



**DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO
BASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SU
INTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS**

AUTOR: Isaac Gil Mera

TUTOR: Sergio Vázquez Pérez

CAPÍTULO 4. SIMULACIONES DEL SISTEMA



| | |
|---|---|
|  | DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO BASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SU INTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS |
| | AUTOR: Isaac Gil Mera |
| | TUTOR: Sergio Vázquez Pérez |

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se mostrarán los resultados de simulación obtenidos en la fase preliminar de diseño de los convertidores de potencia asociados a la planta objeto de estudio.

El objetivo de esta parte del estudio es validar a nivel de simulación la integración del sistema de almacenamiento estudiado en la planta de aprovechamiento de energías renovables de la que se partía, y con ello, la gestión de la potencia entre ésta y la microrred.

La conexión con la red de distribución no forma parte de las simulaciones por no ser relevante en el diseño que se pretende. Se analizará el modo de funcionamiento en isla.

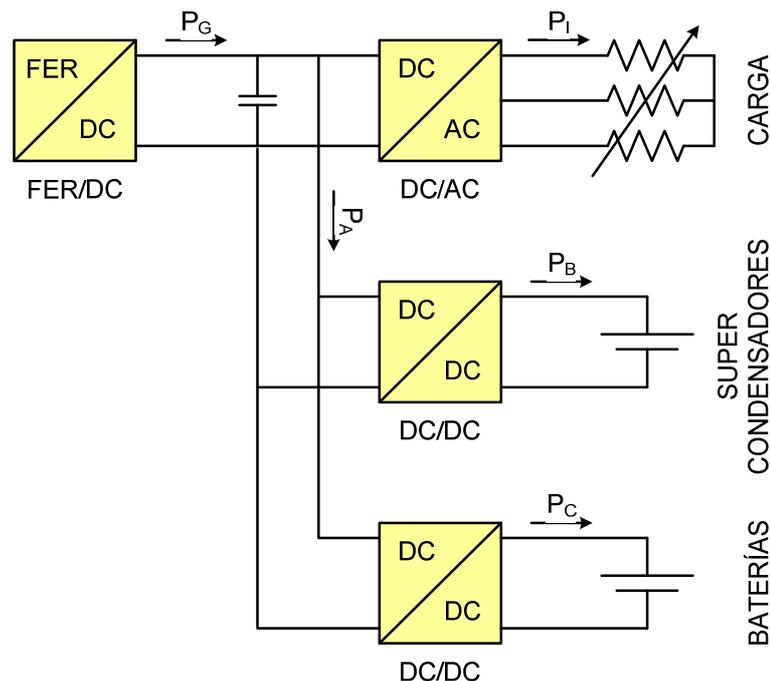


Figura 4.1. Sistema bajo estudio de simulación

En la Figura 4.1 se muestra el esquema del sistema bajo estudio de simulación. La fuente renovable se encarga de aportar energía al sistema a través del bloque denominado “FER/DC”. Por otro lado, es el inversor “DC/AC” el que gobierna la tensión del bus de la microrred, con ello, el suministro de la potencia a la carga. Funciona como fuente de tensión.

| | |
|---|---|
|  | DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO BASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SU INTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS |
| | AUTOR: Isaac Gil Mera |
| | TUTOR: Sergio Vázquez Pérez |

Y en tercer lugar, los convertidores “DC/DC” asociado a las baterías y supercondensadores como sistema de almacenamiento de la planta.

La conexión o enlace entre estos tres subsistemas se realiza mediante un bus de dc, denominado dc-link, y formado por una bancada de condensadores de potencia.

En el Apartado 4 del presente capítulo se detallarán los escenarios que se desean analizar bajo simulación.

2. ENTORNO DE SIMULACIÓN

Las simulaciones han sido desarrolladas mediante el software PSCAD® v4.1. Son las siglas de *Power System CAD* y significa Diseño Asistido por Computador de Sistemas de Potencia. Esta herramienta permite, a partir de la introducción de un esquema eléctrico, simular su comportamiento y analizar los resultados, todo ello en un entorno gráfico de manejo sencillo e intuitivo. Tiene, en consecuencia, integradas herramientas de representación de variables, medidores, y una amplia librería de elementos de control y modelos de componentes.

En la Figura 4.2 se muestra el entorno gráfico utilizado en las simulaciones. En la parte derecha aparece el panel de control y maniobra, y elementos de monitorización; en la parte izquierda, las gráficas obtenidas durante la simulación.

