

# Control por modo deslizante de un sistema de almacenamiento de energía para aplicaciones en microrredes

Fernando A. Inthamoussou<sup>†</sup>, Jordi Pegueroles-Queralt<sup>‡</sup>, Fernando D. Bianchi<sup>‡</sup>

<sup>†</sup>CONICET - LEICI, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina  
intha@ing.unlp.edu.ar

<sup>‡</sup>Catalonia Institute for Energy Research (IREC), Barcelona, España  
(jpegueroles,fbianchi)@irec.cat

**Resumen**— En este trabajo se presenta el control de un sistema de almacenamiento de energía para aplicaciones en microrredes. Con el objetivo de operar el sistema apropiadamente en todos los modos de operación, se propone el control por modo deslizante de un convertidor DC/DC bidireccional. Las llaves son comandadas por una única ley de modo deslizante modificada dinámicamente en correspondencia con las referencias enviadas por el controlador central de la microrred. Esta característica facilita el diseño, la implementación de la ley de control y el análisis de estabilidad sobre toda la región de operación. La correcta operación de la estrategia de control propuesta es verificada mediante resultados experimentales.

**Palabras Clave**— Sistema de almacenamiento de energía, microrredes, electrónica de potencia, control por modo deslizante, montaje experimental

## 1. INTRODUCCIÓN

Las microrredes son propuestas emergentes para proveer soluciones responsables ecológicamente a los sistemas de energía. En un futuro cercano, las microrredes penetrarán en los sistemas de potencia, especialmente en la red de distribución de energía [1, 2], entregando energía limpia y renovable cerca del consumidor final [3]. Las microrredes están definidas como sistemas eléctricos formados por conjuntos de unidades generadoras y cargas conectadas a la red eléctrica en un único punto, el punto de conexión común (PCC). La introducción de microrredes al sistema de distribución puede contribuir a reducir el esfuerzo de la desactualizada infraestructura actual [4]. En las microrredes, los generadores de energía generalmente están conectados mediante electrónica de potencia, habilitando una forma nueva y flexible de manejar el flujo de energía [5].

Independientemente del paradigma de microrred escogido, un sistema de potencia dominado por interfaces de electrónica de potencia tiene una inercia de masa rotante muy baja, que pueden dar lugar a sistemas inestables. Agregando sistemas de almacenamiento de energía (ESS), la inercia equivalente incrementa la robustez del sistema, haciendo al mismo más inmune a las perturbaciones, tales como cambios en las condiciones de carga

o cambios en la producción de energía eléctrica debido a variabilidad atmosférica [6].

Existen varias posibilidades tecnológicas para la implementación de sistemas de almacenamiento de energía: baterías, volantes de inercia, sistemas de almacenamiento magnéticos superconductores (SMES), supercapacitores y otros [7]. Desafortunadamente, ninguna de estas tecnologías ofrece ventajas claras sobre las otras. Generalmente se adopta una solución híbrida para proveer las necesidades de potencia y almacenamiento requeridas por una microrred [6]. En este trabajo se pondrá la atención en supercapacitores, pero los mismos conceptos pueden ser aplicados a baterías.

Los convertidores electrónicos son inherentemente sistemas conmutados. Técnicas no lineales basadas en sistemas de estructura variable (VSS) y teoría de modo deslizante (MD) resultan esencialmente útiles para estos sistemas [8]. Un gran número de artículos proponen y analizan estrategias de control por MD para convertidores DC/DC en una variedad de aplicaciones, por ejemplo [9, 10, 11]. Sin embargo muchos de estos análisis se realizan en configuraciones unidireccionales, utilizan más de una técnica de control para lograr un objetivo, no proveen todos los modos de operación o no se realizan en el contexto de microrredes. Siendo una estrategia de control no lineal, estrategias por MD dan lugar a leyes de control más generales además de robustez contra variación de parámetros, perturbaciones externas y dinámicas de orden reducida. Por otro lado, un mayor grado de flexibilidad puede ser alcanzado, permitiendo combinar diseños con diferentes objetivos y al mismo tiempo proveer una implementación relativamente simple.

