regulando las pérdidas del sistema, la transferencia de energía sigue ejecutándose acorde a lo impuesto por el DER, es decir, la carga recibe la energía demandada en todo momento.

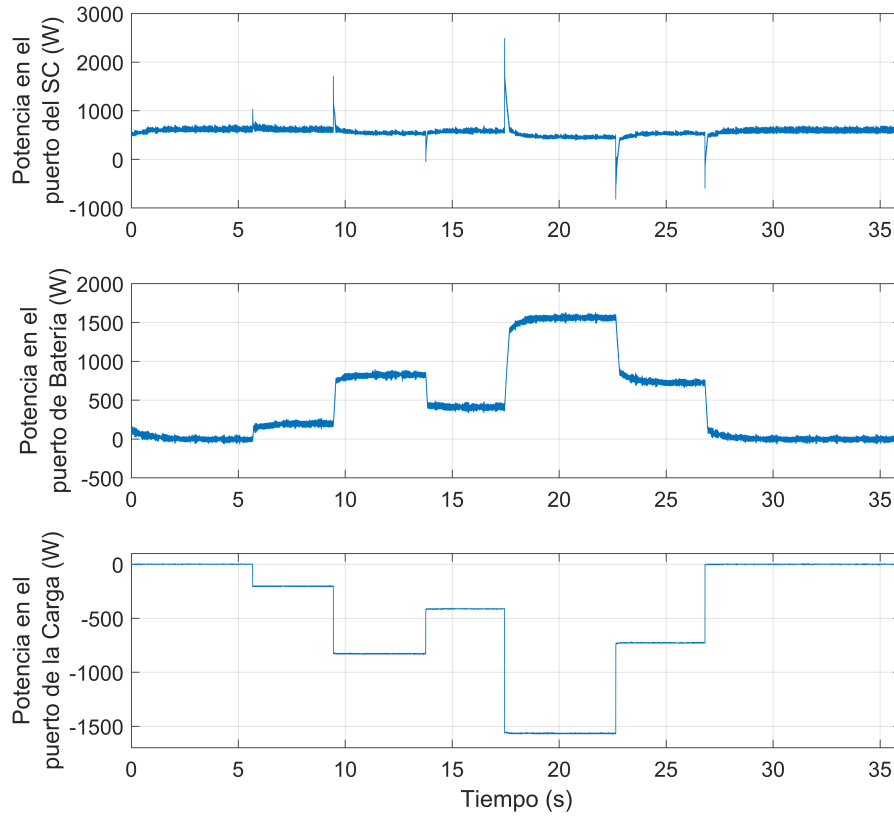


Figura 5.14: Potencia en cada puerto del sistema.

Se puede apreciar con más detalle el error del seguimiento de las referencias de corriente en la Fig. 5.17 donde la primera gráfica corresponde al error del puerto del supercapacitor y la segunda gráfica corresponde al puerto de la batería y se definen de la forma $i_j^* - i_j$. Se puede apreciar como el error del puerto del SC se mueve en un valor cercano a -10 A, mientras que el error del puerto de la batería se mueve cercano al cero. De esta forma, se puede apreciar con mayor detalle como la regulación de las pérdidas por parte del puerto del supercapacitor altera el error de seguimiento de referencias del DER.

Como se ha mencionado en secciones anteriores, la tensión inicial de operación de los puertos es de 74 V para la batería, 62 V para el supercapacitor y de 144 V para el DC link. En la Fig. 5.18 se muestran las gráficas de tensiones de los 3 puertos durante todo el experimento de variación de carga y se aprecia como la tensión del supercapacitor decae constantemente debido a la inyección de potencia que este puerto tiene durante todo el experimento. La tensión de la batería varía con los impactos de carga, pero aún así se mantiene cercano a su valor de operación normal. En la tercera gráfica de la Fig. 5.18 se observa como el control mantiene efectivamente la tensión del DC link constante

