

NOVA MIRON

Sistemas de almacenamiento de energía. Tecnología BESS.

PARTE 1

1) Introducción

En los últimos tiempos, debido a la implementación de diversos sistemas de generación basados en energías renovables, se ha hecho evidente el desarrollo, en paralelo, de las tecnologías de microrredes y de almacenamiento de energía. Los sistemas de almacenamiento de energía (SAE) y en particular los basados en baterías (BESS), tienen una gran proyección de uso para estabilizar el sistema eléctrico.

A estos fines, los sistemas BESS (el que nos ocupará principalmente a lo largo de las partes desarrolladas en los escritos), será el de adoptar la función de un controlador de potencia activa y reactiva, de forma tal de alcanzar los objetivos de la compensación en la red.

Veremos que el SAE BESS podrá operar con diferentes condiciones de potencia activa y reactiva, logrando así regular la tensión y la frecuencia (operación en centrales eléctricas), cumpliendo, de tal forma, las regulaciones establecidas ante las variaciones de estos parámetros del SEP.

Otro enfoque que justifica el uso de las SAE, refiere a la interacción con las tecnologías de microrredes, las cuales conforman una topología de inserción en el sistema eléctrico de potencia, que se sustenta en integrar los sistemas de generación basados en energía renovables distribuidos, con otros recursos afines a la función principal de favorecer la implantación eficaz y eficiente de estos sistemas renovables.

Una de las desventajas principales de los sistemas de generación basados en energías renovables, es la alta dependencia con el factor ambiental (clima), ya que éstos, para poder operar bajo condiciones de eficiencia planificadas, dependerán, en todo momento, de la disponibilidad prevista de la radiación solar (sistemas fotovoltaicos) y del viento (sistemas eólicos). También, se deberá tener muy en cuenta los armónicos generados (contaminación armónica) y la acción de la temperatura sobre los dispositivos.

Es así que, la potencia efectiva generada por estos sistemas renovables, posee una característica fluctuante, con todas las consecuencias negativas que ocasiona este tipo de operación (Transmisión y Distribución eléctrica), determinando una variación en el tiempo de la potencia disponible asociada a las condiciones climáticas del lugar y el momento.

NOVA MIRON S.A.

Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión

Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • www.novamiron.com.ar

SERVICIO DE ATENCIÓN PERMANENTE Contactos: 15-4945-1171 / 11-3581-4196 / 15-4945-1172

NOVA MIRON

Por ejemplo, Las fluctuaciones en la potencia generada pueden alcanzar valores que superan los límites establecidos, en muchos sistemas de energía solar y eólica.

La consecuencia inmediata, será la de provocar una desviación en el valor de la tensión en los nodos del sistema eléctrico, provocando de tal modo un diferencial que supere el $\pm 5\%$ del nominal.

Otros riesgos significativos se podrán identificar, tomando como base a este problema, pudiendo, en el límite, alcanzar un estado de falla total del sistema eléctrico (capacidad de respuesta mínima).

Por lo tanto, se requieren encontrar soluciones de ingeniería que logren limitar el rango máximo de variaciones de la potencia generada en los sistemas eléctricos (los límites se establecen en normativas y/o regulaciones de cada país).

De tal forma, se han diseñado y desarrollado Sistemas de Almacenamiento de Energía, cuya función principal será la de permitir la atenuación o evitar las consecuencias negativas indicadas por las fluctuaciones, logrando así incorporar un sistema estabilizador acoplado a la generación.

Otra razón, reside en el principio de la descentralización de la generación de energía, la cual refiere a la sincronización de la potencia entre los generadores descentralizados y sus cargas cercanas, que pueden generar variaciones significativas y rápidas en la demanda localizada de energía.

En los escritos que vamos a presentar, en las sucesivas partes, haremos una descripción conceptual de todos los sistemas de almacenamiento existentes en la industria y nos abocaremos con mayor detalle, como ya hemos comentado, sobre el correspondiente al almacenamiento basado en baterías, conocidos por las siglas en inglés de BESS (Battery Energy Storage System).

A continuación, vamos a iniciar una descripción conceptual de las diversas formas de almacenamiento de energía que podemos encontrarnos en el mundo físico, seguido por un listado de parámetros característicos, muy útiles para comprender los sistemas indicados previamente y, finalmente, las formas o tecnologías de almacenamiento efectivamente implementadas.

1) Formas de almacenamiento de la energía

Al abordar las formas de almacenamiento de energía, que podemos encontrar en el mundo físico, consideraremos, a grandes rasgos, los siguientes aspectos:

- a) Integrar los SAE en los sistemas de generación y transmisión, con el fin de controlar la tensión, la estabilidad dinámica del sistema y mejorar la capacidad de transmisión de la energía. Veremos las distintas formas de integrar los SAE con las tecnologías FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System).

NOVA MIRON S.A.

Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión

Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • www.novamiron.com.ar

SERVICIO DE ATENCIÓN PERMANENTE Contactos: 15-4945-1171 / 11-3581-4196 / 15-4945-1172

NOVA MIRON

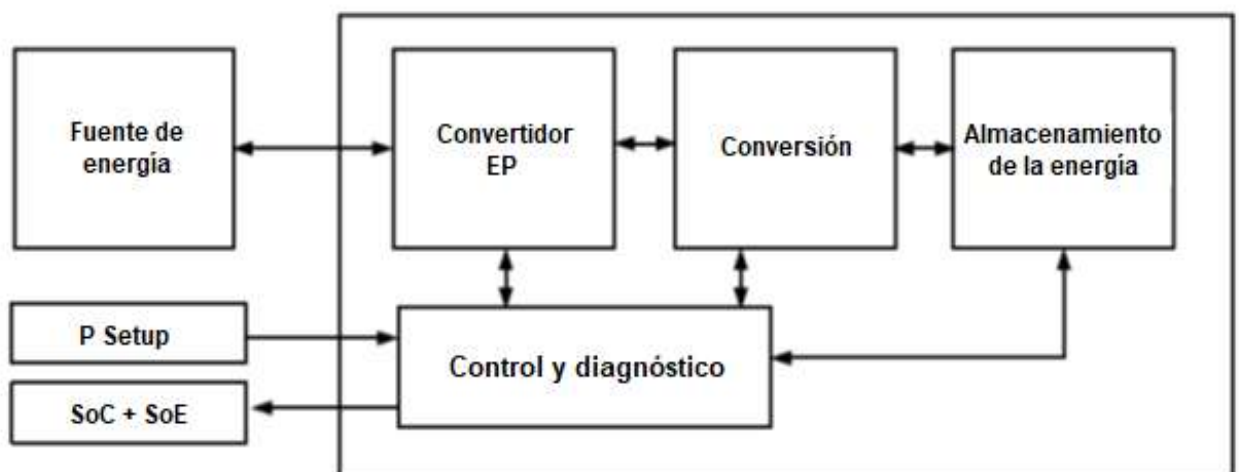
- b) Enfocar el uso de la tecnología de almacenamiento para resolver el problema de la falta de disponibilidad de los suministros o fuentes de energía (por ejemplo, el cambio de horario diurno a nocturno para las plantas fotovoltaicas), o la necesidad de compensación por la falta de producción de los sistemas de generación.
- c) Recurrir al uso de tecnologías de almacenamiento de energía, para asistir a algunos consumidores con problemas de suministro, cuando la generación local no puede satisfacer la demanda.

En estos casos, la mayor demanda de potencia podrá obtenerse de un dispositivo de almacenamiento, teniendo muy en cuenta los límites establecidos por las constantes de tiempo del sistema físico, ante el gradiente de carga (problema asociado a los límites térmicos de los componentes o sistemas).