En este trabajo se propone una estrategia de control por MD para un convertidor DC/DC bidireccional para un ESS basado en supercapacitores en el contexto de las microrredes. La idea es producir una única ley de control por MD, simple de implementar y que cubra toda la región de operación (incluyendo el arranque). El artículo está organizado de la siguiente manera. La siguiente sección describe el ESS basado en supercapacitor y presenta la topología del convertidor utilizada. En la sección 3 se introduce la estrategia de control propuesta. Luego, en la sección 4, se presentan los aspectos relacionados con la implementación y en la sección 5 se presenta los re-

sultados experimentales. El artículo termina con algunas conclusiones.

## 2. ESS basado en supercapacitores

La Fig. 1 muestra la topología adoptada para el ESS. La misma consiste de un inversor conectado a la red (convertidor del lado de red, GSC), un bus de continua, un convertidor DC/DC bidireccional (ESSC) y un dispositivo de almacenamiento de energía (ESD). Este último es el dispositivo físico para almacenar energía, supercapacitores para este trabajo.

En la Fig. 1, el controlador  $K_{GSC}$  actúa en el GSC para regular ya sea la tensión del bus de continua o la tensión y frecuencia de la microred [12]. La función de este controlador depende del modo de operación de la microred. En el modo conectado, la regulación del bus de continua es realizada inyectando o consumiendo potencia desde la red para mantener el balance de potencia en el bus de continua. En el modo isla, el GSC realiza soporte de tensión y frecuencia de la microred, actuando como una fuente de corriente desde el punto de vista del bus de continua. Consecuentemente, el controlador  $K_{ESSC}$  del ESSC regula ya sea la potencia intercambiada entre el ESD y el bus de continua o regula la tensión del bus de continua, dependiendo del modo de operación. El diseño de los controladores depende fuertemente del modo de operación de la microred al cuál el ESS es conectado como así también en el ESD utilizado. En esta configuración, el controlador  $K_{ESSC}$  recibe instrucciones desde el controlador central de la microred (MGCC), el cuál determina cuándo el ESS debe almacenar energía y cuándo debe inyectar energía a la red.

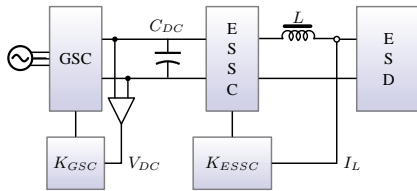


Figura 1: Topología de la interface adoptada para el ESS.

El bus de continua provee cierto grado de desacople entre ambos convertidores, permitiendo realizar el diseño de los mismos separadamente. Típicamente, el GSC en el modo conectado es controlado con un esquema de control en cascada. La estructura del control consiste de un lazo interior más rápido de control de corriente y un lazo exterior más lento de control de tensión que asegura el balance de potencia dentro del convertidor regulando la tensión en el bus de continua. Esta parte del ESS no será discutida, para más detalles de esta parte ver por ejemplo [13].

El ESSC tiene como objetivo regular la energía almacenada en el supercapacitor y obedece a los comandos enviados por el MGCC. La Fig. 2 muestra la topología del convertidor bidireccional adoptado para implementar el ESSC. En esta topología, la tensión es siempre mayor en el lado izquierdo ( $V_{DC}$ ) que en lado derecho ( $V_{ESD}$ ), pero la energía puede fluir en ambas direcciones. Este convertidor puede funcionar en modo reductor entregando

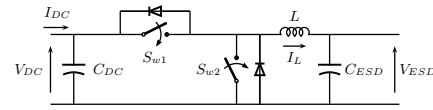


Figura 2: Topología del convertidor utilizado.

energía al ESD o en modo elevador consumiendo energía del ESD. Cada modo de operación es conseguido ajustando adecuadamente el ciclo de trabajo de las llaves. Las llaves  $S_{w1}$  y  $S_{w2}$  son operadas de manera complementaria:  $S_{w1} = \overline{S_{w2}}$ . Este esquema de conmutación evita operación discontinua para valores bajos de referencia de corriente. En ambos modos los diodos en anti paralelo funcionan como diodos de rueda libre.

