

## TÉCNICAS BÁSICAS DE ADMINISTRACIÓN PARA ENERGÍAS RENOVABLES: UNA BREVE REVISIÓN

López-Flores, D.R., Durán-Gómez, J.L.  
Tecnológico Nacional de México / I. T. Chihuahua  
División de Estudios de Posgrado e Investigación  
Ave. Tecnológico #2909, Col. 10 de Mayo  
Chihuahua, Chih., México, CP. 31310  
Tel.: (614) 201-2000, Fax: (614) 413-5187  
drlopez@itchihuahua.edu.mx, jlduran@ieee.org

### RESUMEN

El cambio climático es uno de los temas principales desafiantes en la agenda de cada país, una alternativa para frenar sus efectos negativos son las Energías Renovables (ERs), sin embargo, su naturaleza intermitente y variable crean problemas relacionados con la calidad de energía, confiabilidad y estabilidad de la red eléctrica. Considerar sistemas de almacenamiento de energía (ESS, *Energy Storage Systems*) en las ERs, es una alternativa viable para mitigar estos problemas, sin embargo, para hacer una óptima repartición de potencia entre las tecnologías ESS y el sistema de ERs se requiere de un sistema de gestión de energía (EMS, *Energy Management System*). En este artículo se presentará una breve revisión de las principales técnicas EMS básicas que han sido discutidas y utilizadas en artículos relacionados al tema, un análisis comparativo y como elegir la mejor técnica EMS básica con base a los beneficios que desee obtener por las tecnologías ESS y el algoritmo EMS.

Palabras Clave: energías renovables, eólica, almacenamiento de energía, gestión de energía, análisis, review.

### ABSTRACT

Nowadays, the topic more important in the schedule of many countries is the climatic change. The Renewable Energy Resources (RES) can be a solution to help in slowing down or mitigate their effects. Nature Intermittent and variable of the RES brings problems in relation with power quality, reliability and stability when RES are connected to utility. Energy Storage Systems (ESS) with RES can be a solution to help in mitigating those problems. An Energy Management System (EMS) is required in order to share energy from ESS technology and RES to the electric power system. In this paper, it is presented a brief review of some of the main EMS basic techniques which will be reviewed and discussed from related papers. A comparative analysis and how to make the best selection of an EMS technique base on desired benefits by ESS technologies and EMS algorithm is realized too.

Keywords: Renewable energy sources, wind, energy storage, energy management, reviews, analysis.

### 1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático en la actualidad, es el responsable de problemas relacionados con la supervivencia de seres vivos y ecosistemas en la tierra. Una solución para amortiguar estos problemas son las ERs, como la eólica y/o solar. Dentro del marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático se

firmó un acuerdo llamado el tratado de París [1], en el cual se establecen medidas y sugerencias para contrarrestar los efectos negativos del cambio climático. México en respuesta a esto, lanza en el Diario de la Federación una ley para promover el uso de tecnologías y combustibles más limpios, en ella se determinó que México deberá de contar con un 50 % de participación con energías limpias en la demanda total del sistema eléctrico nacional para finales del 2050, estimada en 175,200 Mega-watts (MW) [2]. Este porcentaje de participación traerá problemas asociados a la naturaleza intermitente y variable de las ERs (eólica y/o solar), tales como: la calidad de energía, estabilidad y confiabilidad en el sistema eléctrico nacional [3]. Una posible solución a estos problemas es la integración de tecnologías ESS con las ERs en un bus de tensión de corriente directa (*dc*, *direct current*), promoviendo con esta solución, una política de autoconsumo y/o redes eléctricas aisladas de abastecimiento de energía [4]. Las altas fluctuaciones y variaciones de las ERs como la eólica y/o solar contienen componentes de potencia de alta y baja frecuencia, debido a esto es recomendable la hibridación de dos tecnologías ESS, una de alta densidad de potencia para procesar las componentes de baja frecuencia y la otra de alta densidad de energía para procesar las componentes de alta frecuencia, ejemplo: la batería y el supercapacitor (SC) [5]. Esta hibridación es conocida como sistemas híbridos de almacenamiento de energía (HESS, *Hybrid Energy Storage System*), donde las tecnologías ESS pueden ser conectadas en topologías pasivas, semiactivas, activas y serie mediante convertidores *dc-dc* bidireccionales para absorber las fluctuaciones y variabilidad de las ERs, inclusive cubrir los perfiles de demanda, manteniendo al mismo tiempo la estabilidad del bus de tensión de *cd* y regiones seguras de operación de tensión [6], [7]. Sin embargo, para lograr una óptima y eficiente repartición de potencia entre las tecnologías ESS, la carga y el sistema de potencia se requiere de una técnica EMS que active adecuadamente a los convertidores *dc-dc* bidireccionales de potencia [5], [7]. En las siguientes secciones se presentará una breve revisión de las principales técnicas EMS básicas que han sido discutidas y utilizadas en artículos relacionados al tema, un análisis comparativo y como elegir la

mejor técnica *EMS* con base a los beneficios que desee obtener por las tecnologías *ESS* y el algoritmo *EMS*.