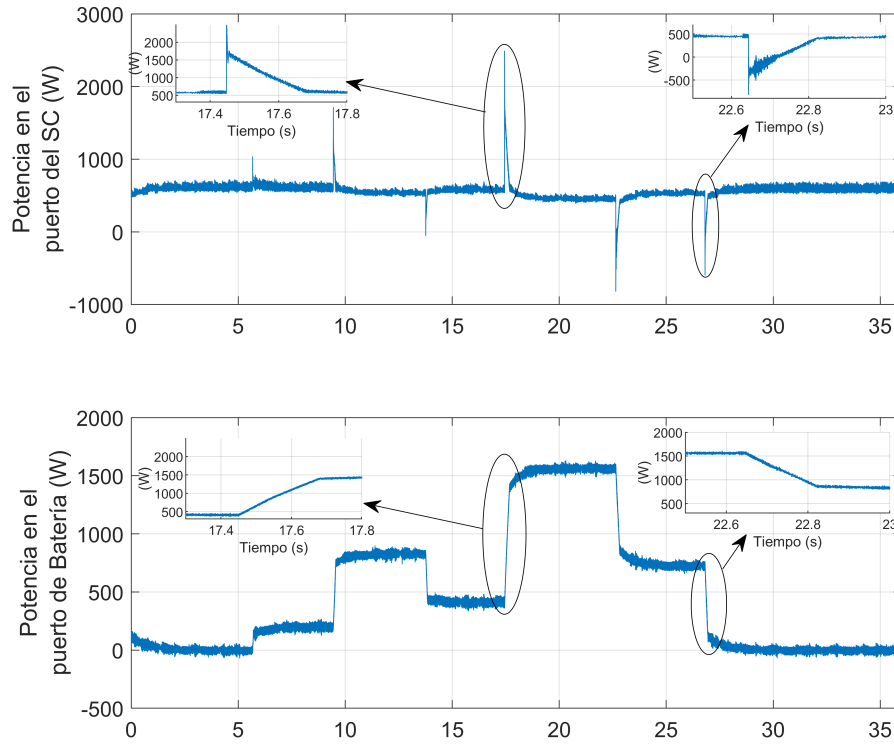


Figura 5.15: Detalle de la potencia en cada puerto del sistema para suplir peaks de demanda.

en torno a los 144 V durante los impactos de carga, incluso en el recuadro de zoom se aprecia el ripple con un valor de aproximadamente 0.2 V, lo cual es despreciable para la tensión normal de operación.

Como se ha mencionado anteriormente, el DER permite gestionar los flujos de energía de forma simple en el sistema multi puerto acorde a una política de gestión previamente definida. En base a lo anterior, se puede redireccionar los flujos de energía a gusto entre puertos bajo ciertas condiciones como ocurre en la Fig. 5.19, donde se aprecia la lógica de carga y descarga diseñada para el supercapacitor en las señales de corriente i_{sc} , corriente i_{bat} y tensión v_{sc} . La lógica de carga y descarga se diseña mediante el parámetro α_{bat-sc} , el cual es distinto de cero cuando la tensión v_{sc} se sale de ciertos límites. El SC tiene una tensión máxima de operación dada por los 129 V, sin embargo, en el sistema se trabaja en torno a los 60 V para evitar llegar a su valor máximo de operación, además, es suficiente para probar el DER. El esquema opera como un lazo de histéresis el cual activa la descarga del SC cuando este llega a una tensión de 70 V y desactiva la descarga cuando llega a una tensión de 65 V. Cuando se gatilla la descarga en los 70 V el parámetro $\alpha_{bat-load}$ se hace cero y toda la carga pasa a ser alimentada por el SC hasta que llega a los 65 V donde comienza a operar nuevamente de forma normal