## 3. Control por MD del ESS

De la Fig. 2, se puede ver que la estructura y la dinámica del sistemas dependen fuertemente del estado de conducción de las llaves, incluso el flujo de la energía puede ser cambiado. El convertidor DC/DC puede ser visto como compuesto por dos subsistemas (reductor y elevador) que pueden ser seleccionados de acuerdo con el ciclo de trabajo aplicado a las llaves. Ambos modos de operación pueden ser descriptos sintéticamente por el siguiente modelo único

$$\begin{cases} \dot{I}_L = -V_{ESD}/L + (V_{DC}/L)S_w, \\ \dot{V}_{ESD} = I_L/C_{ESD}, \end{cases} \quad (1)$$

donde  $C_{ESD}$  es la capacidad del supercapacitor,  $S_w = S_{w1} = \overline{S_{w2}}$  y el suprrayado denota lógica de estado inverso, es decir, si  $S_{wi} = 1$  entonces  $\overline{S_{wi}} = 0$  y  $S_{wi} \in \{0, 1\}$ .  $S_{wi} = 0$  implica llave abierta y  $S_{wi} = 1$  llave cerrada. Esta ecuación representa la dinámica del convertidor DC/DC para ambos modos de operación. Para un ciclo de trabajo de  $S_{w1}$  menor al 50% el convertidor funciona como reductor y como elevador si es mayor al 50%. Las técnicas por MD proveen herramientas poderosas para el diseño de controladores, especialmente para convertidores DC/DC [14]. En este caso, la implementación del controlador resulta relativamente simple y directa debido a que toda la estrategia es básicamente una ley de conmutación que comanda la apertura y cierre de la llaves electrónicas.

### 3.1. Esquema de MD propuesto

El ESSC debe cumplir con varios objetivos de operación dependiendo del estado de la microred y los supercapacitores. Tres objetivos claros pueden ser definidos. Se mostrará que estos objetivos pueden ser alcanzados con una superficie de MD única, simple y de fácil implementación, cuya referencia es modificada en correspondencia con el objetivo perseguido.

#### 3.1.1. Inicio

La razón de esta etapa es poder iniciar el sistema automáticamente desde condiciones iniciales nulas. Para lograr esta característica la corriente por el inductor es regulada a un valor constante  $I_{m\acute{a}x}$ , corriente límite del supercapacitor. Aquí el convertidor funciona en modo reductor.

La siguiente superficie de MD

$$\mathcal{S}(I_L) = I_{m\acute{a}x} - I_L = 0 \quad (2)$$

es propuesta, asociada con la lógica de conmutación

$$S_{w1} = (\text{sign}(I_{m\acute{a}x} - I_L) + 1)/2, \quad S_{w2} = \overline{S_{w1}}. \quad (3)$$

Luego, debe ser verificado si (2) califica como superficie de MD, es decir, si satisface la condición necesaria y suficiente para el establecimiento del MD, o condición de transversalidad ( $\mathcal{L}_g \mathcal{S} = -V_{DC}/L < 0$ ), donde  $\mathcal{L}$  es la derivada de Lie. Si esta condición se satisface, se puede asegurar que las trayectorias apuntan hacia la superficie desde ambos lados de la misma. La condición de existencia puede obtenerse mediante el método del control equivalente. El control equivalente es obtenido de la condición de invariancia ( $\mathcal{S} = 0$  y  $\dot{\mathcal{S}} = 0$ ) y en el caso de la ley de conmutación (3), el control equivalente resulta

$$S_{w1eq} = V_{ESD}/V_{DC}. \quad (4)$$

Existe MD sobre la superficie cuando el control equivalente satisface  $0 \leq S_{w1eq} \leq 1$ . Es decir, existe MD sobre la superficie si  $0 \leq V_{ESD} \leq V_{DC}$  (dominio de MD). Esta condición siempre se satisface en la topología del convertidor en la Fig. 2. La dinámica en MD se obtiene reemplazando en (1) con el control equivalente, resultando

$$\begin{cases} \dot{I}_L = 0 \\ \dot{V}_{ESD} = I_{m\acute{a}x}/C_{ESD} \end{cases} \quad (5)$$

Esta ecuación revela que no hay dinámica en la corriente regulada (corriente positiva constante) y que la tensión en el supercapacitor aumenta de forma lineal con el tiempo. Notar que otras referencias de corriente pueden ser utilizadas. Por otro lado, un control similar puede ser utilizado para descargar el capacitor. En este caso, la corriente de referencia es negativa y el ESSC trabaja en modo elevador. Por lo tanto, la lógica de conmutación es idéntica a (3) pero ahora el ciclo de trabajo de  $S_{w1}$  es menor que el de  $S_{w2}$ . De esta forma, el sistema puede ser apagado por ejemplo para mantenimiento.

