

SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA Y SU APLICACIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES

Energy Storage Systems in Renewable Power Generation

RESUMEN

Hoy en día la generación de energía mediante recursos renovables está siendo ampliamente investigada debido a que se considera una forma limpia de generación. Sin embargo, su naturaleza variable, intermitente e impredecible ocasiona que no se garantice la generación constante de energía con lo cual se consideran que no son despachables. Los sistemas de almacenamiento de energía se presentan como respuesta a las fluctuaciones de potencia. Su implementación y selección se realiza teniendo en cuenta aspectos técnicos y económicos. Este trabajo presenta los dispositivos de almacenamiento de energía más comunes para mitigar los problemas de las fluctuaciones de potencia.

PALABRAS CLAVES: Almacenamiento de energía, energías renovables, variaciones de la potencia generada.

ABSTRACT

Nowadays renewable power generation systems are currently preferred for clean power generation. However, because they are considered unpredictable and intermittent, energy storage systems are required in order to meet load requirements at all times. Energy storage systems are the most popular and technologically matured option to mitigate wind power fluctuations. Technical and economic aspects are taken into account to select ESS. This paper presents most ESS use to provide both large power and energy capacity when power quality issues are presented in power systems.

KEYWORDS: *Energy storage systems, renewable power generation, wind intermittency.*

1. INTRODUCTION

La generación de energía eléctrica a partir de plantas eólicas y solares ha aumentado considerablemente en recientes años. Sin embargo, la potencia de salida es intermitente dada la variabilidad del recurso eólico y solar. Dicha variabilidad puede afectar negativamente la calidad de la potencia generada y la estabilidad en el punto de acople con la red o PCC. Esto conlleva a que sea importante analizar como mitigar la variación de la potencia de salida de generadores eólicos y solares [1].

La potencia de salida de las turbinas eólicas está relacionada directamente con la velocidad del viento [1]. Debido a que el viento es un fenómeno estocástico que evoluciona con el tiempo y el espacio, la potencia de salida se considera fluctuante. La integración de sistemas de almacenamiento de energía (*Energy Storage Systems*) o ESS con plantas de generación eólica es una solución técnicamente viable para mitigar las variaciones de potencia [2]. Para el corto y el mediano plazo (del orden de segundos a minutos), las técnicas de almacenamiento de energía más usadas en plantas eólicas son las baterías (BESS), capacitores de doble capa (EDLCs), *flywheel energy storage* (FES), y *superconducting magnetic*

energy storage (SMES) [3], [4]. Otras metodologías como aire comprimido (*compressed air*) pueden ser también aplicables, pero son altamente costosas y solo pueden ser implementadas en ciertas zonas.

Los ESS surgen como una alternativa para compensar la variabilidad de la potencia generada a partir del viento y del sol. Esto no solo facilita la integración de renovables con la red eléctrica sino que también facilita su participación en los mercados eléctricos [5]. El presente artículo detalla algunas de estas tecnologías sin analizar en profundidad aspectos como costos, dimensionamiento, componentes, etc.

2. INTRODUCCION A LOS ESS

Con el avance de la electrónica de potencia y la reducción de costos en los materiales de construcción de los ESS, se hace viable su aplicación en los sistemas eléctricos de potencia [5]. Dichas tecnologías incluyen baterías, ultra-capacitores, SMES, aire comprimido entre muchas otras [6]. Sin bien algunas de estas fueron inicialmente pensadas para sistemas a gran escala y para dar soporte a la generación, hoy en día están siendo aplicadas para mejorar la confiabilidad de la red eléctrica,

ANDRÉS ESCOBAR MEJÍA

M.Sc. en Ingeniería Eléctrica
Profesor Asistente
Universidad Tecnológica de Pereira
andreses1@utp.edu.co

MAURICIO LONDOÑO

M.Sc. en Ingeniería Eléctrica
Profesor Asistente
Universidad Tecnológica de Pereira
mau.hol@utp.edu.co

HOLGUÍN

ayudar a la transferencia de potencia, mejorar la calidad de la energía eléctrica y suplir energía en condiciones de alta demanda [7]. En especial, esta última está siendo aplicada en *utilities* donde el precio del kilowatt-Hora para los usuarios es definido según las horas de demanda [15].