Atendiendo al proceso de distribución de la energía eléctrica, se deberá enfocar fundamentalmente a la integración de las fuentes de energía renovables (como ser la fotovoltaica y la eólica), teniendo en cuenta que este tipo de fuentes tienen un carácter fluctuante e impredecible.

Los sistemas de almacenamiento de energía estarán, en la mayoría de los casos, interconectados a un sistema de transporte y distribución eléctrico, junto a dispositivos de control asociados, conformados por dispositivos electrónicos de actuación rápida y de potencias flexibles.

En la siguiente figura, podemos observar el esquema general correspondiente a un sistema de almacenamiento de energía.



NOVA MIRON S.A.

Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión

Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • www.novamiron.com.ar

SERVICIO DE ATENCIÓN PERMANENTE Contactos: 15-4945-1171 / 11-3581-4196 / 15-4945-1172

NOVA MIRON

Para el almacenamiento de la energía podemos indicar las siguientes formas, localizadas en el mundo físico (básicamente existen solamente 4 campos de energía en el mundo físico, de los cuales se derivan las fuentes secundarias):

- La energía gravitatoria (campo gravitacional), siendo una energía potencial asociada a la gravedad terrestre, cuando una masa se traslada de un punto a otro localizado a mayor altitud (ej.: masa de agua en una central de bombeo).
- La energía cinética de un sistema mecánico en rotación (ej.: volante de inercia, acoplado a un eje en rotación).
- La energía mecánica de presión, correspondiente a un fluido compresible (ej.: compresión de aire).
- La energía química en ciertas moléculas (energía electroquímica).
- Energía contenida en el campo electromagnético. Corresponde a variables de estado eléctricas y/o magnéticas (campo eléctrico, campo magnético, capacitores, inductores y superconductores).

Se observa del esquema que, la fuente de energía interactúa con el dispositivo Convertidor EP, el cual permitirá controlar el flujo de la energía hacia el módulo de Almacenamiento.

El módulo de Almacenamiento de la energía, representa esquemáticamente el proceso de depósito de la energía asociado al cambio del estado interno, directamente relacionado con el cambio del contenido energético. Debemos notar que este proceso deberá presentar, como propiedad característica, una alta reversibilidad.

Por lo general se incorpora un dispositivo de Conversión de fase intermedia, el cual permitirá implementar eventuales conversiones adicionales (como ser electromecánicas, electrotérmicas o electroquímicas).

Como ejemplo de este proceso intermedio, podemos destacar la conversión entre el sistema motor/generador eléctrico y la bomba/turbina hidráulica en una central de bombeo.

El módulo de control y diagnóstico es el que aporta la función fundamental para implementar las acciones de conversión de la energía.

Por ejemplo, establecer las acciones de control de la velocidad de la máquina motriz (motor de un almacenador de energía cinética rotante), o simplemente controlar la corriente o la tensión de los subsistemas que conforman el sistema integral de almacenamiento.

El controlador opera con magnitudes físicas que, por lo general, estarán relacionadas con el nivel de potencia intercambiado durante los procesos de carga y descarga del módulo de almacenamiento.

NOVA MIRON S.A.

Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión

Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • www.novamiron.com.ar

SERVICIO DE ATENCIÓN PERMANENTE Contactos: 15-4945-1171 / 11-3581-4196 / 15-4945-1172

NOVA MIRON

Importante aclarar que, el valor del nivel de potencia instantánea de carga y descarga deberá estar relacionado con la densidad de potencia típica (kW/dm³) o la potencia específica (kW/kg) del módulo de almacenamiento de energía. Además, el módulo de control y diagnóstico deberá estar diseñado para proporcionar toda aquella información derivada del módulo de almacenamiento de energía, en relación al estado de carga (SoC) o el estado de energía (SoE) del mismo. También, se podrá recurrir a un diseño que permita informar sobre el parámetro de profundidad de descarga (DoD), del módulo de almacenamiento. Ver el ítem 3 para la definición de los parámetros característicos de los sistemas de almacenamiento de energía.

2) Parámetros característicos.

Antes de comenzar a describir los sistemas de almacenamiento de energía que nos ocupa en el presente escrito, vamos a detallar un conjunto de parámetros característicos que permitirán definir y comparar las distintas formas de almacenamiento.

Además, desde el punto de vista de la Gestión de Activos, nos permitirá comprender las distintas fases operativas y de mantenimiento de cada uno de estos dispositivos, junto a la evaluación de los costos, el desempeño y los riesgos.

a) Energía

Sin entrar en los detalles físicos de la definición, desde nuestro punto de vista, acorde con los objetivos de los escritos, se la define con la siguiente formulación matemática, asociada con la potencia instantánea generada (P(t)) entre los tiempos t1 y t2.

$$E = \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt$$

Otro enfoque, con aplicación práctica en los Sistemas de Almacenamiento de Energía, es considerar los procesos termodinámicos, operando con el concepto de Energía Total del sistema.

A los efectos, se considera el concepto de energía macroscópica de un sistema, la cual comprende las interacciones con los campos gravitatorio y electromagnético.

La energía microscópica estará relacionada con las interacciones con los campos nucleares de interacción fuerte y débil. Lo podemos asimilar a la actividad molecular de un sistema, denominándose también como Energía Interna del sistema.

NOVA MIRON S.A.

Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión

Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • www.novamiron.com.ar

SERVICIO DE ATENCIÓN PERMANENTE Contactos: 15-4945-1171 / 11-3581-4196 / 15-4945-1172

NOVA MIRON

En tal sentido, la Energía Total de un sistema cerrado (sin intercambio de masa) vendrá expresada por la formulación:

$$E = E_c + E_p + U$$

$$E = \frac{1}{2} m v^2 + m g h + U$$

En donde:

U = energía interna del sistema.

m = masa del sistema.

v = velocidad (de traslación) del sistema desde un punto de referencia.

g = aceleración de la gravedad.

h = altura del centro de masa del sistema desde un punto de referencia.

Para un sistema abierto, se deberá incorporar el término que involucra a la variación de la masa, como consecuencia del intercambio con el medio ambiente (caudal másico).

b) Potencia

Se la define como el flujo de energía hacia o desde un sistema dado.

$$P(t) = \frac{dE}{dt}$$

Donde:

P = potencia instantánea. [W], [kW], [MW].

E = energía. [J], [kWh], [MWh].

t = tiempo. [s], [h]

c) Capacidad

Se la define como la cantidad de electricidad que se recupera de un dispositivo de acumulación de energía eléctrica (capacitor o supercapacitor).

Para el caso de una batería, nos indica la cantidad de corriente que puede suministrar (A), durante un tiempo determinado (h)

Generalmente se expresa en [Ah] y corresponde a la integral de la corriente:

$$C = \int_0^t i(t) dt$$

d) DoD = Profundidad de Descarga

Este parámetro indica la cantidad de electricidad que ha sido extraída de un dispositivo acumulador de energía, en relación con su capacidad máxima:

NOVA MIRON S.A.

Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión

Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • www.novamiron.com.ar

SERVICIO DE ATENCIÓN PERMANENTE Contactos: 15-4945-1171 / 11-3581-4196 / 15-4945-1172

NOVA MIRON

$$\text{DoD} = \frac{\int_0^t \text{id}(t) dt}{\text{Capacidad}}$$

e) SoC = Estado de Carga

El SoC indica la cantidad restante de electricidad disponible en un dispositivo de acumulación, en relación con su capacidad máxima disponible:

$$\text{SoC} = \frac{\text{Cantidad de carga remanente}}{\text{Capacidad práctica del dispositivo de acumulación}}$$

$$\text{SoC} = \frac{\text{Capacidad} - \int_0^t \text{id}(t) dt}{\text{Capacidad}}$$

Es decir:

$$\text{SoC} = 1 - \text{DoD}$$

$$\text{DoD} = 1 - \text{SoC}$$

Los parámetros SoC y DoD se utilizan generalmente en dispositivos de acumulación del tipo electroquímicos.