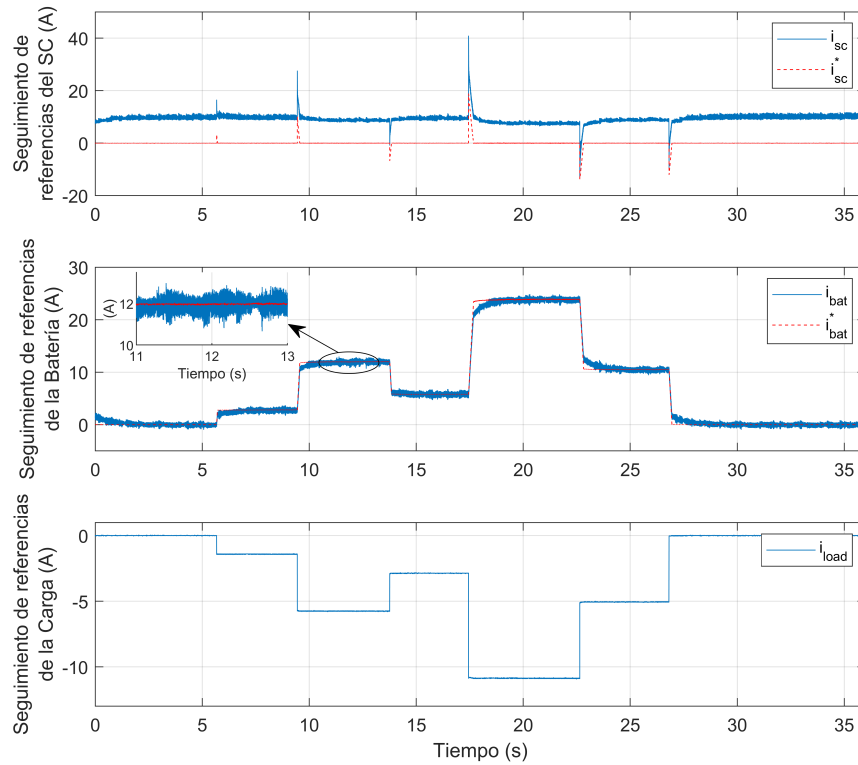


Figura 5.16: Corrientes de los 3 puertos del sistema ante las variaciones en la carga.

con la carga alimentada por la batería de forma continua. Por otro lado, el esquema activa la carga del SC cuando este llega a una tensión de 57 V y se desactiva la carga del SC cuando este llega a una tensión de 64 V. La carga del SC cuando llega a su límite inferior se hace alimentandolo desde la batería, es decir, se activa el parámetro α_{bat-sc} para suplir una potencia constante de 1 kW hacia el SC mientras alimenta la carga al mismo tiempo. Cuando la tensión llega a los 64 V, el sistema hace cero el parámetro α_{bat-sc} y opera de forma normal con la batería aliementando solo la carga sin flujo de energia entre el puerto de la batería y el supercapacitor. En la Fig. 5.19 se aprecia como desde el inicio hasta los 4 segundos el SC se descarga solo con las pérdidas del sistema y no por medio de la lógica de descarga del SC, luego desde los 4 segundos hasta los 44 segundos, se activa la lógica de carga, ya que la tensión ha llegado a su límite inferior. Por lo tanto, se aprecia la corriente positiva del puerto de la batería lo que indica un flujo de energía hacia el SC. Desde los 44 segundos hasta los 85 segundos nuevamente comienza la descarga del SC por las pérdidas propias del sistema hasta llegar a la tensión del límite inferior para comenzar nuevamente con el proceso de carga desde la batería. En este caso solo se muestra como se activa la carga del SC ya que la descarga como tal ocurre naturalmente y no por el esquema diseñado. Esto demuestra la forma simple con la que se puede redireccionar el flujo entre cualquier puerto del sistema. En este caso, se