### 3.1.2. Potencia constante

En esta etapa, la ley de control es similar a la del caso anterior, pero ahora la referencia de corriente constante es reemplazada con la corriente necesaria para transferir la potencia demandada por el MGCC. La referencia de potencia depende del estado de la microred y puede ser negativa o positiva. En esta etapa la superficie utilizada es la siguiente

$$\mathcal{S}(x) = P_r/V_{ESD} - I_L = 0. \quad (6)$$

que verifica la condición de transversalidad, dado que se cumple  $-V_{DC}/L < 0$ . Luego, la ley de conmutación

$$S_{w1} = (\text{sign}(P_r/V_{ESD} - I_L) + 1)/2, \quad S_{w2} = \overline{S_{w1}} \quad (7)$$

asegura el regimen de MD. El control equivalente resulta

$$S_{weq} = V_{ESD}/V_{DC} - P_r^2 L / (V_{ESD}^3 C_{ESD} V_{DC}) \quad (8)$$

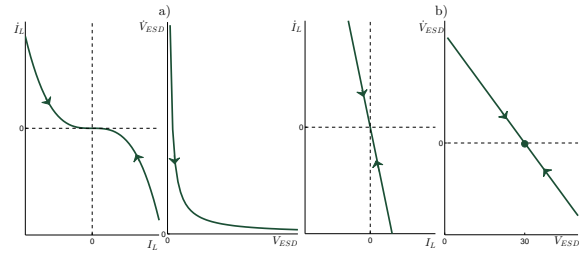


Figura 3: Dinámica de MD para potencia constante y limitación de tensión.

El dominio de MD es  $P_r^2 L / V_{ESD}^3 C_{ESD} \leq V_{ESD} \leq V_{DC} + P_r^2 L / V_{ESD}^3 C_{ESD}$  y siempre se cumple. La dinámica en MD se obtiene reemplazando (8) en (1) y está dada por

$$\begin{cases} \dot{I}_L = -I_L^3 / P_r C_{ESD}, \\ \dot{V}_{ESD} = I_L / C_{ESD} = P_r / (V_{ESD} C_{ESD}). \end{cases} \quad (9)$$

La trayectoria de los estados en MD es ilustrada en la Fig. 3a). Se puede observar que para valores positivos de  $I_L$ , su derivada es siempre negativa y viceversa. Por lo tanto, para todas las condiciones iniciales, la corriente por el inductor converge al punto de equilibrio estable  $I_L = 0$ . En el caso de la tensión en el supercapacitor, su derivada es siempre positiva (para corriente positivas, modo reductor) por lo tanto  $V_{ESD}$  se incrementará si la referencia de potencia se mantiene en valores positivos. Esta es una característica del sistema y es independiente de la estrategia de control utilizada. Por esta razón, es necesario un modo de limitación de tensión para prevenir daños en el supercapacitor. En ambos modos, trabajando como reductor entregando energía al ESD o trabajando como elevador, consumiendo energía desde el ESD, la ley de conmutación es la misma. Esto es debido a la inversión de signo en la corriente por el inductor y en la referencia, como así también la inversión lógica en la señal  $S_{w2}$ .

### 3.1.3. Limitación de tensión

Por razones de operación y seguridad, los supercapacitores deben operar dentro de un rango de tensiones delimitadas por  $\overline{V}_{ESD}$  (valor superior) y  $\underline{V}_{ESD}$  (valor inferior). El límite superior es para proteger la integridad de los supercapacitores. El límite inferior es debido a que los supercapacitores no pueden almacenar mucha energía por debajo de esta tensión y para evitar referencias elevadas de corriente que puedan surgir para referencias de potencia altas. Para garantizar que estos valores son alcanzados suavemente, una superficie de MD adicional es propuesta, la cuál es aplicada cuando  $V_{ESD}$  está en las regiones de transición  $\mathcal{R}_l := \{V_{ESD} | \underline{V}_{ESD} < V_{ESD} < \underline{V}_{ESD} + V_\Delta\}$  y  $\mathcal{R}_u := \{V_{ESD} | \overline{V}_{ESD} - V_\Delta < V_{ESD} < \overline{V}_{ESD}\}$ , donde  $V_\Delta$  define el ancho de las regiones de transición. Por lo tanto, cuando la tensión en el supercapacitor está en la región  $\mathcal{R}_u$ , la superficie de MD es

$$\mathcal{S}(x) = \frac{P_r (\overline{V}_{ESD} - V_{ESD})}{(\overline{V}_{ESD} - V_\Delta) V_\Delta} - I_L = 0, \quad (10)$$

la cuál verifica la condición de transversalidad dado que  $-V_{DC}/L < 0$  se satisface siempre. En este caso, la ley de conmutación se desprende como en los casos anteriores. El control equivalente resulta

$$S_{w_{eq}} = \frac{V_{ESD}}{V_{DC}} - \frac{P_r^2 L (\bar{V}_{ESD} - V_{ESD})}{(\bar{V}_{ESD} - V_{\Delta})^2 V_{\Delta}^2 C_{ESD} V_{DC}}. \quad (11)$$