En tal sentido se trata de usar un parámetro de carácter general, aplicable a cualquier dispositivo de acumulación de energía, a saber: SoE

SoE = Estado de la Energía = Relación entre la cantidad remanente de energía disponible (E) y la cantidad total de energía almacenada (Ea).

$$\text{SoE} = \frac{E}{E_a}$$

f) Eficiencia de ciclo completo en condiciones normales, ideales y reales

Con el fin de considerar la eficiencia energética del sistema de almacenamiento, será muy importante tener en cuenta los ciclos de almacenamiento de energía.

Es decir, se deberá evaluar la serie de cargas, descargas y modos de inactividad, del módulo de almacenamiento.

En primer término, para definir la eficiencia de ciclo completo, será necesario que el SoE sea idéntico al inicio y al final del ciclo.

Otro tema a considerar serán las pérdidas de energía involucradas, en donde tendremos dos clases características:

- Pérdida debida a la transferencia de potencia. Pérdida por carga y descarga

NOVA MIRON S.A.

Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión

Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • www.novamiron.com.ar

SERVICIO DE ATENCIÓN PERMANENTE Contactos: 15-4945-1171 / 11-3581-4196 / 15-4945-1172

NOVA MIRON

Se puede asumir que las pérdidas de carga y descarga, del módulo de almacenamiento, siguen una relación proporcional al cuadrado de la potencia en juego, en los procesos asociados:

$$P_{cd} = \alpha P^2$$

P es la potencia de carga o descarga.

α = ctte de proporcionalidad, dependiente del tipo de módulo de almacenamiento.

En el caso de una batería electroquímica, el parámetro α , el cual se encuentra directamente relacionado con la resistencia interna, depende del estado de energía (SoE) y también de la dirección de la transferencia de la energía (carga o descarga).

También, será importante considerar que en una batería electroquímica, se puede asumir que la potencia es proporcional a la corriente (considerando el nivel de tensión aproximadamente constante). Tener en cuenta que lo anterior no se verifica con otros módulos de almacenamiento (por ej. capacitores o supercapacitores),

- Pérdida debida a la autodescarga (P0).

Las pérdidas por autodescarga son generalmente una función creciente del estado de energía (SoE).

Es decir, para tener valorado este parámetro, se deberá especificar la expresión funcional $P_0 = f(\text{SoE})$, correspondiente al módulo de almacenamiento utilizado en el sistema.

g) Pérdidas totales

Considerando un ciclo de operación del módulo de almacenamiento, el cual se caracteriza por un perfil en el tiempo de la potencia $P(t)$ y del estado de energía $\text{SoE}(t)$, las pérdidas totales P_{pt} serán iguales a la suma de las pérdidas de los procesos de carga-descarga más las pérdidas por autodescarga:

$$P_{pt}(t) = \alpha P(t)^2 + P_0(\text{SoE}(t))$$

h) Energía total de pérdidas

Por lo tanto, la energía total de pérdidas de la conversión del módulo de almacenamiento, evaluada en un ciclo completo de tiempo T, vendrá dada, por la obtención de la energía total perdida en todo el proceso desarrollado en el tiempo T:

NOVA MIRON S.A.

Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión

Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • www.novamiron.com.ar

SERVICIO DE ATENCIÓN PERMANENTE Contactos: 15-4945-1171 / 11-3581-4196 / 15-4945-1172

NOVA MIRON

$$E_{pt} = \int_0^T P_{pt}(t) dt$$

$$E_{pt} = \int_0^T [\alpha P(t)^2 + P_0(\text{SoE}(t))] dt$$

i) Eficiencias de la conversión (μ_{c0} y μ_c)

La eficiencia de la conversión normal (μ_{c0}), representa la relación entre la energía recuperada E_d durante la descarga y la energía consumida E_c durante la carga, calculada como un valor medio durante un ciclo de carga-descarga.

Dicho ciclo puede elegirse arbitrariamente, pero el SoE, después de la descarga, deberá ser idéntico al SoE antes del proceso de carga.

$$\mu_{c0} = \frac{E_d}{E_c}$$

Asumiendo que los procesos de carga y descarga del módulo de almacenamiento, se realizan a la misma potencia P , entonces la eficiencia de conversión normal será una relación de tiempos (descarga/carga).

$$\mu_{c0} = \frac{t_d}{t_c}$$

Para obtener la eficiencia de la conversión (μ_c), se deberá incorporar en el cálculo, la energía total de pérdidas.

j) Densidad de energía

Las tecnologías de baterías, utilizadas en los módulos de almacenamiento de energía, se pueden identificar y comparar en base al parámetro de "densidad de energía" (además de la eficiencia de la conversión a ciclo completo, la vida útil y el impacto ambiental).

La densidad de energía se define como la cantidad de energía que se puede almacenar, en un solo sistema, por unidad de volumen o por unidad de peso.

A los efectos, podemos indicar que las baterías de litio pueden almacenar entre 140 y 280 Wh por kilogramo, en una relación de almacenamiento de entre 2 a 3 veces más energía que las baterías de flujo y aproximadamente cinco veces más que las baterías de plomo-ácido.

3) Clases de sistemas de almacenamiento

NOVA MIRON S.A.

Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión

Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • www.novamiron.com.ar

SERVICIO DE ATENCIÓN PERMANENTE Contactos: 15-4945-1171 / 11-3581-4196 / 15-4945-1172

NOVA MIRON

Los SAE se pueden clasificar, con el fin de referenciarlos a parámetros característicos de función y operación (ciclos de uso, vida útil, envejecimiento, confiabilidad, etc.), de la siguiente forma:

- Sistemas físicos – mecánicos
- Sistemas eléctricos – electroquímicos.

A continuación, haremos una breve descripción de cada uno de estos sistemas.

A) Sistemas físicos - mecánicos

A.1) Aire comprimido

A estos sistemas se los conoce con la denominación inglesa de Compressed Air Energy Storage o Sistemas CAES.

Su principio de funcionamiento, para almacenar energía mecánica, se sustenta en el proceso de la compresión y expansión del aire.

A los efectos, se caracterizan por estar conformados por una fase de compresión del aire (motor-compresor), el cual se procede a almacenar en un reservorio o depósito.

A continuación, sigue una fase de expansión del aire comprimido, la cual permite recuperar la energía mecánica almacenada.

Se compone de un expansor volumétrico, el cual acciona un motor-generator eléctrico, a través del cual se obtiene energía eléctrica a la salida del sistema.

A continuación, se muestra un esquema de este sistema.