2.1 Sistemas de Almacenamiento de Energía Aplicados a la Distribución y la Transmisión

En grandes cantidades, la energía eléctrica de tipo *ac* no puede ser almacenada de una forma eficiente. Sin embargo, dicha energía *ac* puede ser almacenada al ser convertida en energía electromagnética, electromecánica, cinética y como energía potencial. Dos factores son determinantes a la hora de seleccionar un ESS. Uno es la cantidad de energía que requiere ser almacenada y el otro es la tasa a la cual dicha energía puede ser almacenada y/o liberada según sea requerida. Otros factores incluyen: precio, temperatura, vida útil, etc.

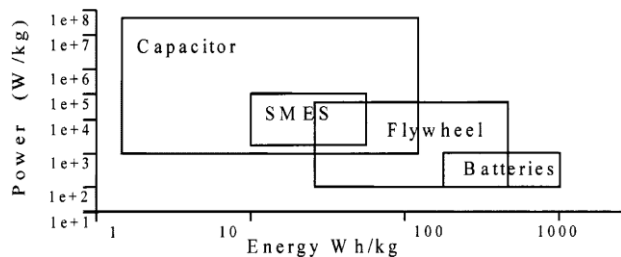


Figura 1. Potencia versus energía para diferentes ESS [9].

Los rangos de potencia/energía para el corto y el mediano plazo de los ESS son presentados en la Fig. 1. La integración de estos con la red eléctrica es posible empleando convertidores “inteligentes” que permitan el intercambio bidireccional de potencia. La etapa de control del convertidor determina cual es el mejor momento para realizar la carga/descarga del ESS de acuerdo al precio de la energía, o los requerimientos de potencia. A nivel de transmisión y distribución algunos beneficios son: amortiguamiento de las oscilaciones, estabilidad de voltaje, nivelamiento de la carga (*load leveling*)¹, reserva rodante de corto plazo (*short-term spinning reserve*)², regulación de la frecuencia, mitigar el efecto de *reclosers* o *breakers* durante fallas en alimentadores laterales³, y mejoramiento de la calidad de la energía.

¹ *Load leveling* hace referencia a almacenar la energía durante periodos de baja demanda para ser usada durante periodos de alta demanda.

² *Spinning reserve* hace referencia a la capacidad que se tiene *on-line* para ser sincronizada con la red y cumplir con la demanda en el mediano plazo (i.e., 10min).

³ La operación de los *reclosers* ocasiona *sags* en laterales no sujetos a fallas; lo que pueden ocasionar la desconexión de usuarios. Los ESS pueden ser utilizados para compensar el voltaje durante la duración del *sag*.

2.1.1 Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)

Aunque el fenómeno de la superconducción fue descubierto en 1911, no fue sino hasta la década de los 70's que los SMES fueron propuestos por primera vez como ESS para los sistemas de potencia [8]. Hoy en día, los SMES han sido de especial aplicación para las *utilities* y para el sector militar debido a su alta capacidad de respuesta y a su alta eficiencia (durante la carga/descarga por encima del 95%). Las aplicaciones de los SMES se centran principalmente en mejorar el nivelamiento de la carga, la estabilidad dinámica, la estabilidad transitoria, la estabilidad de voltaje, y la calidad de la energía.

Si bien los SMES continúan siendo una tecnología altamente costosa para ser aplicada en sistemas eléctricos dada la necesidad de materiales especiales para el núcleo de la bobina, su ventaja radica en que no se requiere de un inversor, con lo cual se incrementa la eficiencia.

El desarrollo de nuevos superconductores que soportan altas temperaturas ha hecho posible la reducción en tamaño de los SMES dado que se requiere menos elementos de refrigeración. Esto se evidencia en varias instalaciones que emplean SMES como ESS [9].

Los SMES están diseñados para almacenar energía en su campo magnético dada una corriente *dc* que fluye a través de una bobina superconductor. La energía almacenada en Joules es cuantificada a través de la ecuación (1).

$$E = \frac{1}{2} LI^2 \quad (1)$$

Dado que la energía es almacenada en el campo magnético, los SMES pueden proporcionar rápida capacidad de respuesta y brindar respaldo desde las fracciones de segundo hasta varias horas. Su principal desventaja es que se requiere de una instalación especial que permita mantener las condiciones adecuadas de operación de la bobina superconductor.

Existen dos formas de realizar la conversión de energía en un SMES. Una de ellas es usar un *current source converter* (CSC) para conectar la etapa *ac* con la etapa carga/descarga de la bobina. La otra consiste en usar un *voltage source converter* (VSC) para conectar la etapa *ac* con el *dc-dc chopper* con la etapa carga/descarga de la bobina. Un sistema SMES es presentado en la Fig 2.