El dominio de MD es  $P_r^2 (\bar{V}_{ESD} - V_{ESD}) L / (\bar{V}_{ESD} - V_{\Delta})^2 V_{\Delta}^2 C_{ESD} < V_{ESD} < V_{DC} + P_r^2 (\bar{V}_{ESD} - V_{ESD}) L / (\bar{V}_{ESD} - V_{\Delta})^2 V_{\Delta}^2 C_{ESD}$  y se cumple siempre. Reemplazando (11) en (1), se obtiene la dinámica de MD

$$\begin{cases} \dot{I}_L = -\frac{P_r}{(\bar{V}_{ESD} - V_{\Delta}) V_{\Delta}} \frac{I_L}{C_{ESD}}, \\ \dot{V}_{ESD} = \frac{P_r (\bar{V}_{ESD} - V_{ESD})}{C_{ESD} (\bar{V}_{ESD} - V_{\Delta}) V_{\Delta}} \end{cases} \quad (12)$$

Estas expresiones se pueden ver en la Fig. 3b). Es evidente que, para todas las condiciones iniciales, la corriente alcanza el punto de equilibrio estable  $I_L = 0$ . Además, la tensión en el supercapacitor converge al valor final,  $V_{ESD} = \bar{V}_{ESD}$ , sin sobrepasar el límite, mientras que la corriente por el inductor va a cero suavemente. Para el caso de referencias negativas de potencia, el ESSC opera en modo elevador. En estas circunstancias, una superficie similar a (10) puede ser utilizada.

### 3.1.4. Estrategia de control completa

Observando las superficies de MD (2), (6) and (10), resulta claro que se pueden lograr diferentes modos de operación con la misma ley de conmutación

$$S_w = (\text{sign}(I_{r,i} - I_L) + 1)/2$$

con

- Inicio

$$I_{r1} = I_{\text{máx}}, \quad (13)$$

- Modo de potencia constante

$$I_{r2} = P_r / V_{ESD}, \quad (14)$$

- Modo limitación de tensión (límite inferior)

$$I_{r3} = \frac{P_r}{(\underline{V}_{ESD} + V_{\Delta}) V_{\Delta}} (V_{ESD} - \underline{V}_{ESD}), \quad (15)$$

- Modo limitación de tensión (límite superior)

$$I_{r4} = \frac{P_r}{(\bar{V}_{ESD} - V_{\Delta}) V_{\Delta}} (\bar{V}_{ESD} - V_{ESD}). \quad (16)$$

Básicamente, los distintos modos de operación son obtenidos modificando la referencia de corriente. Para el arranque del sistema, la estrategia de control impone una referencia de corriente constante. La misma superficie pero con una referencia negativa puede ser utilizada para descargar el supercapacitor. En la etapa de potencia constante, la referencia de corriente es calculada de acuerdo

con la tensión actual del supercapacitor con el objetivo de proveer la cantidad de potencia indicada por el MGCC. Finalmente, cuando la tensión del supercapacitor alcanza el límite superior o inferior, una superficie de MD de transición es utilizada para llevar suavemente la corriente por el inductor a cero.

**Remarque 1.** En todos los casos existe un único punto de equilibrio estable para la regulación de la corriente por el inductor. Por lo tanto, del análisis anterior se puede concluir que este punto es alcanzado globalmente.

## 4. Implementación experimental

Para centrar la verificación experimental en el convertidor DC/DC, el convertidor del lado de red junto a su controlador en la Fig. 1 fueron reemplazados por una fuente de tensión constante bidireccional. La fuente de continua tiene un límite de 15 A y puede absorber hasta 3,5 A a 35 V.