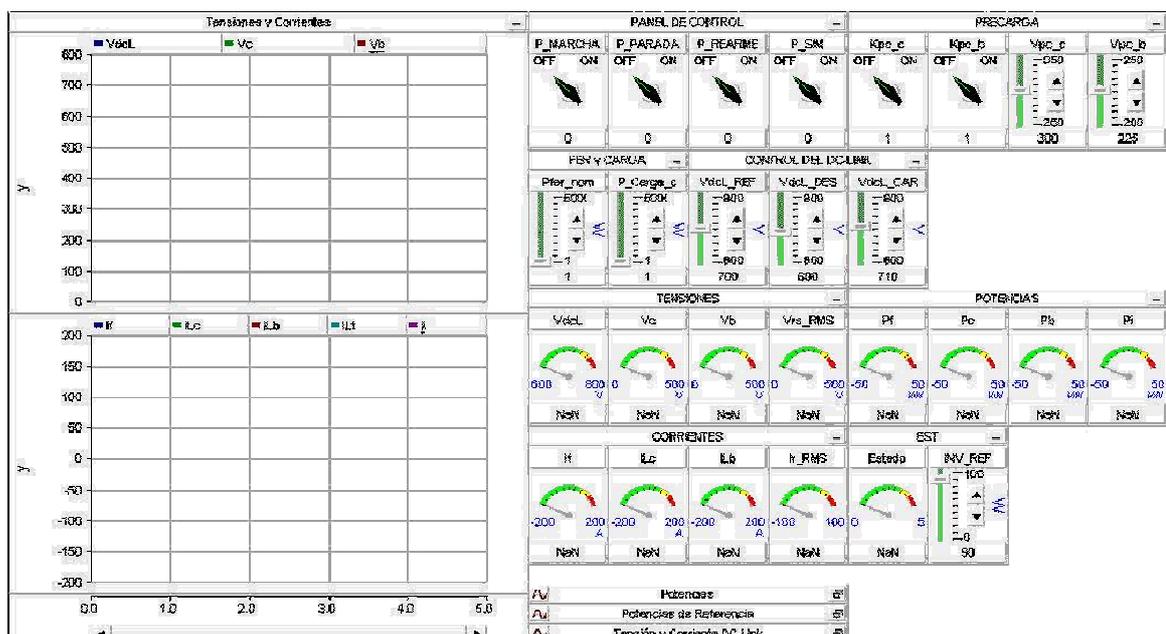


Figura 4.2. Panel de control y monitorización de simulación

| | |
|---|---|
|  | DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO BASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SU INTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS |
| | AUTOR: Isaac Gil Mera |
| | TUTOR: Sergio Vázquez Pérez |

El esquema bajo simulación se presentó en la Figura 4.1 del apartado anterior. Como puede observarse, el sistema global está compuesto por distintos bloques funcionales. Todos ellos son gobernados por el control global de la planta.

En la Figura 4.3 se muestra el bloque de control mencionado, en el cual se aprecian las variables de entrada al mismo y los comandos de salida, detalladas en la Tabla 4.1. Es el encargado de la monitorización de las variables eléctricas, de la gestión de los modos de funcionamiento y de la energía mediante el gobierno sobre el controlador local de cada uno de los convertidores, comandando la potencia de referencia a seguir por el mismo, y con ello, el control sobre la tensión del bus de dc.

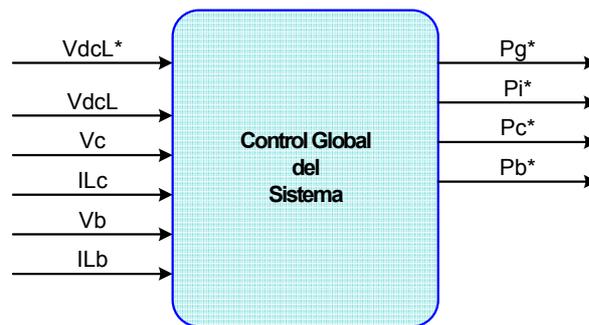


Figura 4.3. Control global del sistema

| Designación | Descripción |
|-------------|--|
| Vdcl* | Referencia de tensión dc-link |
| VdcL | Medida de tensión dc-link |
| Vc | Medida de tensión de supercondensadores |
| ILc | Medida de corriente de supercondensadores |
| Vb | Medida de tensión de baterías |
| ILb | Medida de corriente de baterías |
| Pg* | Referencia de potencia de generación |
| Pi* | Referencia de potencia del inversor |
| Pc* | Referencia de potencia de supercondensadores |
| Pb* | Referencia de potencia de baterías |

Tabla 4.1. Variables del control global del sistema

El bloque designado como “FER/DC” emula la fuente de energía renovable como una fuente de tensión cuyo perfil de entrega de potencia es variable. Estas variaciones se han modelado como rampas ascendentes o descendentes de potencia. Las pendientes de éstas se han calculado de tal manera que si el sistema es capaz de realizar el seguimiento a dicha dinámica, también sería capaz de hacerlo para un perfil de fuente de energía renovable real.

Por otro lado, el convertidor “DC/AC” es el encargado de mantener el bus trifásico de la microrred, y con ello, el abastecimiento de la carga se muestra en la Figura 4.4. Se trata de un inversor trifásico de tres ramas de modulación PWM, provisto de un filtro de salida LC.

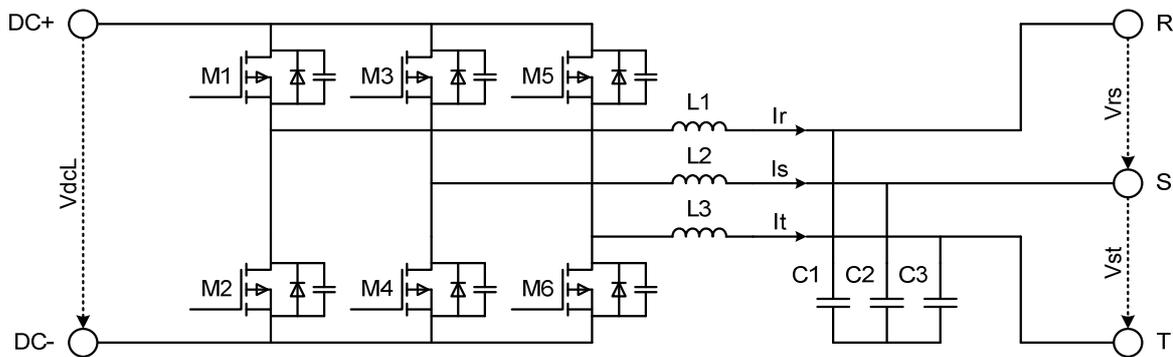


Figura 4.4. Inversor dc/ac de microrred

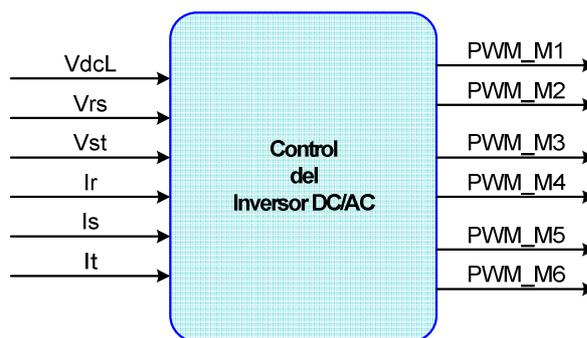


Figura 4.5. Control del inversor dc/ac de microrred

En la Figura 4.5 se observa el bloque de control del convertidor en cuestión, cuyas entradas corresponden a medidas de tensiones y corrientes, y cuyas salidas son los disparos

| | |
|---|---|
|  | DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO BASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SU INTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS |
| | AUTOR: Isaac Gil Mera |
| | TUTOR: Sergio Vázquez Pérez |

asociados a la modulación PWM de los semiconductores de potencia que forman cada una de las ramas o fases. Estas variables son explicadas en la Tabla 4.2.