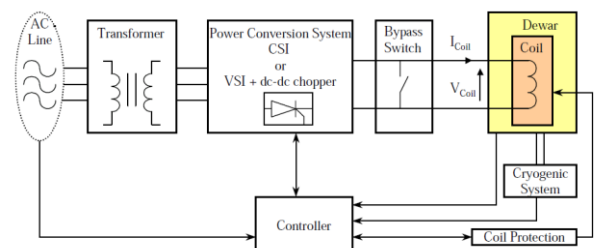


Figura 2. Componentes de un SMES [14].

Los modos de carga/descarga/stand-by son establecidos controlando el voltaje en la bobina del SMES (Vcoil). El controlador establece, según las condiciones de la red, cuando debe empezar a liberarse o almacenarse la energía. Los SMES actualmente van desde 1MW hasta 10MW y son diseñados para proveer energía en el corto plazo (*short-term power*) del orden de los segundos.

2.1.2. Battery Energy Storage Systems (BESS)

Las baterías operan almacenando la energía químicamente y son una de las tecnologías disponibles en el mercado con una de las mejores relaciones costo-efectividad. Un sistema de baterías para renovables consta de un conjunto de ellas conectada en serie/paralelo para cumplir con requisitos de voltaje/corriente. Un convertidor es empleado para conectarlas con la red eléctrica y un controlador es usado para cargarlas durante horas de poca demanda y bajo costo de la energía (*off-peak/low-cost*). Algunas ventajas de ellas son: alta densidad de energía, alta eficiencia, largos ciclos de vida (dependiendo de la tecnología seleccionada y de la operación carga/descarga), rápida capacidad de respuesta y fácil integración con renovables [7], [8], [10], [11]. Sus desventajas se centran en que algunas de ellas requieren refrigeración o unidades especiales de almacenamiento; cuentan con complejos convertidores de potencia y tienen un costo inicial alto. Pueden ser aplicadas cuando se requiere almacenar grandes cantidades de energía (>1MWh) que puede ser descargados cuando sean requeridos en periodos de 15 minutos o más.

Una de las tecnologías más empleadas y con más desarrollo para gran almacenamiento de energía para ser integradas con renovables son las baterías *Lead-Acid*, las cuales son de bajo costo, poseen baja densidad de energía y limitada vida útil. Otras son *Nickel-Cadmium*, *Sodium-Sulfur*, *Vanadium Redox*, *Lithium Ion* y *Sodium Nickel Chloride*.

Los estudios en baterías se centran en incrementar la densidad de energía, mejorar la vida útil y la eficiencia mientras se mantiene el bajo costo [12]. Algunos BESS son empleados junto con FACTS para mejorar la controlabilidad y el flujo de potencia del sistema eléctrico, mejorar el perfil de voltaje y suavizar la potencia de salida de renovables en el PCC. Algunos *utilities* [11], [15] las están implementando para mejorar el factor de potencia, mejorar la salida de plantas solares, control de voltaje y frecuencia [9].

2.1.3. Advanced Capacitors

Los capacitores operan acumulando energía en el campo eléctrico que se produce en medio de dos capas paralelas separadas por un material dieléctrico. La energía que puede ser almacenada en el capacitor puede ser estimada empleando la ecuación (2).

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2)$$

Aumentando el tamaño del capacitor o aumentando el voltaje aplicado entre las capas puede ser utilizado para aumentar de la energía almacenada. Sin embargo, al igual que las baterías, para las aplicaciones en sistemas eléctricos es más importante la eficiencia, la vida útil y capacidad de carga/descarga. Para efectos de incrementar la capacidad de almacenamiento es más recomendable instalar varios capacitores en serie o paralelo que incrementar el tamaño de un solo capacitor [13].

Los capacitores han sido ampliamente usados como componente fundamental para compensación en sistemas eléctricos (FACTS⁴), sin embargo, recientemente se ha desarrollado una nueva clase de capacitores como elementos almacenadores de energía, ultra-capacitores, con muchas más ventajas sobre sus predecesores. Los ultra-capacitores han presentado su ventaja al ser empleados para compensar la variabilidad de la potencia de salida de plantas solares y eólicas inyectando potencia eléctrica durante periodos cortos de tiempo (alta energía pero a baja potencia) lo que lo hace limitado en aplicaciones de soportar demanda.