La estrategia de control por MD propuesta ha sido implementada en la configuración mostrada en la Fig. 4. La tensión del bus de continua,  $V_{DC}$ , es de 35 V, el inductor,  $L$ , de 4,27 mH y la capacidad del BUS,  $C_{DC}$ , de 1 mF. El convertidor fue implementado con un medio puente de IGBT, cada IGBT soporta una corriente máxima de 20 A. La configuración experimental está armada en baja tensión, pero el sistema puede ser fácilmente escalado para tensiones mayores usando el mismo algoritmo de control. El prototipo es operado en baja tensión, debido a que el foco de este trabajo no es la implementación eléctrica sino la implementación y operación del algoritmo. Para niveles bajos de tensión, las medidas pueden verse afectadas de ruido y por lo tanto la performance. Para reducir este efecto se han utilizado filtros pasa bajos en el experimento. El banco de supercapacitores está com-

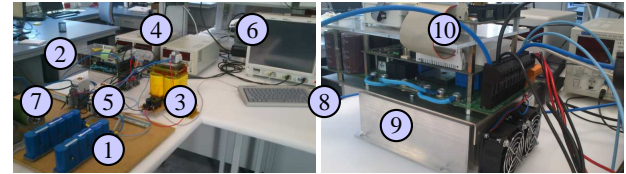


Figura 4: Montaje experimental. (1) banco de supercapacitores, (2) convertidor DC/DC, (3) inductor, (4) fuente DC, (5) protecciones, (6) osciloscopio, (7) carga, (8) bus de DC y electrónica de potencia, (9) placa de drivers y protecciones, (10) placa de control.

puesto de dos módulos MAXWELL BMOD0058 E016 B02 de 16,2 V y 58 F cada uno, conectados en serie. Los principales parámetros son:  $\bar{V}_{ESD_{MAX}} = 32,4$  V,  $\bar{V}_{ESD} = 20,5$  V,  $\underline{V}_{ESD} = 10$  V,  $I_{\text{máx}} = 19$  A<sub>RMS</sub> y  $C_{ESD} = 29$  F.

## 5. Resultados experimentales

El experimento realizado incluyó todas las etapas del algoritmo de control para verificar la estrategia propuesta. El experimento dura 200 s y comprende las siguientes etapas: inicio, pre-carga de los supercapacitores a corriente constante, una etapa de potencia constante con diferentes niveles de referencia de potencia y la etapa final



cuando la tensión máxima es alcanzada. La corriente de pre-carga es fijada a 8 A, sin embargo puede ser aumentada hasta el límite de corriente del banco de supercapacitores,  $I_{max}$ . Durante la etapa de potencia constante, la referencia de potencia fue modificada produciendo el perfil con valores,  $P_{r1} = 80$  W,  $P_{r2} = 40$  W,  $P_{r3} = 0$  W,  $P_{r4} = -20$  W,  $P_{r5} = 110$  W y  $P_{r6} = 35$  W. Por cuestio-

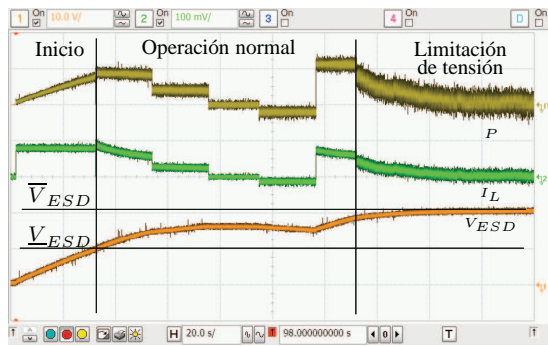


Figura 5: Captura del osciloscopio del experimento. De arriba hacia abajo: potencia, corriente y tensión del supercapacitor.

nes de claridad en la explicación, el experimento fue dividido en tres partes como se indica en la Fig. 5: 1) inicio, a corriente constante, 2) operación nominal, siguiendo diferentes referencias de potencia, 3) limitación de tensión.

### Inicio

La Fig. 6 es un zoom de la corriente en la Fig. 5, desde  $t = 0$  s hasta  $t = 15$  ms. De la Fig. 6, se puede ver que el controlador consigue una correcta regulación de la corriente en el punto deseado. El ripple de corriente es consecuencia de la banda de histéresis usada en la implementación del control por MD. Para este experimento, la tensión inicial en el banco de supercapacitores fue de 0 V. El ripple ( $\Delta I$ ) fue ajustado en 350 mA, mostrado con la línea de puntos Fig. 6. Se puede observar que la corriente sobrepasa levemente el límite superior del ripple de corriente. Esto es resultado de la frecuencia de muestreo limitada del DSP. De todas formas, la performance obtenida por el controlador es apropiada para la aplicación que se desarrolla. En la Fig. 6, se puede ver también el modo de alcance. Es importante mencionar que el arranque es una situación crítica en cuanto a la diferencia de tensión que se presenta en el inductor. Esto produce una derivada de corriente mayor, siendo la instancia de mayor velocidad en la dinámica del sistema. De este modo, la performance durante en el arranque es menor que durante el modo de operación normal. De todas formas, las performance requerida en este modo es menor y es alcanzada correctamente. Asimismo, este no es un modo normal del sistema.