| Designación | Descripción |
|-------------|---------------------------------|
| VdcL | Medida de tensión dc-link |
| Vrs | Medida de tensión de línea RS |
| Vst | Medida de tensión de línea ST |
| Ir | Medida de corriente de fase R |
| Is | Medida de corriente de fase S |
| It | Medida de corriente de fase T |
| PWM_M1 | Modulación PWM de transistor M1 |
| PWM_M2 | Modulación PWM de transistor M2 |
| PWM_M3 | Modulación PWM de transistor M3 |
| PWM_M4 | Modulación PWM de transistor M4 |
| PWM_M5 | Modulación PWM de transistor M5 |
| PWM_M6 | Modulación PWM de transistor M6 |

Tabla 4.2. Variables del control del inversor dc/ac de microred

En cuanto al sistema de almacenamiento, indicar que los dos convertidores de potencia asociados al mismo son formalmente idénticos. Por tanto, a continuación se explicará el equipo de manera genérica, sin especificar si corresponde a los supercondensadores o a las baterías. El equipo consiste un convertidor dc/dc “interleaving” de tres ramas mediante modulación PWM, mostrado en la Figura 4.6.

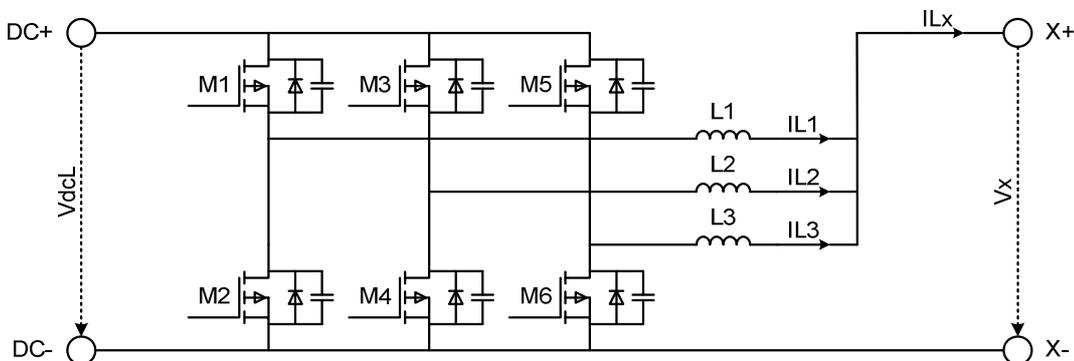


Figura 4.6. Convertidor dc/dc de almacenamiento

En la Figura 4.7 se observa el bloque de control asociado al convertidor, cuyas entradas corresponden a medidas eléctricas de tensiones y corrientes, y cuyas salidas son los disparos asociados a la modulación PWM de los semiconductores. En la Tabla 4.3 se presentan las variables asociadas al mismo.

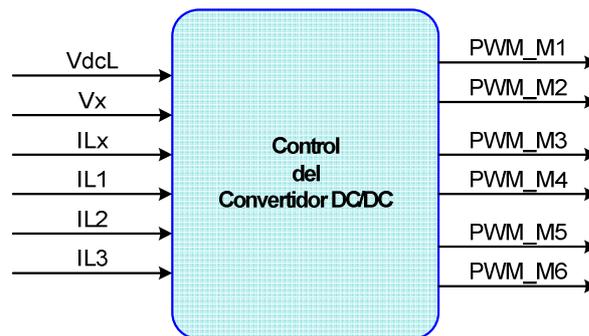


Figura 4.7. Control del convertidor dc/dc de almacenamiento

| Designación | Descripción |
|-------------|---------------------------------------|
| VdcL | Medida de tensión dc-link |
| Vx | Medida de tensión de almacenamiento |
| ILx | Medida de corriente de almacenamiento |
| IL1 | Medida de corriente de rama 1 |
| IL2 | Medida de corriente de rama 2 |
| IL3 | Medida de corriente de rama 3 |
| PWM_M1 | Modulación PWM de transistor M1 |
| PWM_M2 | Modulación PWM de transistor M2 |
| PWM_M3 | Modulación PWM de transistor M3 |
| PWM_M4 | Modulación PWM de transistor M4 |
| PWM_M5 | Modulación PWM de transistor M5 |
| PWM_M6 | Modulación PWM de transistor M6 |

Tabla 4.3. Variables del control del convertidor dc/dc de almacenamiento

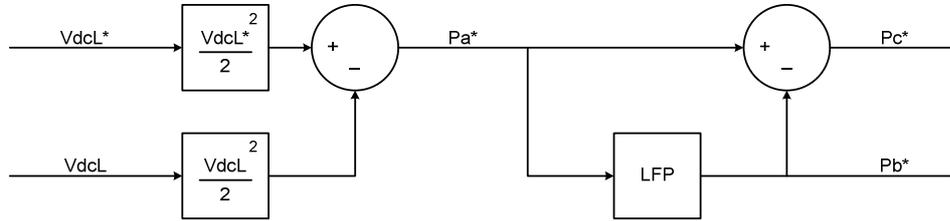


Figura 4.9. Cálculo de potencias de referencia de almacenamiento

Localmente, el algoritmo de control incluido en el convertidor de potencia asociado a los supercondensadores sigue el esquema de la Figura 4.10.