## 2. TÉCNICAS *EMS*

Las técnicas *EMS* se dividen principalmente en básicas y avanzadas, sus aplicaciones no solo se limitan a energías renovables, la podemos encontrar desde aplicaciones para vehículos eléctricos híbridos con celdas de combustible [8] o vehículos eléctricos con base a SC y baterías [9], hasta en aplicaciones residenciales con sistemas de respaldo de energía con base en SC y baterías [10]. Las técnicas *EMS* avanzadas se dividen a su vez en basadas en reglas y en optimización, y no serán discutidas en el presente documento. Dentro de las técnicas *EMS* básicas podemos encontrar principalmente a la de caída de tensión y filtrado lineal, las cuales, son algoritmos que mapean las mejores señales de referencia hacia la interfaz de control, donde estas, determinan las señales de activación ( $D_{SC}$  y  $D_{BAT}$ ) para los convertidores de potencia *dc-dc* bidireccionales con base a una entrada (ver esquema general en Fig. 1), como: potencia generada por la fuente renovable ( $P_{GEN}$ ), potencia demandada por la carga ( $P_{DEM}$ ), el valor actual del tensión ( $V_{dc}$ ) o corriente ( $I_{dc}$ ) del bus de *dc* o el valor actual de tensión ( $V_{HESS}$ ) o corriente ( $I_{HESS}$ ) de la tecnología *HESS*. Obteniendo como resultado, ciertos beneficios que se suman al sistema *HESS*, tales como: estabilidad y regiones de operación seguras de tensión en el bus de *dc* ( $V_{dc}$ ), absorber las intermitencias y variabilidad de las ERs, suministrar potencia al perfil de demanda, minimizar los picos de carga/descarga en la tecnología *ESS* de alta densidad de energía, optimizar el dimensionamiento de *HESS* y su ciclo de vida [5], [7].

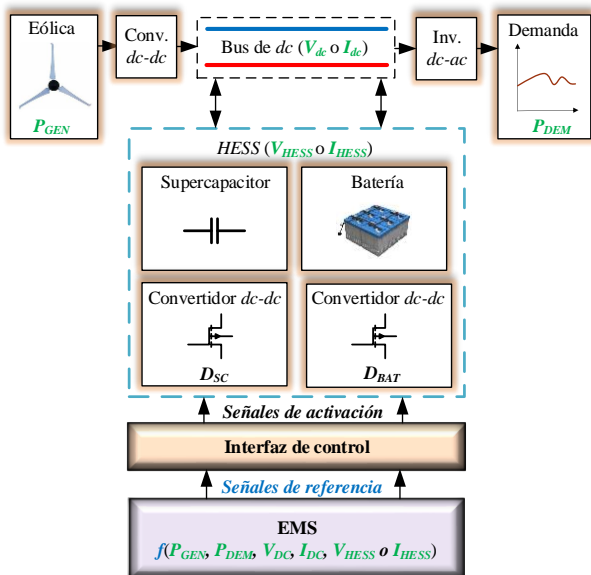


Fig. 1 Esquema general de las técnicas *EMS* básicas.

### 2.1. Caída de tensión

La simplicidad es un atributo que distingue a la técnica *EMS* de caída de tensión, dentro de este contexto en [11] presentaron el

control y administración de la energía eólica, una fuente convencional con base en gasolina y un banco de baterías. Donde utilizaron un enfoque multidimensional, debido, a que consideran más de una variable (velocidad del viento,  $V_V$  y la tensión del bus de *dc*,  $V_{dc}$ ) para el diseño del algoritmo *EMS*. De acuerdo con [11], el considerar más de una variable, permite obtener mejores mapeos hacia las señales de referencia, es decir, la corriente de referencia para la batería ( $I_{BAT\_Ref}$ ). Esta señal de referencia es procesada mediante una interfaz de control, es decir, lazo de control PI (Proporcional Integral) de tensión, el cual determina la señal de activación del convertidor de potencia *dc-dc* bidireccional que controla el flujo de potencia en las baterías ( $D_{BAT}$ ), obteniendo de esta forma la máxima utilización de la potencia eólica y la mínima requerida por la fuente convencional basada en gasolina. Los resultados de la simulación en [11] muestran que el considerar la potencia del viento en el algoritmo *EMS*, proporciona una ganancia adicional de energía para compensar la tensión en el bus de *dc* del sistema en torno al +/- 5% con respecto a un nivel de 300 V. Sin embargo, los autores de este documento, consideran a la batería como una fuente ideal, es decir siempre se encuentran lista para operar, en la vida real sabemos que esto no es así, su capacidad de operación está relacionada a su estado de carga  $SOC_{BAT}$ .