Por lo general algunas *utilities* emplean ultra-capacitores junto con baterías para ampliar el espectro de las aplicaciones que pueden ser manejadas con estas dos tecnologías.

2.1.4. Flywheel Energy Storage (FES)

Los *Flywheels* son quizás, después de las baterías, una de las tecnologías más investigadas e implementadas para compensar las fluctuaciones de potencia a baja escala. Su principio de funcionamiento es muy similar al de carga y descarga de los ultra-capacitores. En este caso se aprovecha la energía rotacional almacenada de una gran masa rotativa manejada por un *drive* (para proporcionar un amplio rango de operación) para compensar fluctuaciones de potencia.

La energía almacenada depende principalmente del momento de inercia y del cuadrado de la velocidad de rotación del *flywheel* como se indica en la ecuación (3).

$$E = \frac{1}{2} IW^2 \quad (3)$$

El momento de inercia I depende del radio, la masa y la altura del rotor empleado. La energía es transferida al *flywheel* durante horas de poca demanda o cuando la energía en el mercado está por debajo del precio ofertado. En este caso opera como motor girando a altas velocidades (etapa de carga). Una vez se requiera, la energía almacenada es liberada por el controlador al enviar una señal al *drive* lo que ocasiona la desaceleración debido al torque electromagnético generado, opuesto a la dirección de rotación, al inyectar corriente.

⁴ Capacitores de gran tamaño son usados en los *Dynamic Voltage Restorer* (DVR) para compensar *sags* en sistemas de potencia y suministrar la potencia reactiva requerida por la carga.

La capacidad de almacenar energía de los *flywheel* puede ser mejorada incrementando el momento de inercia del rotor o haciendo que este gire a más altas velocidades. Sin embargo, en ambos casos el sistema se vuelve robusto y con problemas en el control de velocidad ya que la velocidad de operación está entre los 10,000 rpm y los 100,000 rpm. Las pérdidas rotacionales limitan la capacidad de almacenar la energía durante periodos largos de tiempo.

Sus principales ventajas son que puede almacenar altas cantidades de energía, tiene larga vida útil, es fácil de recargar, relativamente de bajo costo ya que no requiera mucha electrónica de potencia para garantizar su operación, bajo mantenimiento. Las desventajas se centran en que tiene baja densidad de energía, altas pérdidas rotacionales y es peligrosa si algo falla.

Los rangos de potencia van desde 1kW hasta varios MVA con períodos de operación de 2 a 30 segundos. El avance en rodamientos magnéticos, cámaras de vacío y otras han sido de gran utilidad para eliminar el problema de pérdidas por rotación. La unidad FES más grande disponible comercialmente tiene 5MJ/1.6MVA y cuenta con un peso aproximado de 10,000kg [8].

2.1.5. Compressed Air Energy Storage (CAES)

El almacenamiento de energía en aire comprimido (*Compressed Air Energy Storage*) or (CAES) ha sido ampliamente utilizado con éxito en diferentes instalaciones [8]. Es un método que utiliza energía de bajo costo o energía disponible durante las horas de poca demanda (*low-cost and off-peak energy*) para comprimir aire en grandes cavernas subterráneas. El aire extraído de las cavernas es calentado usando gas natural en una cámara de combustión. Este aire es empleado para accionar un generador. Si bien este proceso requiere ciclo combinado, el consumo de gas natural para calentar el aire comprimido es menor que si se usaran las centrales de gas convencionales para generar electricidad.

Una instalación típica de CAES es presentada en la Fig 3.

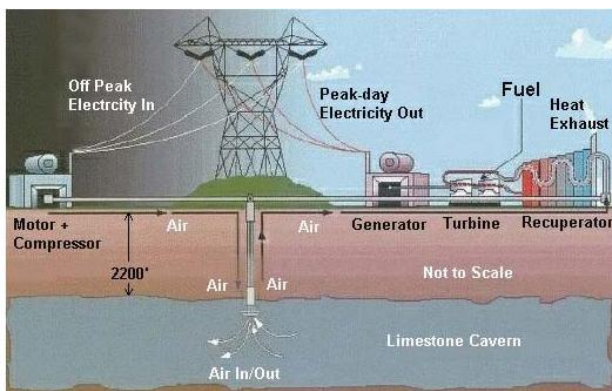


Figura 3. Típica instalación de CAES [16].