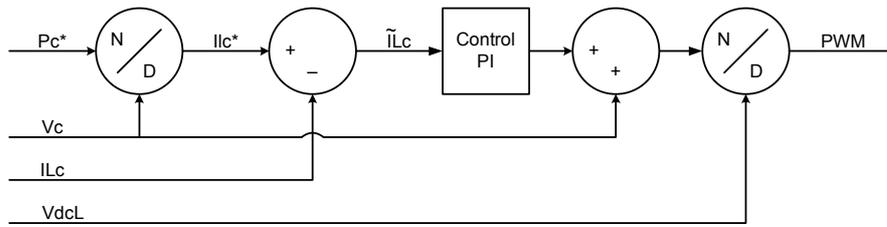


Figura 4.10. Diagrama de control del convertidor de supercondensadores

Y de la misma manera, en la Figura 4.11 se explica el control implementado en el convertidor correspondiente a la bancada de baterías.

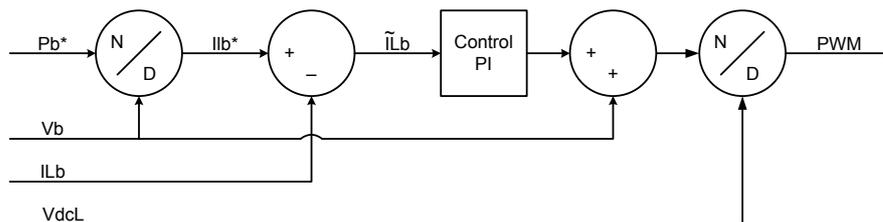


Figura 4.11. Diagrama de control del convertidor de baterías

| | |
|---|---|
|  | DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO BASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SU INTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS |
| | AUTOR: Isaac Gil Mera |
| | TUTOR: Sergio Vázquez Pérez |

4. ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

Los escenarios de simulación propuestos, en función de los estados de la generación de energía a través de la fuente de energía renovable (Potencia Generada), y de la potencia demandada por la red (Potencia Demandada), son los siguientes:

- I. Potencia generada no nula y potencia demandada nula:
El sistema de almacenamiento absorbe la totalidad de la potencia entregada por la fuente de energía renovable.

- II. Potencia generada nula y potencia demandada no nula:
El sistema de almacenamiento es el encargado de suministrar la totalidad de la potencia a la carga.

- III. Potencia generada mayor que potencia demandada:
El sistema de almacenamiento se carga con la potencia en exceso generada por la fuente de energía renovable.

- IV. Potencia demandada mayor que potencia generada:
El sistema de almacenamiento es el encargado de suministrar la potencia restante para abastecer la demanda de la carga.

| | |
|---|---|
|  | DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO BASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SU INTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS |
| | AUTOR: Isaac Gil Mera |
| | TUTOR: Sergio Vázquez Pérez |

5. RESULTADO DE SIMULACIONES

Se realizarán cuatro simulaciones, como muestra de la respuesta en funcionamiento del sistema implementado ante cada uno de los escenarios definidos en el Apartado 4 del presente capítulo.

El perfil de la Fuente de Energía Renovable (FER) se va a emular mediante constantes y rampas suaves de potencias; y la situación de demanda de la red, mediante escalones de potencias, y mantenimiento de las mismas.

El tiempo de simulación en cada uno de los escenarios será de 20 segundos.

| | |
|---|---|
|  | DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO BASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SU INTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS |
| | AUTOR: Isaac Gil Mera |
| | TUTOR: Sergio Vázquez Pérez |

5.1. Escenario I. Potencia generada no nula y potencia demandada nula

En base a lo anteriormente expuesto en el Apartado 4:

- El sistema de almacenamiento absorbe la totalidad de la potencia entregada por la fuente de energía renovable.

Los resultados arrojados por las simulaciones se muestran a continuación. En la Figura 4.12 se puede visualizar el reparto de potencias; y en la Figura 4.13 y Figura 4.14, los estados de las tensiones y corrientes respectivamente.

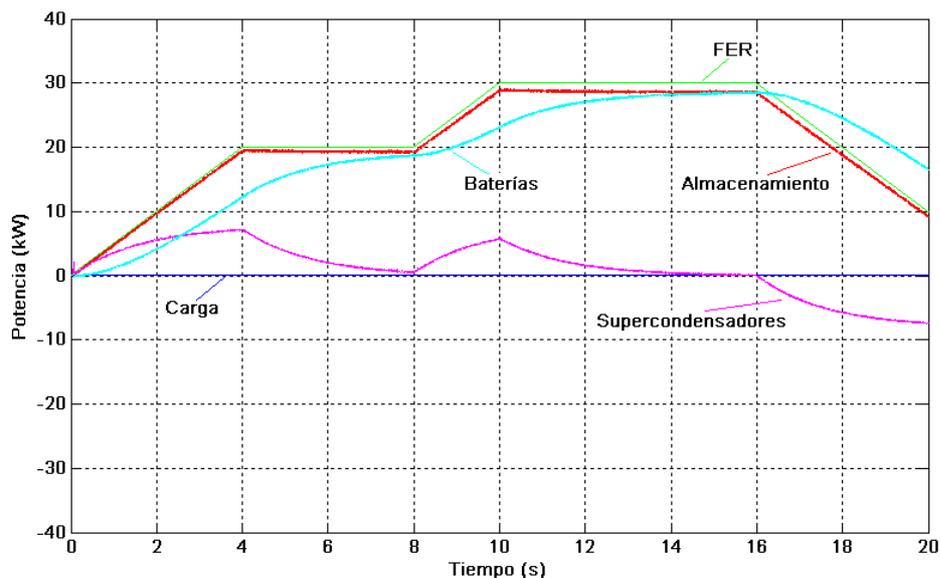


Figura 4.12. Potencias Escenario I

Como puede observarse en la Figura 4.12, el sistema de almacenamiento híbrido absorbe la potencia que entregada por la FER menos las pérdidas. Nótese que la dinámica de captación de potencia por parte del sistema basado en baterías es suave, mientras que los supercondensadores se encargan de la captación de los picos de potencia.

| | |
|---|---|
|  | DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO BASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SU INTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS |
| | AUTOR: Isaac Gil Mera |
| | TUTOR: Sergio Vázquez Pérez |

En el gráfico de la Figura 4.13 se muestra la tensión asociada al bus dc-link, la tensión de línea del servicio de la microrred, la tensión de almacenamiento en supercondensadores, y la correspondiente a las baterías.