En el trabajo presentado por [12], para mantener la tensión regulada en el bus de *dc* de un sistema eólico, propusieron un esquema con base en batería y un convertidor reductor-elevador *dc-dc* bidireccional para regular el modo de carga y descarga con base en un lazo de control de tensión PI. Sin embargo, la ausencia de hibridación con otro dispositivo *ESS* como el SC y la ausencia de un lazo de control interno de corriente para la batería podrían ocasionar fuertes daños en la batería a corto plazo, debido a los altos picos de corriente de carga y descarga que presenta este esquema. Para resolver este problema en [13] se presentó la regulación de la tensión del bus de *dc* mediante un lazo de control externo para regular la tensión y un lazo de control interno para regular la corriente, solo que en vez de emplear una interfaz de control PI, emplearon una interfaz por modos deslizantes, que a diferencia de una interfaz de control PI, resulta con más robustez ante transitorios debidos a variaciones de la fuente renovable y la demanda de la carga. Este esquema es el más utilizado en la actualidad, ya que protege de fuertes picos de corriente a la tecnología de alta densidad de energía durante el proceso de carga y descarga, esto debido a la interfaz de control interna de corriente [14].

Con base en [11]–[14] se infiere que el control por caída de tensión es una de las técnicas más utilizadas para gestionar la energía entre la tecnología *ESS* y el sistema de potencia, debido a su simplicidad. En la Fig. 2 se intenta generalizar el esquema de control por caída de tensión para gestionar la energía en una batería o SC, con dos o una interfaces de control PI. Consiste esencialmente en regular la tensión  $V_{dc}$  por medio del módulo

SC o batería, mediante un lazo externo de control de tensión para la regulación de  $V_{dc}$  y/o un lazo interno de control de corriente para la regulación de corriente del SC ( $I_{SC}$ ) o de la batería ( $I_{BAT}$ ). La diferencia entre la tensión deseada en el bus de  $dc$  ( $V_{dc\_Ref}$ ) y el actual ( $V_{dc}$ ) resulta en la cantidad de tensión a compensar ( $E$ ) por el lazo externo de control de tensión del SC o la batería, la cual determina la señal de control ( $U$ ) que es procesada por un modulador de ancho de pulso (*PWM, Pulse Width Modulation*) para generar finalmente el ciclo de trabajo ( $D$ ) que activa al convertidor  $dc-dc$  bidireccional del SC o de la batería ( $D_{SC}$  o  $D_{BAT}$ ). En caso de contar con un lazo interno de control de corriente, la salida del lazo externo de control de tensión es tomada como la corriente de referencia para el SC o batería ( $I_{SC\_Ref}$  o  $I_{BAT\_Ref}$ ) con la finalidad de proteger al dispositivo *ESS* de grandes picos de carga y descarga. En algunos casos puede ser tomada una segunda variable ( $V_v$ ) en el algoritmo *EMS* con la finalidad de obtener ganancias adicionales para estabilizar con mayor velocidad la tensión en el bus de  $cd$  y mantenerlo operando dentro de regiones seguras, es decir, ventanas de operación menores al  $\pm 30\%$  con respecto a la tensión nominal, fuera de este rango, podrían presentarse altas magnitudes y picos de corriente que tiene que absorber o suministrar las tecnologías *ESS* y el sistema de potencia, ocasionando daños irreversibles en los mismos.

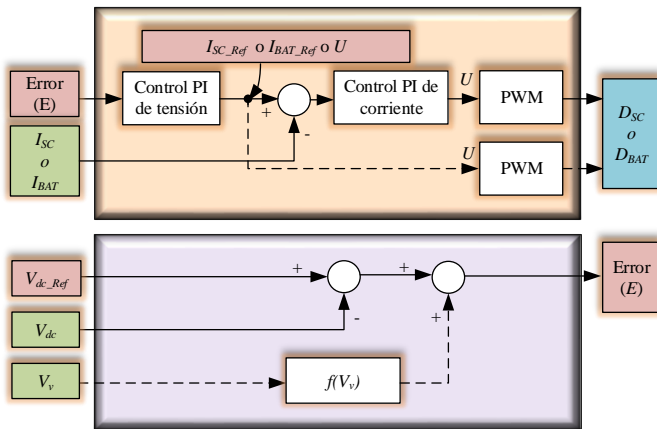


Fig. 2 Técnica EMS de control por caída de tensión.