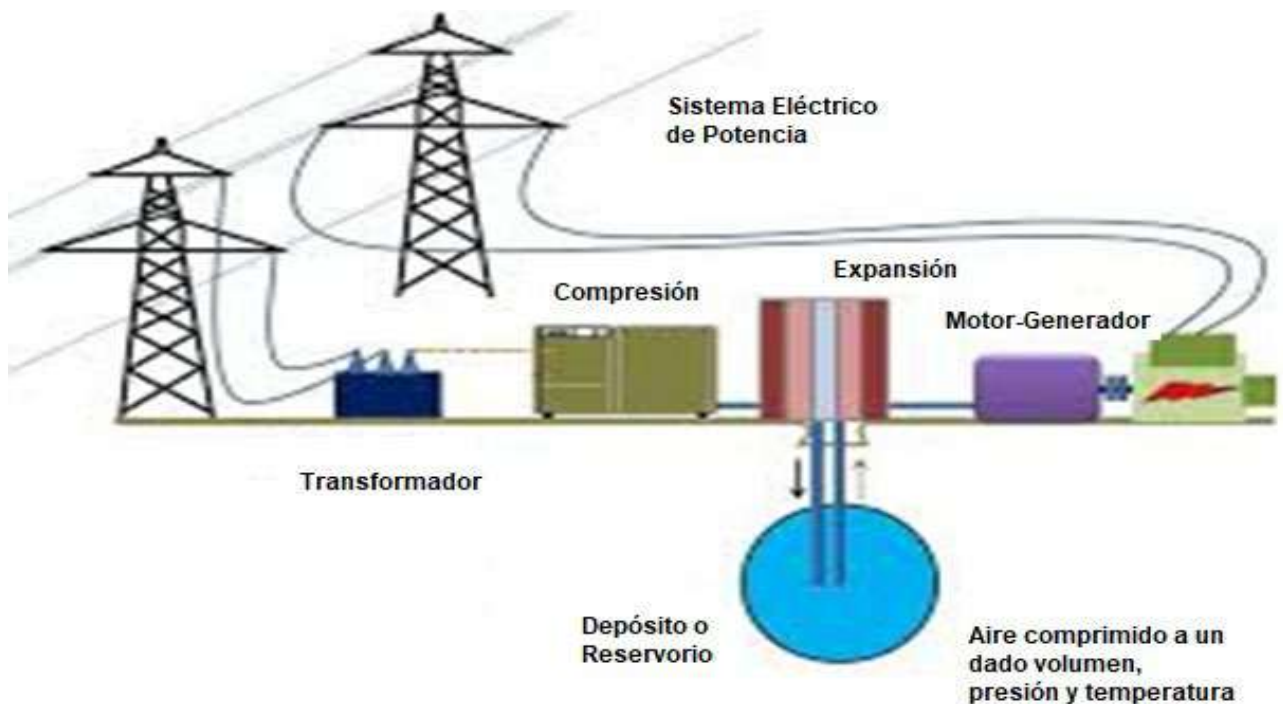
NOVA MIRON S.A.

Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión

Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • www.novamiron.com.ar

SERVICIO DE ATENCIÓN PERMANENTE Contactos: 15-4945-1171 / 11-3581-4196 / 15-4945-1172

NOVA MIRON



La cantidad de energía almacenada por el sistema CAES dependerá de los valores que posean el volumen y la presión del aire comprimido en el depósito, así como la presión atmosférica del medio ambiente.

Para el cálculo, se asume que el sistema se encuentra en equilibrio térmico con el medio ambiente, considerando una evolución isotérmica en el proceso de recuperación de la energía almacenada.

A.2) Cinéticos o Rotacionales (Flywheels)

Otra posibilidad para almacenar energía es mediante la energía cinética rotacional.

Estos sistemas, también conocidos como Flywheels, pertenecen a la categoría de los procesos físicos reversibles, basados en un volante de inercia.

Un sistema basado en un volante de inercia, se compone, generalmente, de una máquina eléctrica rotante, acoplada a una masa giratoria.

Con la ayuda de un convertidor electrónico de potencia, el par motor de la máquina, el cual es de velocidad variable (de signo positivo para la carga y signo negativo para la descarga) se puede controlar con precisión, lo que permite regular el nivel de la potencia intercambiada.

NOVA MIRON S.A.

Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión

Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • www.novamiron.com.ar

SERVICIO DE ATENCIÓN PERMANENTE Contactos: 15-4945-1171 / 11-3581-4196 / 15-4945-1172

NOVA MIRON

En sus comienzos, los volantes de inercia se fabricaban con acero convencional y por lo tanto tenían asignada una velocidad límite de operación. Los equipos modernos, utilizan materiales basados en compuestos de carbono y motores de imanes permanentes de alta velocidad.

Por tal motivo, los volantes de inercia actuales pueden girar a un número mucho mayor de revoluciones por minuto, almacenando así una mayor energía cinética (proporcional al cuadrado de la velocidad de rotación " ωn ").

Con el fin de disminuir el efecto de la fuerza de fricción o rozamiento, se incorporan dispositivos de encapsulado que permiten realizar un vacío parcial en el cuerpo de rotación.

Al mismo tiempo, se reducen las pérdidas aerodinámicas del sistema de rotación, lo que permite una mayor energía efectiva de almacenamiento.

La cantidad de energía almacenada en la masa giratoria, que gira a una velocidad ωn , viene dada por:

$$E = \frac{1}{2} J \omega n^2$$

En donde "J" es el momento de inercia de la masa rotante (volante de inercia).

A continuación, se destaca un esquema de un sistema de almacenamiento de energía del tipo rotacional o Flywheels.

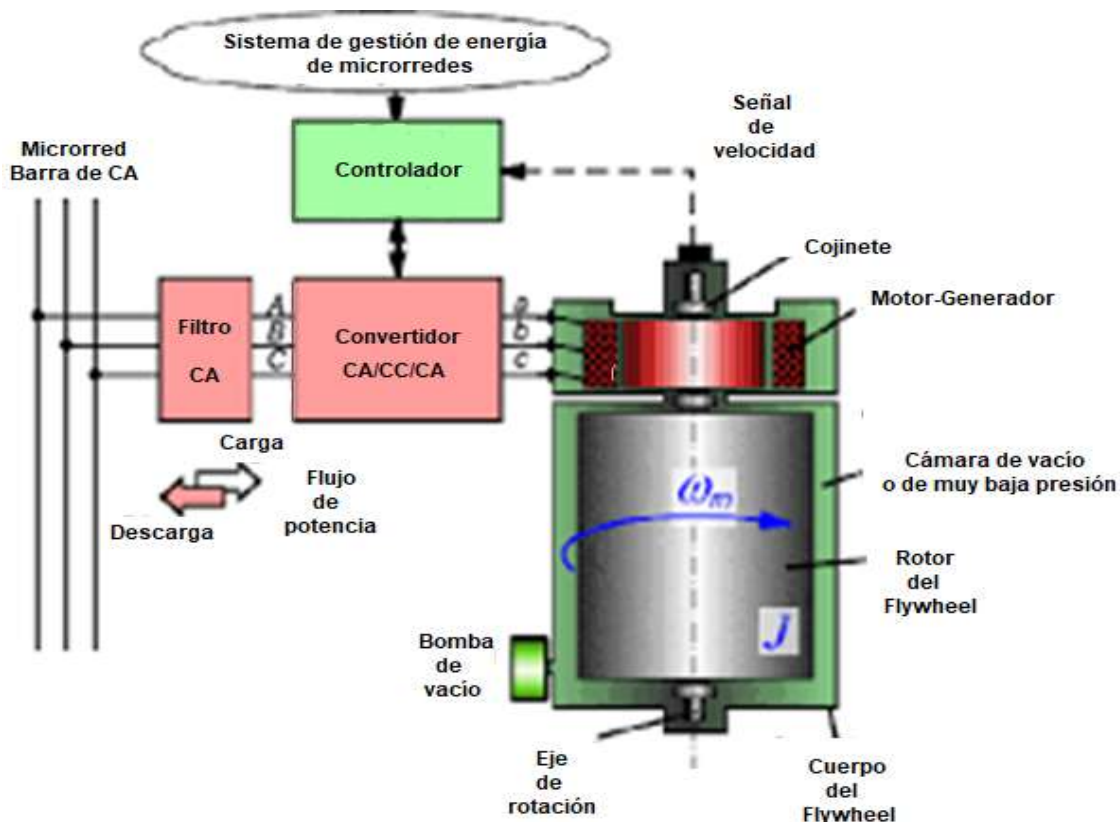
NOVA MIRON S.A.

Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión

Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • www.novamiron.com.ar

SERVICIO DE ATENCIÓN PERMANENTE Contactos: 15-4945-1171 / 11-3581-4196 / 15-4945-1172

NOVA MIRON



Los sistemas auxiliares del flywheel proporcionan el vacío parcial necesario para reducir las pérdidas aerodinámicas y, a menudo, incluyen el control de cojinetes especiales (magnéticos o neumáticos).

A.3) Bombeo hidráulico o Centrales de Bombeo

Las centrales hidroeléctricas de bombeo constan de depósitos de agua, situados a diferentes altitudes y asociados mediante un sistema reversible de bomba y turbina.

La energía almacenada E se puede expresar a través de la Ley de la Gravitación Universal.

$$E = m g h$$

Donde:

m = masa de agua desplazada entre los embalses (reservorios).

g = aceleración de la gravedad.

NOVA MIRON S.A.

Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión

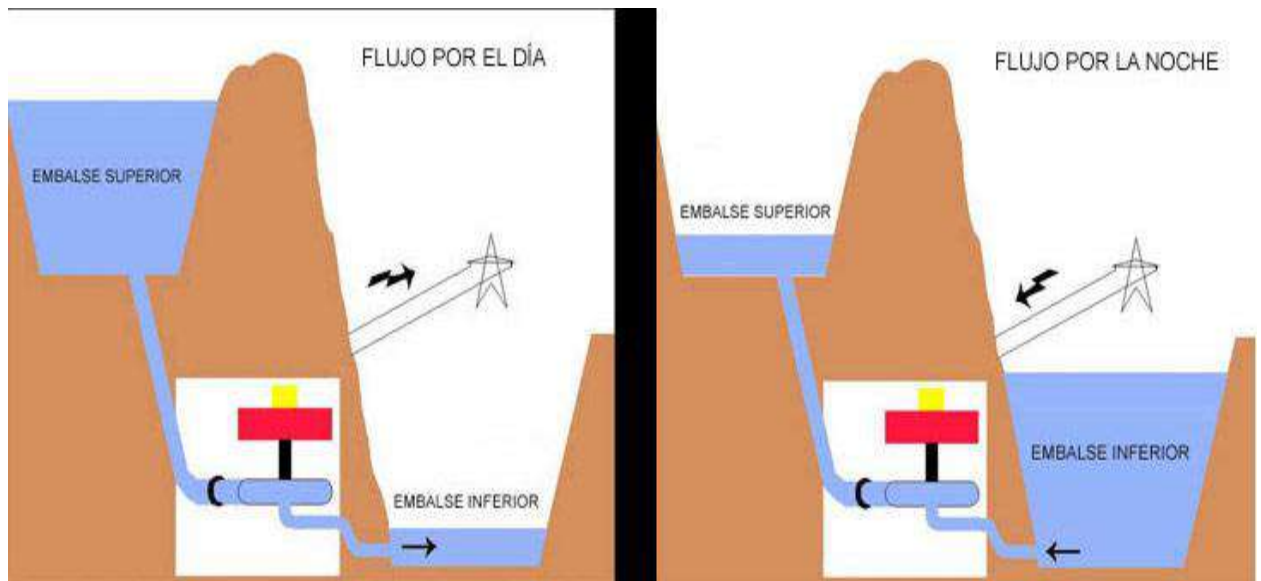
Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • www.novamiron.com.ar

SERVICIO DE ATENCIÓN PERMANENTE Contactos: 15-4945-1171 / 11-3581-4196 / 15-4945-1172

NOVA MIRON

h = diferencia de niveles entre ambos reservorios (o embalses).

A continuación, se muestra un esquema típico de una central de bombeo.



Del esquema observamos los componentes fundamentales en el proceso de almacenamiento y conversión de la energía.

Corresponde a bombas y turbinas hidráulicas, las cuales se encuentran acopladas directamente a máquinas sincrónicas, que funcionan como motores en el modo de acumulación y como generadores en el modo de restitución de la energía.

Se destaca que, durante el día, el sistema opera como generador (requerimientos de mayor demanda de energía), desplazando por gravedad la masa de agua, desde el embalse superior al inferior, accionando la turbina hidráulica y consecuentemente la máquina sincrónica (en modo generador).

Durante la noche (menor demanda de energía del sistema eléctrico de potencia), la máquina sincrónica opera como motor (adquiriendo energía de la red) y accionando la bomba que desplaza el agua desde el embalse inferior al superior, almacenando de tal forma la energía a la forma potencial.

Las centrales de bombeo modernas utilizan generadores/motores de velocidad variable (incorporando un convertidor de frecuencia), lo cual otorga varias ventajas, como ser la potencia variable (regulación de potencia) en el modo de bombeo.

B) Sistemas eléctricos - electroquímicos

NOVA MIRON S.A.

Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión

Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • www.novamiron.com.ar

SERVICIO DE ATENCIÓN PERMANENTE Contactos: 15-4945-1171 / 11-3581-4196 / 15-4945-1172

NOVA MIRON

B.1) Capacitivos y Supercapacitivos

Se basa en el uso de los capacitores como componente para almacenar la energía eléctrica.

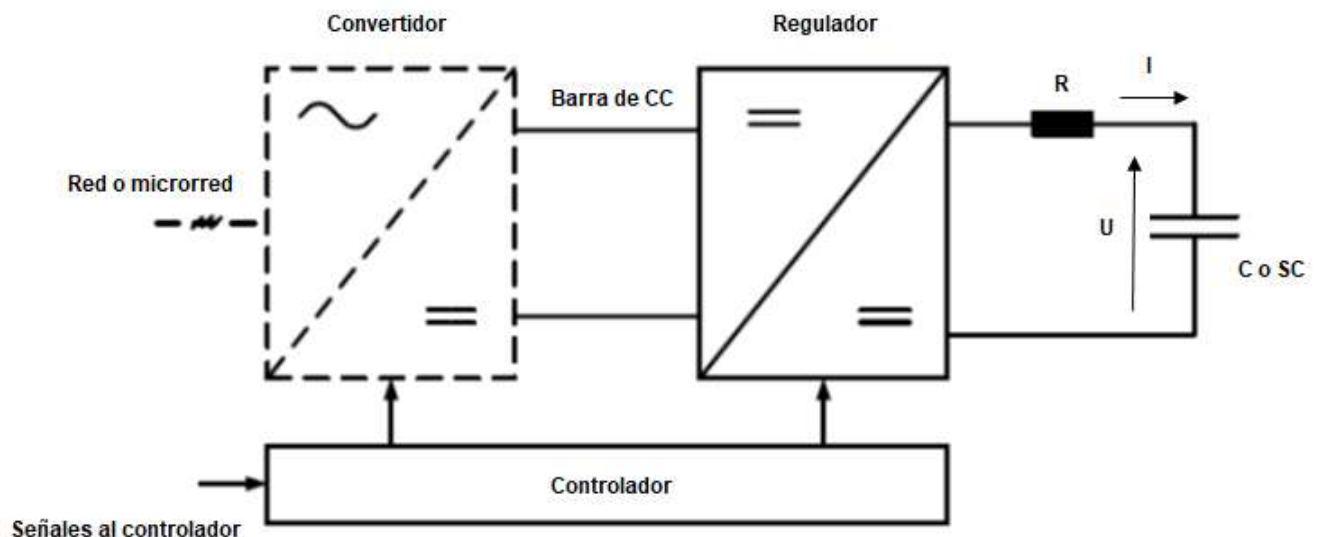
El capacitor es el componente dual del inductor, el cual almacena energía magnética.

$$E = \frac{1}{2} C U^2$$

Donde:

C = Capacidad del capacitor [F].