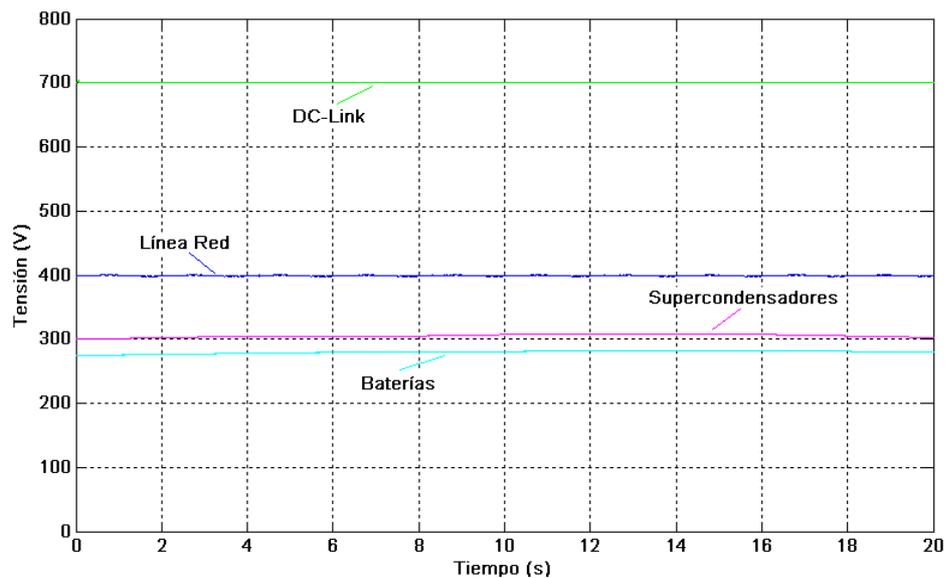


Figura 4.13. Tensiones Escenario I

Como indica la figura, las tensiones de dc-link y red se encuentran en sus valores nominales en todo momento.

Puede verse la elevación de la tensión en baterías en consecuencia de la carga de los mismos. Se aprecia también como la tensión en supercondensadores se eleva en procesos de carga y disminuye en los de descarga.

Concluyendo, en la Figura 4.14 se muestran las gráficas asociadas a las corrientes del sistema. Entre ellas, la corriente aportada por la fuente de energía renovable, la demandada por la carga, y las absorbidas por los sistemas de almacenamiento, supercondensadores y baterías.

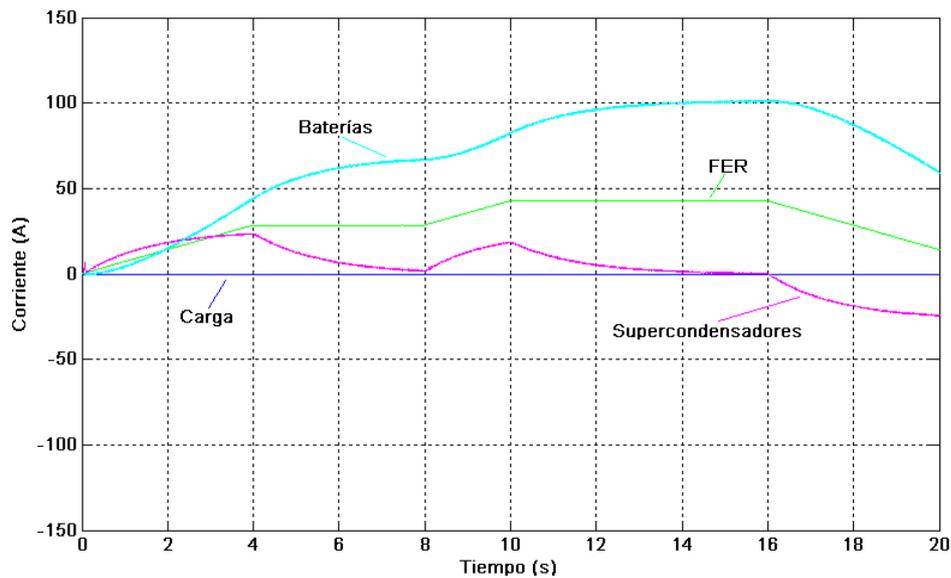


Figura 4.14. Corrientes Escenario I

Como se puede observar, la corriente de baterías es siempre positiva por estar almacenando energía, según el criterio de signo seguido, y cuya dinámica es suave.

En cuanto a la corriente de supercondensadores, es positiva en momentos de carga y negativa en situaciones de descarga, con una dinámica más rápida que la de los dispositivos anteriores.

5.2. Escenario II. Potencia generada nula y potencia demandada no nula

En base a lo anteriormente expuesto en el Apartado 4:

- El sistema de almacenamiento es el encargado de suministrar la totalidad de la potencia a la carga.

Los resultados arrojados por las simulaciones se muestran a continuación. En la Figura 4.15 se puede visualizar el reparto de potencias; y en la Figura 4.16 y Figura 4.17, los estados de las tensiones y corrientes respectivamente.