## 2.2. Filtrado Lineal

La mitigación de componentes de baja y alta frecuencia debida a las energía eólica o la demanda de la carga no puede ser llevada a cabo por uno sola tecnología *ESS* eficientemente, es decir, la batería solo puede absorber las componentes de baja frecuencia debido a su lenta dinámica de respuesta. Por tales motivos es necesario de contar con la hibridación de alguna otra tecnología *ESS* de alta densidad de potencia como el SC en cualquiera de sus topologías. Dentro de este contexto, en [15] y [16] consideraron la técnica *EMS* de control por caída de tensión mostrado en la Fig. 2 con la introducción del concepto de filtrado lineal entre el lazo externo de control PI de tensión y el lazo interno de control PI de corriente de la batería para

separar las componentes de potencia de baja y alta frecuencia. La finalidad de la técnica *EMS* de filtrado lineal es repartir eficientemente la potencia entre el sistema de potencia y *HESS* durante los procesos de carga y carga, además, de minimizar y suavizar los picos de la batería. En este trabajo lograron demostrar que hibridar a la batería con el modulo SC, tiene un impacto positivo en la vida útil de la batería y provee una mejor estabilidad en la tensión del bus de  $dc$ .

La Fig. 3 intenta mostrar el esquema de la técnica *EMS* con base en filtrado lineal, donde el lazo externo de control PI de tensión procesa la diferencia de  $V_{dc\_Ref}$  y  $V_{dc}$  para mantener la regulación de tensión en el bus de  $dc$  dentro de límites seguros, este lazo de control da como resultado la corriente necesaria ( $I_{COMP}$ ) que tiene que compensar la tecnología *HESS* en el bus de  $dc$ . Esta corriente contiene componentes de alta y baja frecuencia debido a las fluctuaciones e intermitencia de la fuente renovable y el perfil de demanda de carga. Al aplicar el filtro lineal sobre  $I_{COMP}$  se obtiene la componente de corriente de baja frecuencia necesaria que tendrá que inyectarse o absorberse al bus de  $dc$  por parte de la batería, es decir, el resultado es la corriente de referencia ( $I_{BAT\_Ref}$ ) para el lazo de control PI de corriente de la batería. La diferencia entre  $I_{BAT\_Ref}$  y la corriente actual de la batería ( $I_{BAT}$ ) es procesada por este lazo de control, la cual produce la señal de control ( $U_{BAT}$ ) para el modulador *PWM*, el cual genera la señal de activación  $D_{BAT}$  para el convertidor  $dc-dc$  bidireccional que controla el flujo de potencia de la batería. La diferencia entre  $I_{COMP}$  e  $I_{BAT\_Ref}$  resulta en la componente de corriente de alta frecuencia que deberá inyectarse o absorberse al bus de  $dc$  por parte del SC, es decir es la corriente de referencia ( $I_{SC\_Ref}$ ) para el segundo lazo interno de control PI de corriente que activará al convertidor bidireccional  $dc-dc$  que controla el flujo de potencia en el SC.

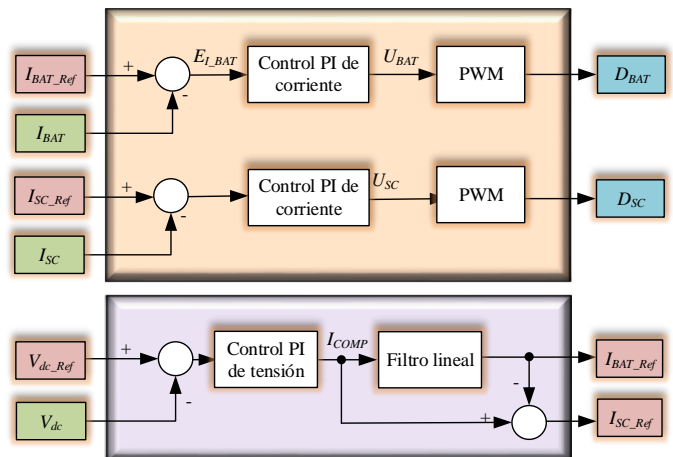


Fig. 3 Técnica EMS de filtrado lineal.