### Potencia constante

La potencia es medida como el producto de la corriente por el inductor y la tensión en el supercapacitor. Por convención, la potencia es positiva cuando está siendo entregada al supercapacitor desde el bus de continua y

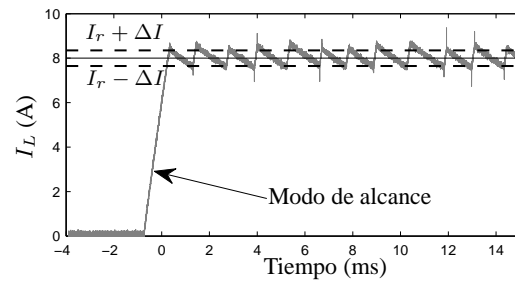


Figura 6: Zoom del inicio del sistema.

viceversa. Cabe aclarar que debido a las pérdidas en el convertidor, ésta no es la potencia entregada a la red. El MGCC es el encargado de compensar éstas pérdidas.

La Fig. 7 muestra el seguimiento de la potencia para cinco niveles distintos. Se puede observar que la corriente converge rápidamente a la superficie de MD correspondiente a la potencia deseada. También se puede observar que la transición entre los diferentes niveles de referencia de potencia se realiza rápidamente y sin sobrepaso. El error de seguimiento es cero dado que el control por MD así implementado asegura error de estado estacionario nulo. La leve desviación de corriente mayor que el ripple que se observa, es debida a los picos (ahora todos juntos) producidos por la conmutación como se pueden ver de la Fig. 6.

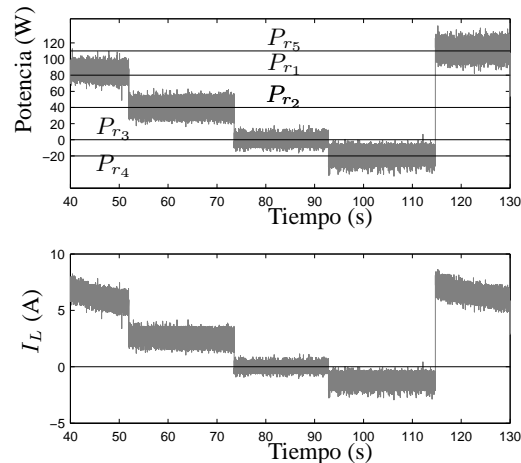


Figura 7: Zoom de la operación a potencia constante.

### Limitación de tensión

La superficie de deslizamiento definida en (10) es responsable de llevar  $V_{ESD}$  a  $\bar{V}_{ESD}$  suavemente y sin sobrepaso. El resultado de la implementación de esta superficie es mostrado en la Fig. 8, que es un zoom de la Fig. 5 desde  $t = 130$  s a  $t = 200$  s. La tensión del supercapacitor  $V_{ESD}$  se mantiene a 20,5 V ( $\bar{V}_{ESD}$ ) garantizando la integridad de los mismos. La tensión es mantenida constante a  $\bar{V}_{ESD}$  manteniendo el supercapacitor a su máxima capacidad hasta que una referencia de potencia negativa es recibida desde el MGCC. Luego de la

recepción del comando de descarga, el controlador entra nuevamente en la etapa de potencia constante comenzando un nuevo ciclo.

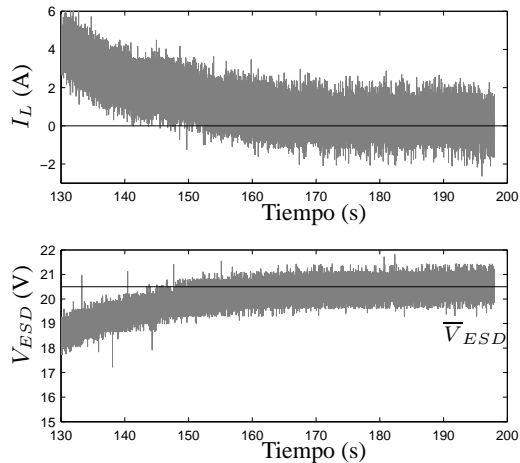


Figura 8: Zoom de la limitación de tensión.