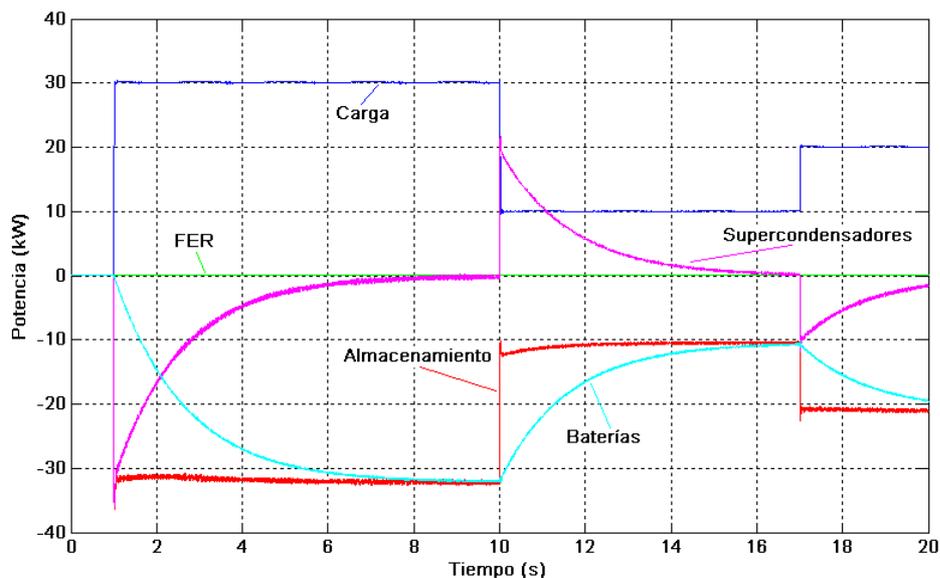


Figura 4.15. Potencias Escenario II

Como se aprecia en la Figura 4.15, el sistema de almacenamiento híbrido suministra la totalidad de la potencia demandada por la carga. Nótese las dinámicas de actuación de los supercondensadores, de las baterías, y la correspondiente al conjunto de ambas.

En la Figura 4.16 las tensiones del sistema y en la Figura 4.17, las corrientes. Se aprecian las fluctuaciones de la tensión del dc-link y de la red en las entradas y salidas de la carga.

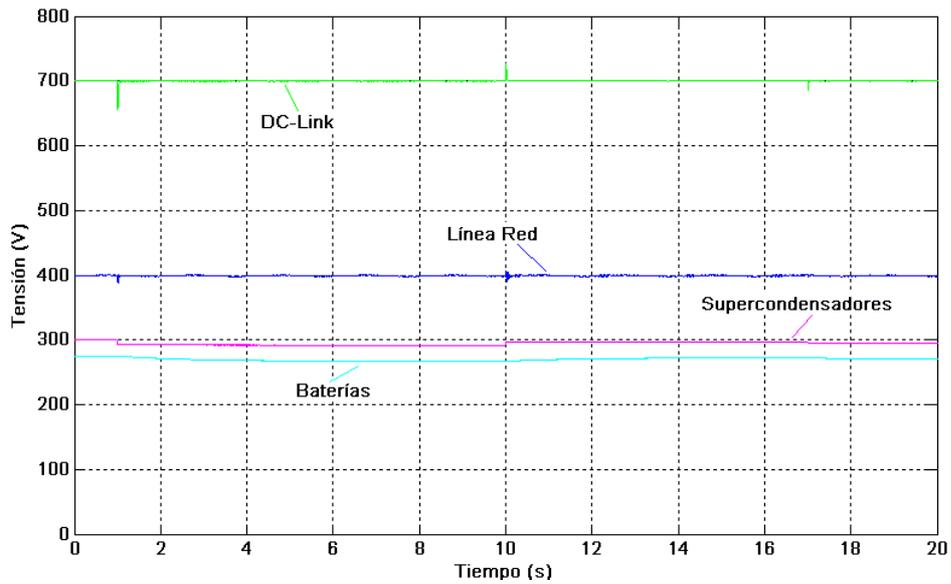


Figura 4.16. Tensiones Escenario II

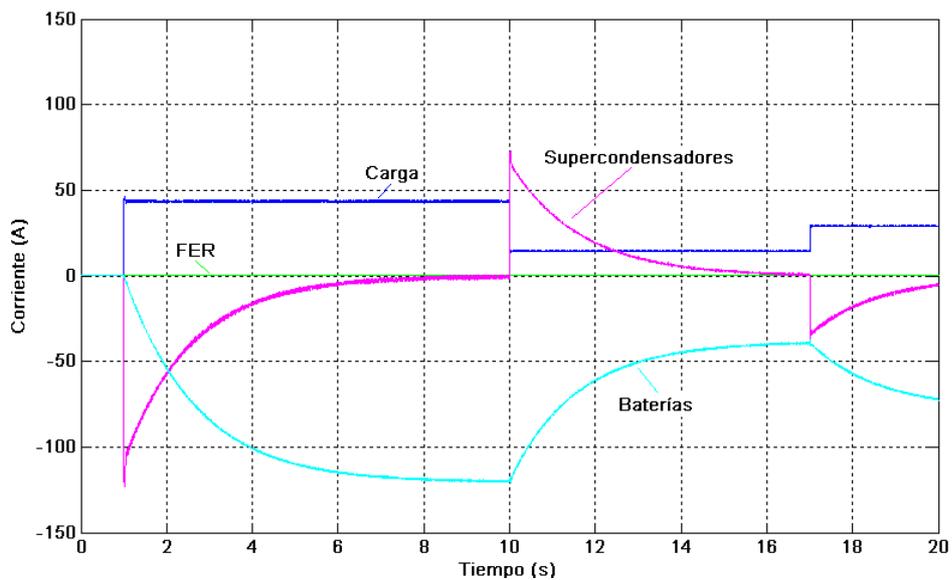


Figura 4.17. Corrientes Escenario II

5.3. Escenario III. Potencia generada mayor que potencia demandada

En base a lo anteriormente expuesto en el Apartado 4:

- El sistema de almacenamiento se carga con la potencia en exceso generada por la fuente de energía renovable.

Los resultados arrojados por las simulaciones se muestran a continuación. En la Figura 4.18 se puede visualizar el reparto de potencias; y en la Figura 4.19 y Figura 4.20, los estados de las tensiones y corrientes respectivamente.