En la técnica *EMS* de filtrado lineal se han propuesto algunas mejoras, como la propuesta por [17] aplicada a un sistema solar, la cual consiste en mandar la componte del error

( $E_{I\_BAT}$ , diferencia entre  $I_{BAT\_Ref}$  e  $I_{BAT}$ ) del lazo interno PI de corriente de la batería hacia el lazo de compensación de corriente PI del SC. El error  $E_{I\_BAT}$  es adicionado a la corriente de referencia  $I_{SC\_Ref}$  con la finalidad de obtener una ganancia adicional de corriente a compensar por el SC. Esta modificación corrige mejor el error  $E_{I\_BAT}$  que tiende a permanecer debido a la dinámica de lenta respuesta de la batería. Otros autores, han modificado la técnica convencional de filtrado lineal, inspirados en minimizar los disturbios en el bus de  $dc$  y tener los máximos beneficios de *HESS* con base en las tecnologías del SC y la batería, tales como:

»» La introducción en [18] de un limitador de tasa de corriente para el proceso de carga/descarga de la batería, colocado entre el filtro lineal y el punto de suma del lazo interno de control PI de corriente de la batería, permitiendo un mejor rastreo de corriente de la batería, es decir minimizar  $E_{I\_BAT}$ .

»» La utilización en [19] del mismo esquema mostrado en la Fig. 3, pero manteniendo un enfoque en el seguimiento de potencia en lugar de la tensión  $V_{dc}$ .

»» La introducción de una ganancia controlada por [20]–[22] al esquema de la Fig. 3 para penalizar  $I_{BAT\_Ref}$ . Estas técnicas tratan de mantener el  $SOC_{BAT}$  dentro de márgenes de operación seguros y evitar daños por sobrecarga y profunda descarga, esto, podría ser considerado como la línea divisoria entre las técnicas *EMS* básicas y avanzadas.

### 2.3. Análisis comparativo

La técnica *EMS* por caída de tensión puede ser implementada mediante tecnología analógica y/o digital, su nivel de complejidad es bajo, debido a que solo requiere de dos a tres variables sensadas y de un punto de suma para determinar la compensación necesaria que las tecnologías *ESS* deberán absorber o suministrar al bus de tensión de  $dc$ , en caso de considerar ganancias adicionales a las señales de referencia, su complejidad aumenta, debido al modelo matemático necesario para realizar el mejor mapeo de las ganancias requeridas por el sistema de potencia y renovable, además, el problema se puede convertir en un problema de optimización, desde que el algoritmo pasa de dos a tres dimensiones, sin embargo, esta estrategia mantiene una mejor estabilidad del bus de tensión  $dc$  y regiones de operación de tensión seguras. Este algoritmo, presenta buen desempeño en condiciones de operación de corto plazo, mas no a largo plazo, es decir, es posible que sus parámetros de control deban ser ajustados semana tras semana, desde que no contemplan situaciones como la degradación de las tecnologías *ESS*. La falta de hibridación de dos o más tecnologías *ESS* en el esquema *EMS* por caída de tensión, somete a la tecnología *ESS* de alta densidad de energía a fuerte estrés impactando negativamente en su ciclo de vida, esto, debido a que suministra o absorbe fuertes picos de corriente y

un número elevado de ciclos de carga/descarga. La tensión en el bus de  $cd$  tiende a estabilizarse lentamente ante perturbaciones tales como la demanda, las fluctuaciones y variaciones de las ERs, desde que la estabilización del bus de  $dc$  solo depende de la tecnología *ESS* de alta densidad de energía, la cual se caracteriza por tener una dinámica de respuesta lenta.

La técnica *EMS* de filtrado lineal puede implementarse con base en tecnología analógica y/o digital, el requerir un filtro lineal para separar las componentes de alta y baja frecuencia hace que el nivel complejidad se eleve, además, como consecuencia de realizar una separación de frecuencias, surge la necesidad de utilizar tres interfaces de control, una externa para controlar la tensión del bus de  $cd$  y dos internas para la regulación de corriente en las tecnologías *ESS*. Este algoritmo presenta mejores condiciones de operación a corto plazo y largo plazo, debido a que la hibridación de dos tecnologías *ESS* permite mantener por más tiempo, mejores niveles de estado de carga, evitando la pronta degradación las tecnologías *ESS*. Además, los picos de corriente, los ciclos de carga/descarga y el tiempo de estabilización de la tensión en el bus de  $cd$  en la tecnología *ESS* de alta densidad son minimizados, debido a que el algoritmo *EMS* de filtrado lineal reparte la potencia más eficientemente en la tecnología *ESS* de alta densidad energía y potencia, es decir, la tecnología *ESS* de alta densidad se caracteriza por tener una dinámica de respuesta rápida, como consecuencia, puede absorber o suministrar con velocidad los fuertes picos de corriente provenientes de las ERs y/o la demanda, evitando que la tecnología de alta densidad de energía se someta a un fuerte estrés.