El centro de control debe determinar cuándo emplear el aire comprimido para cumplir con la demanda. Hoy en

día las instalaciones más comunes de CAES van desde los 50MW hasta los 300MW con una eficiencia entre 70% y 80% y un periodo de respaldo de entre 1 hora y 3 horas durante periodos de alta demanda. Su principal desventaja es que se deben construir o adecuar en donde las condiciones geológicas del terreno lo permitan [7]–[9], [12].

La implementación de CAES hace parte de una de estrategias para permitir la integración de recursos renovables con la red eléctrica.

3. CONCLUSIONES

La selección del ESS depende no solamente de aspectos técnicos como topología de la red, sino que también de aspectos económicos. La creciente necesidad de aprovechar los recursos renovables, los incentivos económicos de diferentes gobiernos y la necesidad de disminuir gases de efecto invernadero han conllevado al avance de los ESS para ser integrados a la red.

Los ultra-capacitores pueden ser utilizados con las baterías para mejorar la capacidad de respuesta de las plantas solares y eólicas. El primero proporciona alta respuesta durante la descarga mientras las baterías ayudan a mantener el intercambio de potencia durante más tiempo. Los ultra-capacitores permiten elevar la vida útil de las baterías ya que limita los ciclos de operación de las mismas.

Los ESS no solamente son útiles para compensar la potencia en plantas eólicas y solares, también son usados a nivel de distribución para mejorar la calidad de la energía, mejorar el consumo, aumentar la robustez en redes débiles y retardar la construcción de redes de transmisión.

4. BIOGRAFIA

- [1]. J. Hongxin, F. Yang, Z. Yu, H. Weiguo, "Design of Hybrid Energy Storage Control System for Wind Farms Based on Flow Battery and Electric Double-Layer Capacitor," IEEE Power and Energy Engineering Conference, March 2010.
- [2]. P. D Lund, J.V. Paatero, "Energy storage options for improving wind power quality," Nordic Wind Power Conference, 22-23 May, 2006, ESPOO, Finland.
- [3]. D. Shively, J. Gardner, T. Haynes, J. Ferguson, "Energy Storage Methods for Renewable Energy Integration and Grid Support," IEEE Energy2030 Atlanta, Georgia, USA 17-18 November 2008.
- [4]. C. Abbey, G. Joos, "Energy Storage and Management in Wind Turbine Generator Systems," Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. EPE-PEMC 2006. 12th International, Aug. 2006.
- [5]. G. Delille, B. Francois, G. Malarange, J. L. Fraisse, "Energy Storage Systems in Distribution Grids: New Assets to Upgrade Distribution Networks

- Abilities,” 20th International conference on electricity distribution, CIRED, Prague, June 2009.
- [6]. K. Qian, C. Zhou, Z. Li, Y. Yuan, “Benefits Of Energy Storage In Power Systems With High Level Of Intermittent Generation,” 20th International conference on electricity distribution, CIRED, Prague, June 2009.
- [7]. B. R. Alamri, A. R Alamri, “Technical review of energy storage technologies when integrated with intermittent renewable energy,” International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, 2009. SUPERGEN '09.
- [8]. P. F. Ribeiro, B. K. Johnson, M. L. Crow, “Energy storage systems for advanced power applications,” IEEE proceedings, Dec. 2001.
- [9]. N. S. Chouhan, M. Ferdowsi, “Review of energy storage systems,” North American Power Symposium (NAPS), 2009, USA.
- [10]. S. Vazquez, S. M. Lukic, E. Galvan, L. G. Franquelo, J. M. Carrasco “Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 12, December 2010.
- [11]. A. Nourai, R. Sastry, T. Walker, “A Vision & Strategy for Deployment of Energy Storage in Electric Utilities,” IEEE Panel on Advances in Distributed Resources – 2010.
- [12]. G. Coppez, S. Chowdhury, S.P. Chowdhury, “The Importance of Energy Storage in Renewable Power Generation: A Review,” UPEC2010, 31st Aug – 3rd Sept 2010, Cardiff, Wales, U.K.
- [13]. G. Coppez, S. Chowdhury, S.P. Chowdhury, “Impacts of Energy Storage in Distributed Power Generation: A Review,” 2010 International Conference on Power System Technology POWERCON, October 2010, Hangz, China.
- [14]. A. Aysen “Electromagnetic Transient and Dynamic Modeling and Simulation of a StatCom-SMES Compensator in Power Systems,” Doctoral Dissertation, Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, Virginia, 200.
- [15]. <https://www.aepohio.com>
- [16]. <http://www.xcelenergy.com/SiteCollectionDocuments/AppendixE.pdf>