U = Tensión en bornes del capacitor [V].



Del esquema, podemos observar que la carga y descarga del capacitor se realiza a través de un Convertidor de potencia.

Este convertidor debe ser capaz de controlar la corriente (I) a través del capacitor, ya que una corriente positiva representa la carga, mientras que una corriente negativa representa la descarga del sistema de almacenamiento.

El modo de reposo, se caracteriza por una corriente nula (ésta es una propiedad importante para la determinación de la eficiencia energética del sistema).

Para el almacenamiento de energía se pueden utilizar capacitores convencionales de alta tensión, pero también, ante el avance tecnológico actual (tecnología de doble capa), del uso de supercapacitores, los cuales se caracterizan por poseer

NOVA MIRON S.A.

Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión

Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • www.novamiron.com.ar

SERVICIO DE ATENCIÓN PERMANENTE Contactos: 15-4945-1171 / 11-3581-4196 / 15-4945-1172

NOVA MIRON

una muy alta capacidad eléctrica y por lo tanto un mayor almacenamiento de energía.

B.2) Tecnologías SMES (Superconductive Magnetic Energy Storage Systems)

También se puede almacenar la energía en un inductor (energía del campo magnético), siendo éste el componente dual del capacitor (energía del campo eléctrico).

El sistema se caracteriza por almacenar la energía en el campo magnético creado en el inductor (bobina), como consecuencia de la circulación de una corriente (I). La energía magnética almacenada se expresa como:

$$E = \frac{1}{2} L I^2$$

Donde:

L = Inductancia del inductor [H].

I = Corriente que circula por el inductor.

El SMES complementa la energía magnética almacenada en el inductor, con el agregado de la propiedad de superconducción del material que conforma la bobina inductora.

La propiedad de superconductividad (resistencia óhmica prácticamente nula) será clave para aumentar la densidad de energía almacenada y también para reducir las pérdidas por efecto Joule, a un valor mínimo residual.

En la siguiente figura se observa un esquema general de la tecnología de almacenamiento SMES.

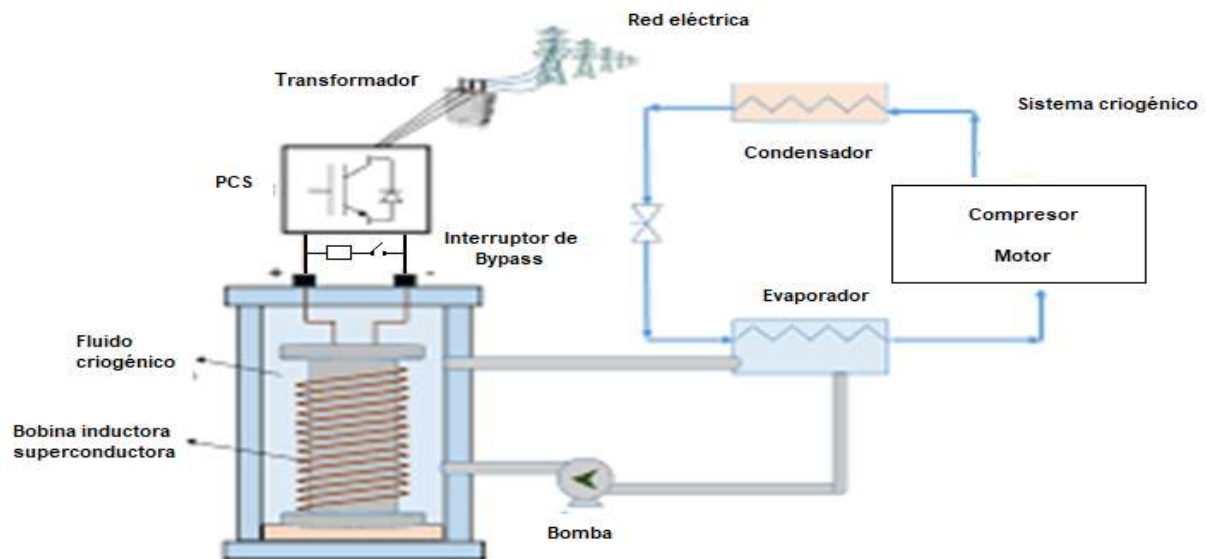
NOVA MIRON S.A.

Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión

Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • www.novamiron.com.ar

SERVICIO DE ATENCIÓN PERMANENTE Contactos: 15-4945-1171 / 11-3581-4196 / 15-4945-1172

NOVA MIRON



Del esquema destacamos la bobina superconductora, por donde circulará la corriente que generará el campo magnético. Por lo tanto, la corriente circulará prácticamente sin resistencia, manteniendo el campo magnético y su energía almacenada. La capacidad de almacenamiento de energía quedará determinada por la geometría y tamaño de la bobina, junto al material superconductor utilizado (Superconductor del tipo LTS Niobio-Titanio).

El sistema criogénico posee la función de alcanzar y mantener la temperatura crítica del material superconductor de la bobina inductora, que para el caso del Niobio-Titanio será de 10 K (-263 °C). El fluido criogénico es por lo general helio líquido.

El Sistema de Acondicionamiento de Potencia (PCS), se conforma con un conjunto de componentes de electrónica de potencia (inversor y rectificador), cuya función será la de interactuar entre la red eléctrica y el sistema de almacenamiento SMES. Su función será la de alimentar la bobina inductora superconductora con una corriente continua, la cual será rectificadas desde la red de CA. Con el fin de entregar a la red, la energía magnética almacenada, utiliza el dispositivo inversor, de forma tal de convertir la corriente en continua en corriente alterna.

Además, el componente PCS tendrá la función de controlar, en todo momento, la tensión y la corriente, estableciendo la potencia nominal del sistema de almacenamiento.

Para un modo de operación en reposo y también por motivos de seguridad del sistema, se incorpora un interruptor de derivación o de bypass.

Se caracterizan por tener una alta eficiencia de conversión (del orden del 95%) y un tiempo de respuesta del sistema en el orden de los 5 ms.

Como desventajas, presentan una baja densidad de energía con un costo muy alto de implementación.

NOVA MIRON S.A.

Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión

Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • www.novamiron.com.ar

SERVICIO DE ATENCIÓN PERMANENTE Contactos: 15-4945-1171 / 11-3581-4196 / 15-4945-1172

NOVA MIRON

B.3) Sistemas Redox (clásicos)

En la actualidad, se han diseñado y desarrollado un conjunto efectivo de tecnologías basadas en procesos electroquímicos, para la aplicación en los SAE, con un enfoque hacia los sistemas eléctricos de potencia (generación, transmisión y distribución).

El éxito de esta aplicación se basa en el desarrollo de baterías con mayores densidades de energía y densidades de potencia.

También, existe un amplio desarrollo en la integración de estos sistemas de almacenamiento, en la Gestión de Activos, a lo largo de todo el ciclo de vida de los mismos (en especial los estudios sobre los mecanismos de falla, degradación e incremento de la vida útil de las baterías).

El proceso de almacenamiento electroquímico se basa en las reacciones de oxidación y reducción (redox), en donde los electrodos de la batería (cátodo y ánodo) se encuentran sumergidos en un electrolito y cuyo efecto será el desarrollo de una diferencia de potencial entre ambos electrodos.

Es decir, una batería electroquímica se puede considerar como una fuente de tensión, siendo la corriente circulante la variable de carga y descarga.

El electrodo positivo será el cátodo (donde se produce la reducción), y el negativo el ánodo (donde se produce la oxidación).