La Tabla 1 resume los principales atributos de las dos técnicas *EMS* básicas analizadas en este artículo, en ella se trata de evidenciar las ventajas y desventajas de cada una de ellas.

Tabla 1. Principales atributos de las técnicas *EMS* básicas.

Atributos	Caída de tensión	Filtrado lineal
Implementación	Analógica y digital	Analógica y digital
Complejidad	Baja	Media
Variables sensadas	$I_{BAT}$ o $I_{SC}$ y $V_{dc}$ Con base en ganancia adicional: $I_{BAT}$ o $I_{SC}$ , $V_{dc}$ y $V_v$	$I_{BAT}$ , $I_{SC}$ y $V_{dc}$
Respuesta Dinámica	Con base en batería: Lenta	Alta
Nivel de estrés	Alta	Medio
Interfaces de control	1 Considerando regulación de corriente: 2	3
Hibridación	No	Batería y supercapacitor



#### 2.4. Elección de la mejor técnica EMS básica

De acuerdo con la tabla 1 y considerando un sistema eólico, la elección de la técnica EMS debe realizarse con base a los beneficios que se desea obtener por la técnica EMS y las tecnologías ESS. Se presentan a continuación dos casos para tratar de explicar cómo llegar a la elección de la técnica EMS.

*Caso 1: Fácil implementación y mitigación de las componentes de potencia de baja frecuencia.* La técnica EMS por caída de tensión es la más adecuada para este caso, desde que solo se requiere sensar la tensión actual del bus de  $dc$  y de una interfaz de control. Esta configuración la podemos apreciar en la Fig. 4, la compensación necesaria a suministrar o absorber al bus de  $dc$  por la batería se determina con base en la diferencia  $V_{dc}$  deseado y el actual, el resultado ( $I_{COMP}$ ) se procesa por un controlador PI de tensión, el cual determina la señal de control ( $U$ ) que es pasada a través de modulador PWM para generar las señal de activación ( $D_{BAT}$ ) del convertidor dc-dc bidireccional que controla el flujo de potencia de la batería. Esta configuración permite el control activo de potencia entre la batería y el sistema de potencia, también presenta buen desempeño en estado estable, sin embargo, debido a la lenta dinámica de la batería, el tiempo de estabilización ante perturbaciones en el bus de tensión de  $dc$  suele ser lento. Además, la batería está sujeta a fuerte estrés desde que no se contempla una interfaz interna para regular la corriente durante el proceso de carga y descarga de la batería. Por tales motivos, el ciclo de vida de la batería se ve considerablemente afectado.

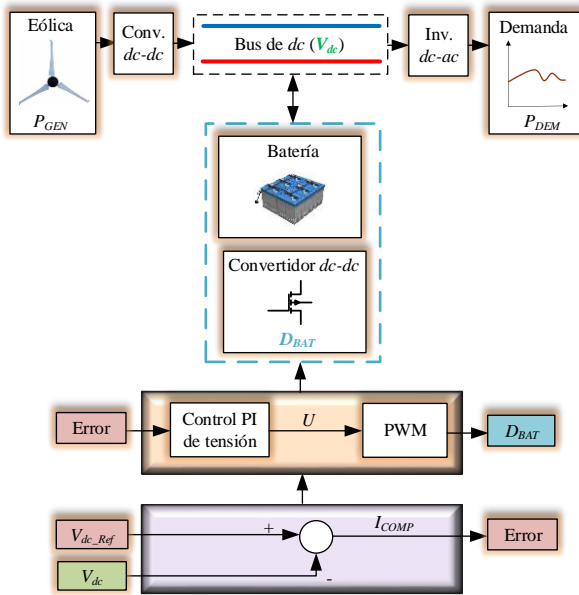


Fig. 4 Configuración de la técnica EMS por caída de tensión en sistema eólico.

*Caso 2: Estabilidad en el bus de tensión de enlace dc.* Las fluctuaciones de tensión que superen una ventana del  $\pm 30\%$  con respecto al valor nominal, pueden ocasionar fuertes picos de corriente en los sistemas de potencia y las fuentes