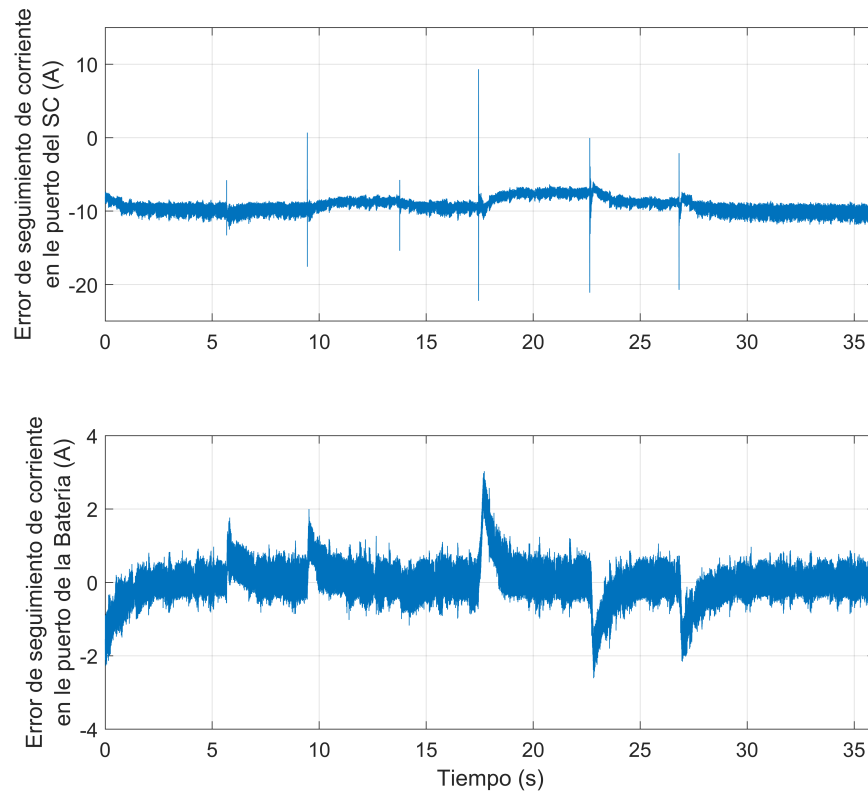


Figura 5.17: Error de seguimiento de referencia de corrientes de los 3 puertos del sistema ante las variaciones en la carga.

vuelve a apreciar el error de seguimiento de referencia de la corriente del supercapacitor debido a la alimentación de las pérdidas.

La carga y descarga controlada del supercapacitor permite mantener el puerto con una tensión de operación controlada entre límites superior e inferior.

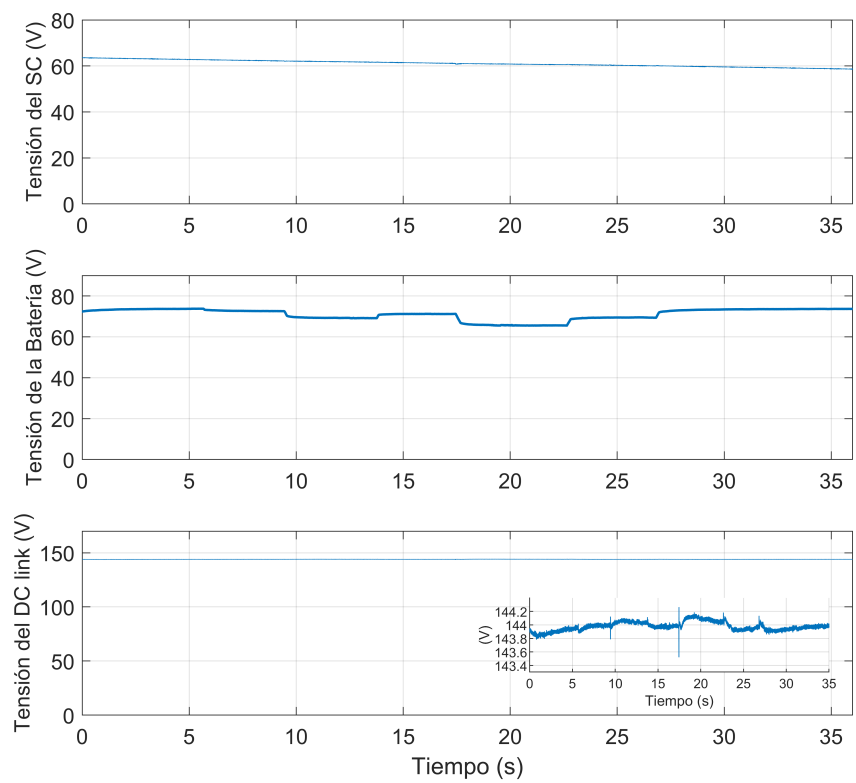


Figura 5.18: Tensiones de los 3 puertos del sistema ante variaciones en la carga.