## 6. Conclusiones

Este trabajo presenta una nueva estrategia de control para un convertidor DC/DC bidireccional para controlar el intercambio de potencia entre un banco de supercapacitores y una microred con conexión a la red. La ley de control propuesta está basada en una única superficie de modo deslizante la cuál es capaz de cubrir todas las regiones de operación, incluso el inicio del sistema. El uso de diferentes referencias de corriente dependiendo del objetivo particular nos permitió producir una ley de comando para los dispositivos semiconductores de simple implementación. Con el objetivo de evaluar situaciones reales, la ley de control fue implementada en un experimento. Distintos escenarios cubriendo todo los modos de operación, incluyendo el inicio y situaciones extremas donde el supercapacitor alcanza el máximo de tensión, fueron analizados. La robustez del control contra los cambios en los parámetros del sistema fueron verificados. En todos los escenarios analizados la estrategia de control propuesta muestra una performance aceptable.

## Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por CONICET (PIP 00361 2012/14), UNLP (11/I164 2012/15), EIT and KIC-InnoEnergy bajo el proyecto SMART POWER (KIC-SMARTPOWER) y por el European Regional Development Funds (ERDF, “FEDER Programa Competitivitat de Catalunya 2007-2013”)

## REFERENCIAS

[1] N. Hatziargyriou, H. Asano, R. Iravani, and C. Marney, “Microgrids,” *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 5, no. 4, pp. 78–94, 2007.

[2] M. Barnes, J. Kondoh, H. Asano, J. Oyarzabal, G. Ventakaramanan, R. Lasseter, N. Hatziargyriou,

and T. Green, “Real-world microgrids - an overview,” in *Proc. of the IEEE Int. Conf. on SoSE*, 2007, pp. 1–8.

- [3] A. Mehrizi-Sani and R. Iravani, “Potential-function based control of a microgrid in islanded and grid-connected modes,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 4, pp. 1883–1891, 2010.
- [4] R. Lasseter and P. Paigi, “Microgrid: a conceptual solution,” in *Proc. of the IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*, vol. 6, no. June. IEEE, 2004, pp. 4285–4290.
- [5] F. Katiraei and M. Iravani, “Power Management Strategies for a Microgrid With Multiple Distributed Generation Units,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 4, pp. 1821–1831, 2006.
- [6] A. Etxeberria, I. Vechiu, H. Camblong, and J.-M. Vinassa, “Comparison of three topologies and controls of a hybrid energy storage system for microgrids,” *Energy Conversion and Management*, vol. 54, no. 1, pp. 113–121, 2012.
- [7] F. Díaz-González, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, and R. Villafáfila-Robles, “A review of energy storage technologies for wind power applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 4, pp. 2154–2171, 2012.
- [8] V. Utkin, J. Guldner, and J. Shi, *Sliding Mode Control in Electro-Mechanical Systems, Second Edition*. CRC Press, 2009.
- [9] N. Vazquez, C. Hernandez, J. Alvarez, and J. Arau, “Sliding mode control for DC/DC converters: a new sliding surface,” in *Proc. of IEEE ISIE*, vol. 1, 2003, pp. 422–426.
- [10] F. Bianchi, H. De Battista, and R. Mantz, “On the stability of DC-to-DC converters in PV systems undergoing sliding motions,” *Int. Journal of Systems Science*, pp. 637–647, 2004.
- [11] F. Ciccirelli and D. Lauria, “Sliding-mode control of bidirectional DC-DC converter for supercapacitor energy storage applications,” in *Proc. of the Int. SPEEDAM*, 2010, pp. 1119–1122.
- [12] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. Rodríguez, “Control of power converters in AC microgrids,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 11, pp. 4734–4749, 2012.
- [13] F. D. Bianchi, A. Egea-Alvarez, A. Junyent-Ferr, and O. Gomis-Bellmunt, “Optimal control of voltage source converters under power system faults,” *Control Eng. Practice*, vol. 20, pp. 539–546, 2012.
- [14] W. Perruquetti and J. P. e. Barbot, *Sliding Mode Control in engineering*. Marcel Dekker, 2002.