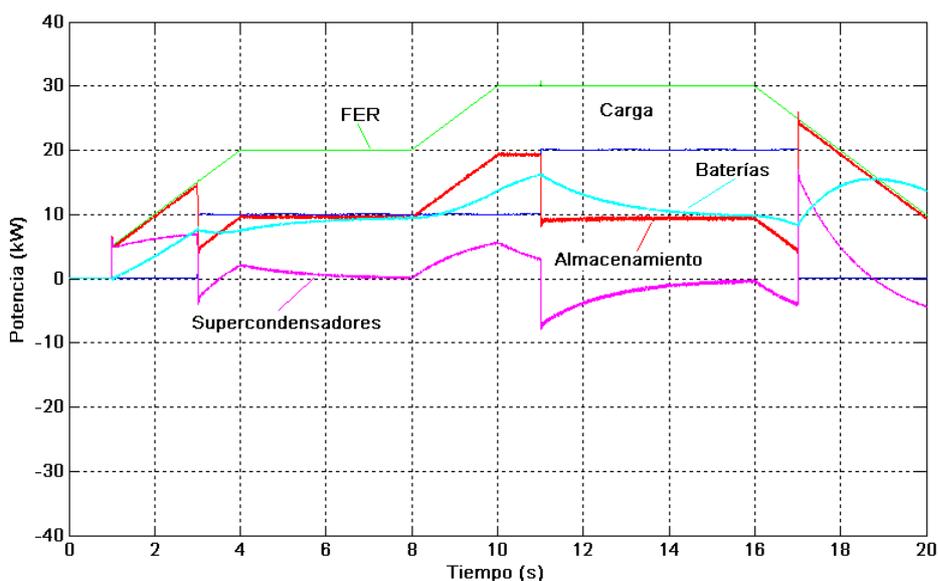


Figura 4.18. Potencias Escenario III

El flujo de potencia del sistema se muestra en la Figura 4.18. Como se observa, dada una producción mayor que la demanda, el sistema de almacenamiento absorbe el exceso de potencia generada. Se aprecian las dinámicas de actuación de los supercondensadores, de las baterías, y la correspondiente al conjunto de ambas.

En la Figura 4.19 y en la Figura 4.20 se presentan las tensiones y corrientes del sistema respectivamente, con la misma interpretación que en simulaciones anteriores.

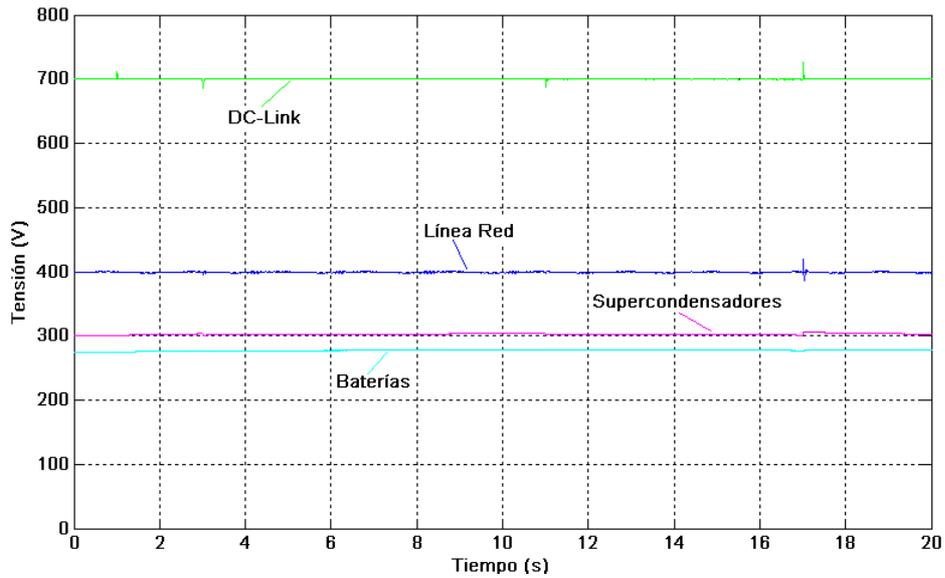


Figura 4.19. Tensiones Escenario III

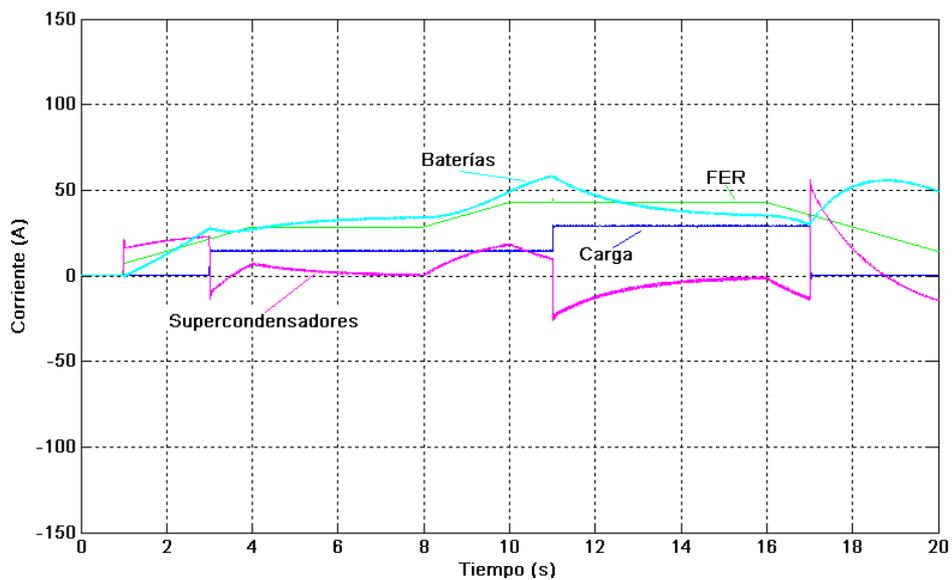


Figura 4.20. Corrientes Escenario III

5.4. Escenario IV. Potencia demandada mayor que potencia generada

En base a lo anteriormente expuesto en el Apartado 4:

- El sistema de almacenamiento es el encargado de suministrar la potencia restante para abastecer la demanda de la carga.

Los resultados arrojados por las simulaciones se muestran a continuación. En la Figura 4.21 se puede visualizar el reparto de potencias; y en la Figura 4.22 y Figura 4.23, los estados de las tensiones y corrientes respectivamente.