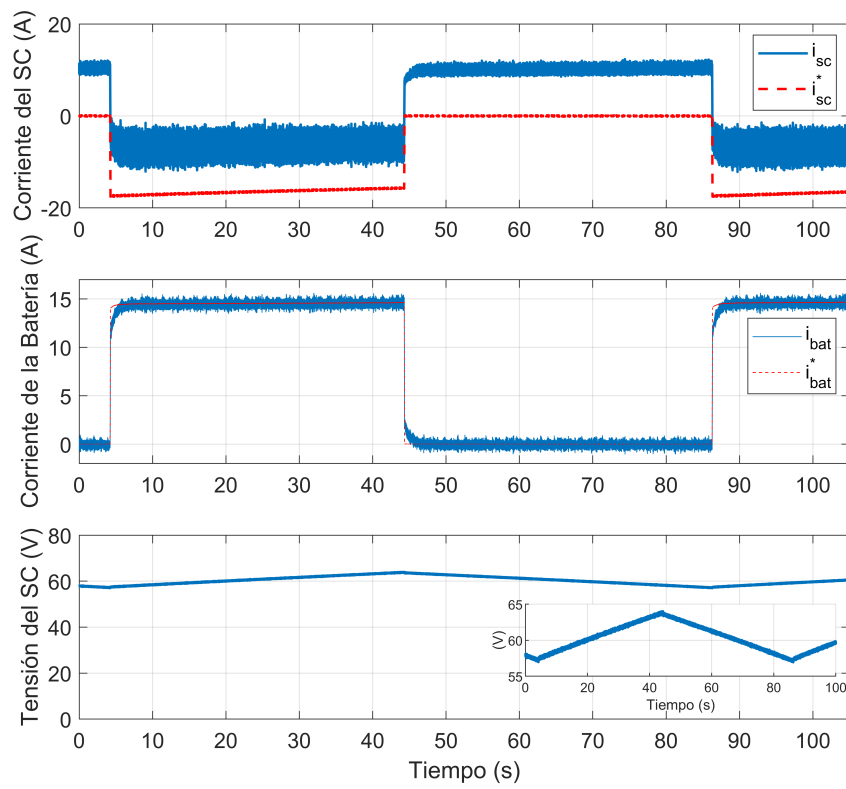


Figura 5.19: Lógica de carga y descarga del supercapacitor con el DER.

Esta página se ha dejado en blanco intencionalmente.

Capítulo 6

Conclusiones Generales

En este trabajo se desarrolla la extensión del Dynamic Energy Router (DER) para ser aplicado en sistemas de tres puertos como el utilizado en la Fig. 2.1 que integra un supercapacitor, una celda de combustible (emulada por la batería) y una carga variable que simula la corriente demandada por un convertidor DC/AC alimentando un motor. Para el seguimiento de las referencias de corriente generadas por el DER se utiliza el control MPC y Feedback Linearization con distintas estrategias utilizadas para sobrellevar el problema de las pérdidas del sistema. En el primer caso con control MPC se utilizó el puerto externo con la única finalidad de controlar la tensión del DC link a una tensión constante de 144 V, mientras los otros tres puertos interactúan activamente en la transferencia de energía, validándose esta estrategia mediante simulación. Por otro lado, el control FL se diseña para controlar la tensión del DC link con uno de los tres puertos evitando la necesidad de un puerto auxiliar y su desempeño se valida tanto en simulación como en experimentación. Se comprobó que ambas estrategias permiten un desempeño óptimo del DER, sin embargo, la estrategia utilizada en el DER es más eficiente ya que evita instalar un puerto extra en el sistema. Se observó que los controladores no lineales en general tenían un excelente desempeño al ser utilizados en complemento con el DER y permitían efectuar la transferencia de energía para suplir la demanda de forma óptima.

En la experimentación del control FL se presentó un detalle relacionado con un consumo de potencia que no se pudo identificar su origen y que exigió en general una mayor corriente al SC durante la transferencia de energía en el sistema. Sin embargo, lo anterior no representó un problema para la operación del DER ya que el sistema lo considera como pérdidas que se deben suplir. En este caso la estrategia de control utilizada designa al puerto del SC para suplir esas pérdidas que no eran parte del sistema originalmente. Se pudo observar con mayor claridad cómo el error de seguimiento de corriente en el puerto del SC aumenta por el delta de corriente Δi_{sc} que incorpora la estrategia del FL para regular la tensión del DC link a la corriente de referencia entregada por el DER. Mientras mayores sean las pérdidas, mayores serán las corrientes requeridas para mantener la tensión del DC link constante, por lo tanto, mayor será el error de seguimiento de referencias entregadas por el DER. Es importante destacar que

este error se debe principalmente a que el DER sume un sistema sin pérdidas como se estableció desde un inicio. La estrategia del control FL permite que la tensión del DC link sea controlada por el puerto del SC mientras que simultáneamente se habilita este puerto para suministrar las referencias de corriente otorgadas por el DER, es decir, actúa activamente en la gestión de energía. Por otro lado, el experimento se llevó a cabo en condiciones de mucho ruido de medición el cual no pudo ser mitigado debido a los instrumentos utilizados, sin embargo, no afectó la efectividad del control FL ni de la operación del DER ya que se pudo alimentar la potencia demandada por la carga durante todo el ensayo manteniendo todas las tensiones en los valores normales de operación.