renovables de energía, causando daños irreversibles en los mismos. Hibridar la batería y el supercapacitor en topología activa, además de aplicar la técnica EMS de filtrado lineal con ganancia adicional, resulta la mejor opción para estabilizar el bus de tensión de  $dc$ . En la Fig. 5 se puede apreciar la presente opción, a diferencia con la Fig. 3, una ganancia determinada con base en la velocidad del viento disponible en el sitio, es adicionada a la diferencia de la tensión deseada y actual. Esta ganancia proporciona una señal de compensación adicional para asegurar que las fluctuaciones de tensión del bus de  $dc$  ocurran dentro de límites seguros de operación, además de llevar al máximo la utilización del supercapacitor, obteniendo como resultado, una rápida estabilización de la tensión en el bus de  $dc$ . El algoritmo EMS de filtrado lineal permite un mejor control activo de potencia entre las tecnologías ESS y el sistema de potencia, sin embargo, esta configuración y la mostrada en la Fig. 4, consideran que las tecnologías ESS siempre están dispuestos a absorber o liberar energía todo el tiempo, esto en la realidad no existe. Una solución a esto, sería contemplar los estados de carga de las tecnologías ESS en el diseño de los algoritmos EMS, sin embargo, esto lleva al diseño de algoritmos más avanzados, los cuales no fueron discutidos en el presente artículo.

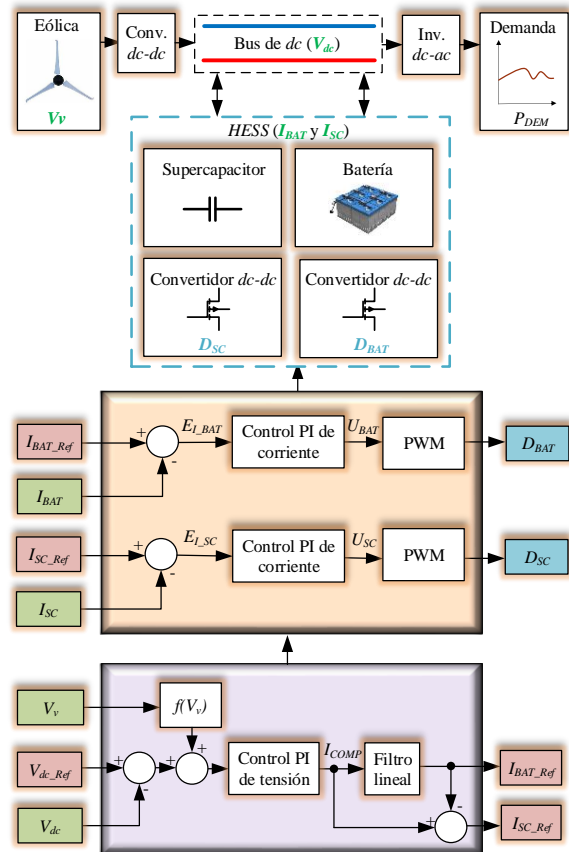


Fig. 5 Configuración de la técnica EMS de filtrado lineal en sistema eólico.

### 3. CONCLUSIONES

En este artículo se han discutido y explorado las principales técnicas *EMS* básicas con la finalidad de dar a conocer los principales atributos y seleccionar la mejor técnica *EMS* básica con base a los beneficios que se desee obtener por ella y las tecnologías *ESS*. Se discutió que cualquier técnica *EMS* básica permite repartir óptimamente y eficientemente la potencia entre las tecnologías *ESS* y el sistema de potencia. En caso de contar con una interfaz de corriente, la técnica *EMS* puede minimizar y suavizar los picos de corriente en la tecnología de alta densidad de energía (batería) durante el proceso de carga y descarga, resultando en un impacto positivo en su vida útil y el minimizar el dimensionado de la misma. Se discutió que hibridar a la batería con otra tecnología *ESS* de alta densidad de potencia (supercapacitor) ayuda de liberar de estrés a la batería, debido a que las componentes de potencia de baja frecuencia pueden ser dirigidas hacia la batería y las de alta frecuencia al supercapacitor mediante la elección apropiada de la técnica *EMS*. La hibridación de dos tecnologías *ESS* y la elección del algoritmo *EMS* más adecuado, propician estabilidad, calidad energética, autoconsumo y equilibrio en el sistema eléctrico, además, de minimizar los impulsos de tensión en el bus de tensión de *cd*, los tiempos de estabilización, las desviaciones de tensión, las oscilaciones y transitorios. De acuerdo al análisis comparativo y a los casos dos casos presentados en la elección de mejor técnica *EMS* básica, la técnica *EMS* por caída de tensión destaca por su fácil implementación y la técnica *EMS* de filtrado lineal por repartir mejor la potencia generada y demandada entre el sistema *HESS* y el resto de sistema de potencia.