En la Parte 3, nos abocaremos a realizar un detalle más exhaustivo de los procesos electroquímicos clásicos en las baterías, por lo que al momento nos dedicaremos a describir conceptualmente los sistemas de almacenamiento basados en baterías.

En tal sentido, la siguiente figura nos muestra un esquema conceptual de un sistema de almacenamiento de energía basado en baterías, denominado BESS por las siglas en inglés (Battery Energy Storage Systems).

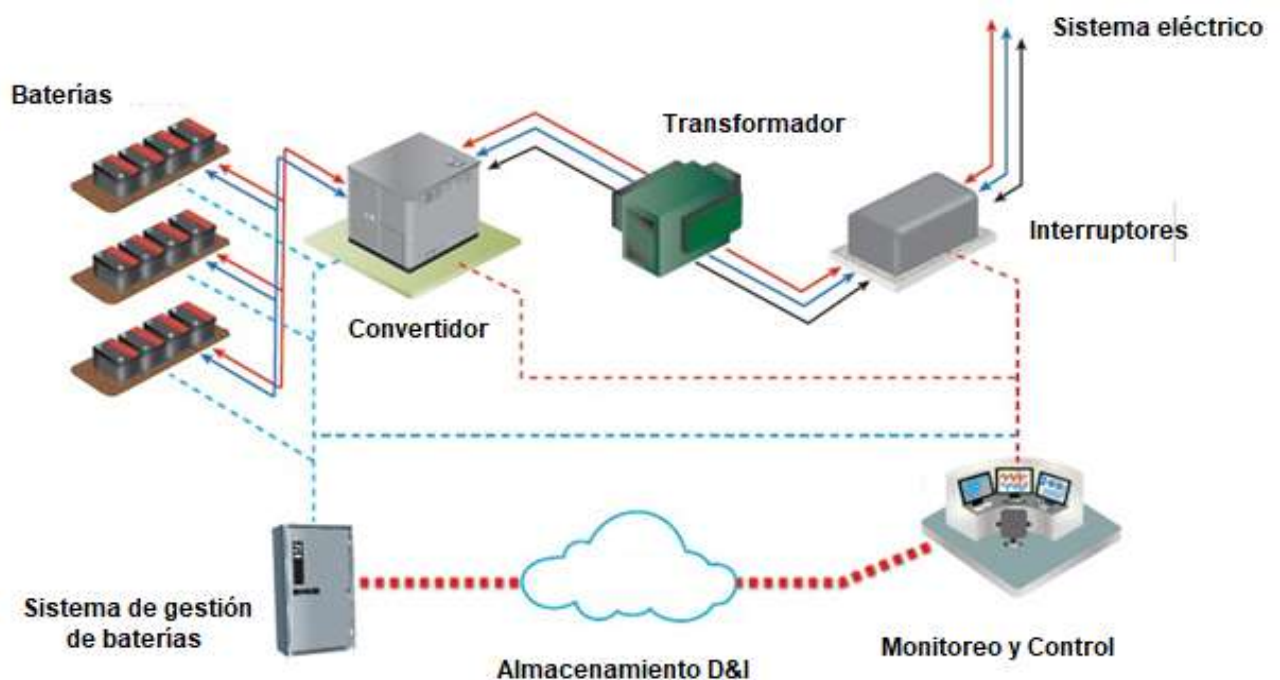
NOVA MIRON S.A.

Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión

Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • www.novamiron.com.ar

SERVICIO DE ATENCIÓN PERMANENTE Contactos: 15-4945-1171 / 11-3581-4196 / 15-4945-1172

NOVA MIRON



A grandes rasgos, podemos decir que el principio de funcionamiento de un BESS es muy parecido al de un SAE del tipo capacitivo.

Observamos, del esquema, el componente Convertidor, el cual posee la función de convertir la corriente en CA en corriente CC, tanto positiva como negativa (gestión del flujo de almacenamiento y despacho).

Además, se destaca el dispositivo Sistema de Gestión de Baterías (BMS por sus siglas en inglés "Battery Management System"), cuya función será la de balancear, proteger y extender la vida útil de las baterías (en especial las de ion-litio).

Esta unidad se encarga de equilibrar las diferentes celdas en disposición serie, así como de supervisar y proteger el sistema en su conjunto.

Posee un módulo de monitoreo de la tensión, corriente y temperatura de los bancos de baterías, junto a acciones para evitar sobrecargas, imprevistos de descarga profunda y eventuales cortocircuitos en la instalación.

El Convertidor permite mejorar la estabilidad de la red eléctrica, ya que en la operación en modo inversor tiene la capacidad de inyectar potencia reactiva.

En el modo de inyección de potencia activa, permitirá controlar la frecuencia de la red, ante variaciones fuera de límite de este parámetro.

Como consecuencia de una falla temporal en el sistema eléctrico, será un factor clave de compensación, ante una caída de la tensión en la red.

NOVA MIRON S.A.

Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión

Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • www.novamiron.com.ar

SERVICIO DE ATENCIÓN PERMANENTE Contactos: 15-4945-1171 / 11-3581-4196 / 15-4945-1172

NOVA MIRON

Otra de sus aplicaciones, se enfoca sobre los sistemas de generación renovables, ya que permitirá estabilizar el estado de fluctuación ante la falta de disponibilidad de los recursos.

Como características principales del BESS, podemos citar que posee una alta eficiencia de conversión (del orden del 90 %), pero con un tiempo de respuesta limitado (segundos a minutos). Posee una alta densidad de energía, como así también de potencia.

Vale aclarar que el ciclo de vida es limitado, por la influencia de la vida útil asociada a las baterías.

B.4) Baterías de flujo

Estos sistemas hacen uso de las denominadas baterías de flujo (acumulador electroquímico), las cuales se caracterizan por estar conformadas por dos electrodos que se encuentran separados por una membrana de intercambio.

El almacenamiento de la energía electroquímica se produce mediante la variación de la concentración de iones en dos líquidos; uno es el electrolito positivo y el otro el electrolito negativo, en donde se desarrolla el proceso redox. Los electrolitos se encuentran en depósitos separados, fluyendo a través de sendas bombas de impulso.

Una de las ventajas significativas de las baterías de flujo es que evitan algunas limitaciones de las baterías electroquímicas clásicas, como ser evitar la creación de compuestos sólidos derivados del proceso redox.

Estos compuestos se depositan progresivamente en los electrodos, lo cual será causa de acelerar el envejecimiento de las baterías clásicas y por lo tanto de disminuir sus vidas útiles.

A continuación, se muestra un esquema básico del SAE con baterías de flujo redox.

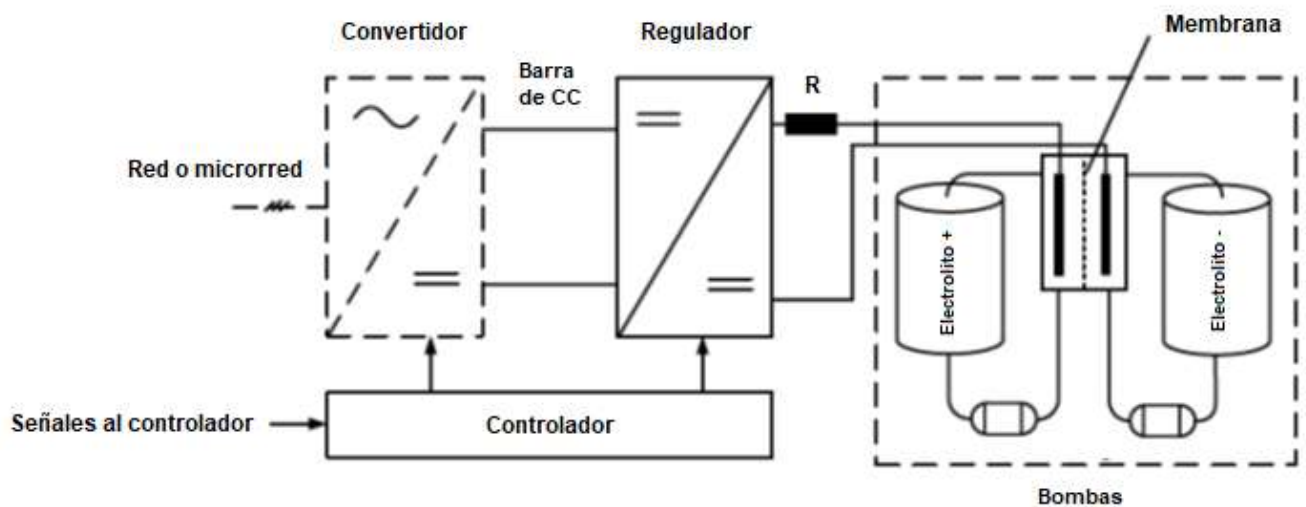
NOVA MIRON S.A.

Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión

Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • www.novamiron.com.ar

SERVICIO DE ATENCIÓN PERMANENTE Contactos: 15-4945-1171 / 11-3581-4196 / 15-4945-1172

NOVA MIRON



Del esquema se observa la forma en que los electrolitos (positivo y negativo), contenidos en sus respectivos tanques separados, son impulsados a circular a través de respectivas bombas.

En el cuerpo de la batería de flujo, se observan los electrodos (en donde se establece la diferencia de potencial como consecuencia del proceso redox) y la membrana iónica.

La membrana separa los electrolitos positivo y negativo, permitiendo el paso de iones para equilibrar la carga, mientras evita la mezcla cruzada de las sustancias activas que intervienen en el proceso redox.

Muy importante será tener en cuenta, en este SAE, el cálculo de la eficiencia de conversión, debido al consumo de energía de las bombas de circulación de los electrolitos, el cual no representa un valor despreciable.

B.5) Celdas de combustible – Almacenamiento de Hidrógeno

Otro convertidor de energía electroquímica, es la celda de combustible, la cual representa una fuente de energía con excelente capacidad de integración a los SAE.

Esta tecnología de almacenamiento y despacho de energía eléctrica, se combina con un conjunto de componentes, como ser: celda de combustible, suministro de agua fría, intercambiador, humidificador, almacenamiento de H₂, bombas de recirculado de H₂, separadores de agua, etc.

Este SAE se caracteriza por almacenar grandes cantidades de energía.

A los fines que nos ocupa, no vamos a desarrollar en detalle este sistema, debido a las limitaciones prácticas en su implementación.

A continuación se muestra un esquema simplificado de esta tecnología.

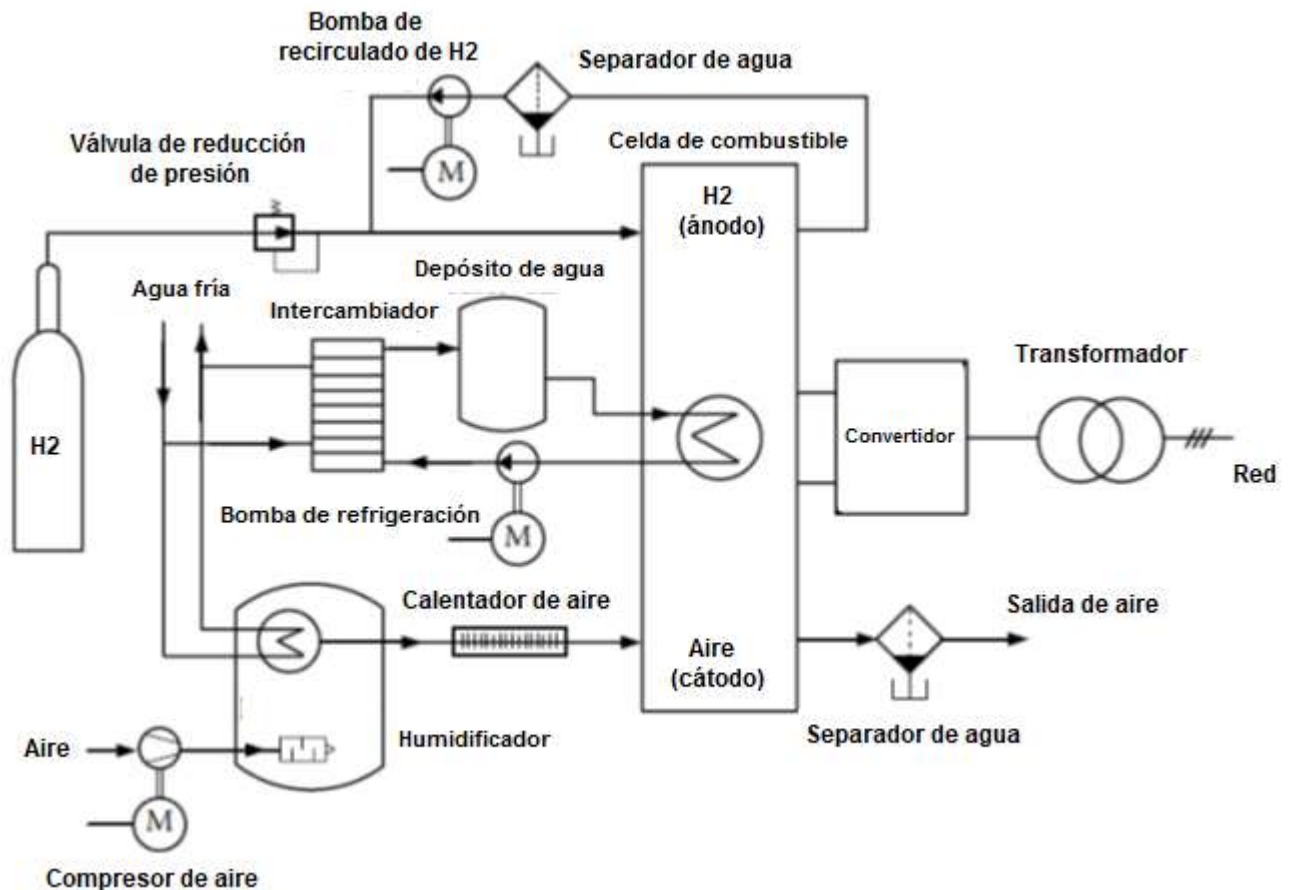
NOVA MIRON S.A.

Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión

Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • www.novamiron.com.ar

SERVICIO DE ATENCIÓN PERMANENTE Contactos: 15-4945-1171 / 11-3581-4196 / 15-4945-1172

NOVA MIRON



En la Parte 2 vamos a encarar el desarrollo de los aspectos relacionados con las propiedades y capacidades de los sistemas de almacenamiento utilizados en la industria.

Además, haremos una descripción conceptual del Diagrama de Ragone, el cual constituye una herramienta fundamental en el proceso de adquisición de un SAE. Finalizaremos con una ampliación del concepto de eficiencia de los SAE y su relación con el ciclo de vida de los mismos, desde una visión de la Gestión de Activos.

Departamento de Ingeniería.
Nova Mirón S.A

NOVA MIRON S.A.

Servicio y mantenimiento • Transformadores de media y alta tensión

Las Heras 4891 • (B1603AXZ) • Villa Martelli • Buenos Aires • Argentina • Tel.: (011) 4709-6563 rot. • www.novamiron.com.ar

SERVICIO DE ATENCIÓN PERMANENTE Contactos: 15-4945-1171 / 11-3581-4196 / 15-4945-1172