El dispositivo DER permite transferir dinámicamente energía entre los puertos y una de las principales características es la habilidad de controlar la dirección y magnitud de los flujos de energía solo variando los parámetros α_{ji} entre el puerto j y el puerto i , el cual se diseña tomando en cuenta las consideraciones y limitaciones de cada puerto involucrado. En los análisis de las gráficas mostradas para los controles MPC y FL se observa cómo el DER es capaz de transferir la energía de forma simple entre los puertos del sistema, donde incluso se puede establecer mecanismos de carga y descarga del supercapacitor mediante la batería gestionando únicamente el parámetro α_{bat-sc} , que regula la energía entre el puerto de la batería y el puerto del supercapacitor. En otras palabras, podemos gestionar el flujo de energía entre cualquier puerto del sistema sin acudir a lógicas complejas de gestión de energía.

La estrategia de control implementada en el DER ha demostrado buenos resultados en la redistribución de los flujos de energía entre los puertos del sistema. Se observa que el control no lineal, principalmente en las gráficas de seguimiento de referencias de corriente, tiene un error prácticamente despreciable y tiempos de respuesta adecuados para las dinámicas del sistema. De manera general, el control logra un buen desempeño en simulación y, aunque en la experimentación se observa cierta degradación debido al ruido de medición, esta no afecta la funcionalidad global del DER.

Este trabajo entrega una solución versátil para integrar y gestionar múltiples fuentes de energía. La simulación y la experimentación validan el potencial del DER basado en controladores de corriente no lineales para mejorar la eficiencia en la gestión de energía en sistemas multipuerto, donde cada puerto puede suministrar, almacenar y consumir energía con ciertas limitaciones físicas propias de cada dispositivo, los cuales pueden ser perfectamente gestionados con los parámetros α_{ji} del DER. Se pudo cumplir con el objetivo principal de implementar el DER en un sistema considerando la celda de combustible, el supercapacitor y la carga variable bajo la consideración de que la celda de combustible se emula con el puerto de la batería, limitando sus dinámicas.

Finalmente, se destaca que en la representación esquemática del sistema, el puerto de la batería se mantiene explícitamente como batería en todas las ecuaciones y en el diagrama correspondiente, ya que es el dispositivo que realmente se utiliza en la implementación. Sin embargo, este puerto puede ser reemplazado por una celda de combustible real sin afectar los resultados generales obtenidos. Esto es posible debido a que la referencia de los flujos de potencia generada por el DER depende de las tensiones de los puertos, lo que significa que, si la celda de combustible presenta una variación

en la tensión debido a su relación característica tensión versus corriente, el DER es capaz de adaptarse dinámicamente a esta no linealidad sin afectar su funcionalidad y las conclusiones generales obtenidas.

Se espera que para futuros trabajos el DER pueda ser experimentado bajo condiciones reales de operación de un vehículo eléctrico tomando en cuenta sus ciclos de trabajo. En este caso, solo se verificó la operatividad y el potencial del DER aplicado a un sistema real con tres o eventualmente más puertos, lo que generalmente ocurre en vehículos eléctricos o smart grids.

Esta página se ha dejado en blanco intencionalmente.