### 4. REFERENCIAS

- [1] M. Gómez, V. Estefanía, and A. Pintó, "El acuerdo de París; del Compromiso a la Acción," Oficina Española de Cambio Climático, Rep., 2016.
- [2] D. de la Federación (2016), "Ley de Transición Energética." [Online]. Available: <http://aesa.net/images/pdf/legislacion/mexicana/2016/DOF-2-12-16.pdf>.
- [3] J. Sawin, K. Seyboth, and F. Sverrisson, "Energías Renovables 2016 Reporte de la Situación Mundial," Red de Políticas de Energía Renovable para el siglo XXI, Rep., 2016.
- [4] N. Mendis, K.M. Muttaqi, and S. Perera, "Management of battery-supercapacitor hybrid energy storage and synchronous condenser for isolated operation of PMSG based variable-speed wind turbine generating systems," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 944–953, 2014.
- [5] R. Hemmati and H. Saboori, "Emergence of hybrid energy storage systems in renewable energy and transport applications – A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 65, pp. 11–23, 2016.
- [6] A. Etxeberria, I. Vechiu, H. Camblong, and J.M. Vinassa, "Hybrid energy storage systems for renewable energy sources integration in microgrids: A review," *2010 9th Int. Power Energy Conf. IPEC 2010*, pp. 532–537, 2010.
- [7] W. Jing, C. Hung Lai, S.H. W. Wong, and M.L.D. Wong, "Battery-supercapacitor hybrid energy storage system in standalone DC microgrids: a review," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 11, no. 4, pp. 461–469, 2017.
- [8] E. Schaltz, A. Khaligh, and P.O. Rasmussen, "Influence of battery/ultracapacitor energy-storage sizing on battery lifetime in a fuel cell hybrid electric vehicle," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 8, pp. 3882–3891, 2009.
- [9] J.J. Awerbuch and C.R. Sullivan, "Control of ultracapacitor-battery hybrid power source for vehicular applications," *2008 IEEE Energy 2030 Conf. ENERGY 2008*, no. November, 2008.
- [10] X. Wang, D. Yu, S. Le Blond, Z. Zhao, and P. Wilson, "A novel controller of a battery-supercapacitor hybrid energy storage system for domestic applications," *Energy Build.*, vol. 141, pp. 167–174, 2017.
- [11] K.J. Bunker and W.W. Weaver, "Multidimensional droop control for wind resources in dc microgrids," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 11, no. 3, pp. 657–664, 2017.
- [12] R.P. Eviningsih, M. Ratna Ika Putri, A. Priyadi, and M.H. Purnomo, "Controlled Bidirectional Converter using PID for Charging Battery in The Stand- alone Wind Turbine System with Modified P&O to Obtain MPPT," no. 4, pp. 69–73, 2017.
- [13] A. Gee, "Design and analysis of a sliding-mode power electronic controlled battery / supercapacitor hybrid energy storage system for remote wind power applications .," no. September, 2011.
- [14] R.K. Sharma and S. Mishra, "Dynamic Power Management and Control of a PV PEM Fuel-Cell-Based Standalone ac/dc Microgrid Using Hybrid Energy Storage," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 1, pp. 526–538, 2018.
- [15] R. Sathishkumar, S.K. Kollimalla, and M.K. Mishra, "Dynamic energy management of micro grids using battery super capacitor combined storage," *2012 Annu. IEEE India Conf. INDICON 2012*, pp. 1078–1083, 2012.
- [16] S.K. Kollimalla, M.K. Mishra, and N.L. Narasamma, "Design and analysis of novel control strategy for battery and supercapacitor storage system," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 4, pp. 1137–1144, 2014.
- [17] S.K. Kollimalla, M.K. Mishra, and N.N. Lakshmi, "A new control strategy for interfacing battery supercapacitor storage systems for PV system," *2014 IEEE Students' Conf. Electr. Electron. Comput. Sci. SCECS 2014*, 2014.
- [18] S.K. Kollimalla, M.K. Mishra, A. Ukil, and H.B. Gooi, "DC Grid Voltage Regulation Using New HESS Control Strategy," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 8, no. 2, pp. 1–50, 2011.
- [19] W. Li and G. Joós, "A power electronic interface for a battery supercapacitor hybrid energy storage system for wind applications," *PESC Rec. - IEEE Annu. Power Electron. Spec. Conf.*, pp. 1762–1768, 2008.
- [20] A.M. Gee, F.V.P. Robinson, and R.W. Dunn, "Analysis of battery lifetime extension in a small-scale wind-energy system using supercapacitors," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 28, no. 1, pp. 24–33, 2013.
- [21] Z. Zheng, X. Wang, and Y. Li, "A control method for grid-friendly photovoltaic systems with hybrid energy storage units," *2011 4th Int. Conf. Electr. Util. Deregul. Restruct. Power Technol.*, no. 51007044, pp. 1437–1440, 2011.
- [22] S.K. Kollimalla, S. Member, M.K. Mishra, and S. Member, "Coordinated Control and Energy Management of Hybrid Energy Storage System in PV System," pp. 363–368, 2014.