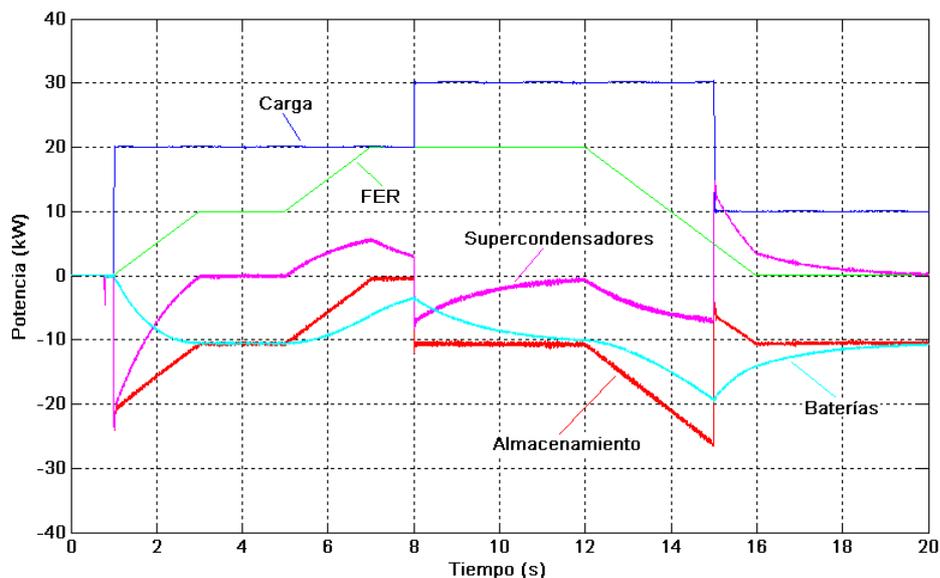


Figura 4.21. Potencias Escenario IV

Como se aprecia en la Figura 4.21, el conjunto formado por la fuente de energía renovable y el sistema de almacenamiento se encargan de suministrar la potencia demandada por la carga. Nótese las dinámicas de actuación de los supercondensadores, de las baterías, y la correspondiente al conjunto de ambas.

En la Figura 4.16 las tensiones del sistema y en la Figura 4.17, las corrientes. Se aprecian las fluctuaciones de la tensión del dc-link y de la red en las entradas y salidas de la carga.

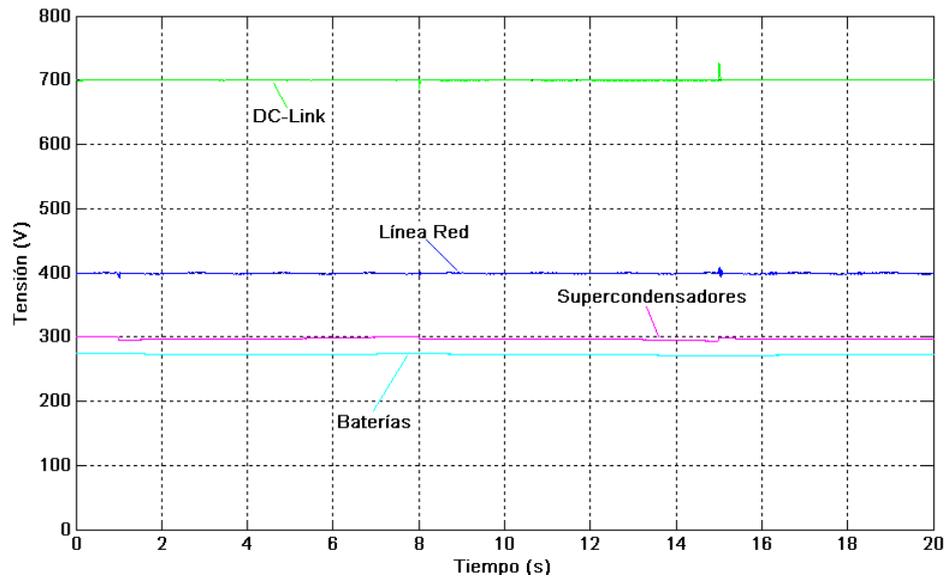


Figura 4.22. Tensiones Escenario IV

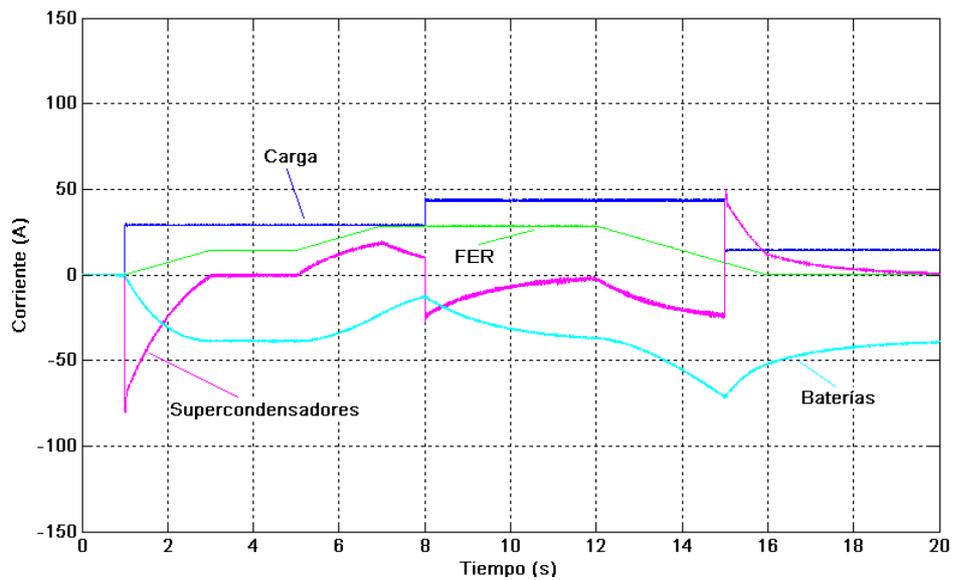


Figura 4.23. Corrientes Escenario IV