Bibliografía

- [1] *Página oficial del Earth Observatory of NASA*. Online. URL: <https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/global-temperatures> (visitado 29-08-2023).
- [2] *Hydrogen Oil: Green vs Blue, What's the Difference?* Online. URL: <https://energytracker.asia/hydrogen-oil-green-vs-blue-whats-the-difference/%5C#:~:text=Hydrogen%5C%20energy%5C%20is%5C%20significantly%5C%20more, on%5C%20how%5C%20it%5C%20is%5C%20produced.> (visitado 29-08-2023).
- [3] Qian Xun, Yujing Liu y Elna Holmberg. “A Comparative Study of Fuel Cell Electric Vehicles Hybridization with Battery or Supercapacitor”. En: *2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*. 2018, págs. 389-394. DOI: 10.1109/SPEEDAM.2018.8445386.
- [4] *Página oficial de Hyundai Chile*. Online. URL: <https://www.hyundai.cl/modelos/all-new-ioniq-5/> (visitado 30-08-2023).
- [5] Tsuguhiro Takuno, Megumi Koyama y Takashi Hikihara. “In-Home Power Distribution Systems by Circuit Switching and Power Packet Dispatching”. En: *2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications*. 2010, págs. 427-430. DOI: 10.1109/SMARTGRID.2010.5622079.
- [6] Linfeng Sun et al. “Multiport Energy Router for DC Grid Clusters”. En: *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* 12.2 (2024), págs. 1666-1682. DOI: 10.1109/JESTPE.2024.3349420.
- [7] Vinicius Gadelha et al. “Electrical Grids Based on Power Routers: Definition, Architecture and Modeling”. En: *IEEE access* 11 (2023), págs. 10004-10017.
- [8] Yuichi Kado et al. “Power flow control of three-way isolated DC/DC converter for Y-configuration power router”. En: *2015 IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference (IFEEC)*. 2015, págs. 1-5. DOI: 10.1109/IFEEC.2015.7361500.
- [9] F. Girbau-Llistuella et al. “Experimental validation of a single phase intelligent power router”. En: *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe*. 2014, págs. 1-6. DOI: 10.1109/ISGTEurope.2014.7028775.

- [10] Antonio Sánchez-Squella et al. “Dynamic Energy Router”. En: *IEEE Control Systems Magazine* 30.6 (2010), págs. 72-80. DOI: 10.1109/MCS.2010.938096.
- [11] Babangida Modu et al. “Optimal Design of a Grid-Independent Solar-Fuel Cell-Biomass Energy System Using an Enhanced Salp Swarm Algorithm Considering Rule-Based Energy Management Strategy”. En: *IEEE Access* 12 (2024), págs. 23914-23929. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3362241.
- [12] Ruoyang Song et al. “Safety and Longevity-Enhanced Energy Management of Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle With Machine Learning Approach”. En: *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 10.2 (2024), págs. 2562-2571. DOI: 10.1109/TTE.2023.3295433.
- [13] Debasis Chatterjee et al. “Efficient Energy Management Strategy for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles Using Classifier Fusion Technique”. En: *IEEE Access* 11 (2023), págs. 97135-97146. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3312618.
- [14] Shuangqi Li et al. “Hybrid Power System Topology and Energy Management Scheme Design for Hydrogen-Powered Aircraft”. En: *IEEE Transactions on Smart Grid* 15.2 (2024), págs. 1201-1212. DOI: 10.1109/TSG.2023.3292088.
- [15] Kaixuan Wang et al. “Research on Structure and Energy Management Strategy of Household Energy Router Based on Hybrid Energy Storage”. En: *2019 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*. 2019, págs. 1-5. DOI: 10.1109/ISGT.2019.8791644.
- [16] Penghua Li et al. “A Lyapunov Optimization-Based Energy Management Strategy for Energy Hub With Energy Router”. En: *IEEE Transactions on Smart Grid* 11.6 (2020), págs. 4860-4870. DOI: 10.1109/TSG.2020.2968747.
- [17] Z. Mokrani et al. “Energy management of battery-PEM Fuel cells Hybrid energy storage system for electric vehicle”. En: *2016 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*. 2016, págs. 985-990. DOI: 10.1109/IRSEC.2016.7984073.
- [18] Diana Abd-El Baset, Hegazy Rezk y Mohamed Hamada. “Fuzzy Logic Control Based Energy Management Strategy for Renewable Energy System”. En: *2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*. 2020, págs. 1-5. DOI: 10.1109/REEPE49198.2020.9059203.
- [19] Guangqiang Li et al. “Research on Energy Management Strategy of Hydrogen Fuel Cell Vehicles”. En: *2020 Chinese Automation Congress (CAC)*. 2020, págs. 7604-7607. DOI: 10.1109/CAC51589.2020.9326669.

- [20] Victor Ramirez et al. "A dynamic router for microgrid applications: Theory and experimental results". En: *Control Engineering Practice* 27 (2014), págs. 23-31. ISSN: 0967-0661. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2014.02.005>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066114000768>.
- [21] Victor Ramirez et al. "Theory and experimental results of two dynamic energy routers". En: *2012 American Control Conference (ACC)*. 2012, págs. 2128-2133. DOI: 10.1109/ACC.2012.6315077.