



MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN

Ciemat
Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas



Unidad
de Formación



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



TECNOLOGÍAS, OPERACIÓN Y APLICACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

23 MAYO – 03 JUNIO DE 2022

EJERCICIOS PRÁCTICOS (I)

PROFESOR
Dr. Marcos Lafoz Pastor

EJERCICIO 1.

Considerando una batería de litio que ofrece servicios de ajuste a la red eléctrica formada por tres ramas en paralelo con 200 celdas cada rama, siendo las siguientes características de cada celda: $U_{\text{celda}} = 3.6\text{V}$; $C = 40\text{ Ah}$; Tasa de descarga máxima continua = $2.5C$; $R_{\text{int}} = 0.01\text{ Ohmios}$, ¿cuál es la potencia máxima útil en kW que puede dar el conjunto?: Si se puede descargar hasta el 20% del SoC, ¿Cuál es la energía aprovechable teórica en kWh?

EJERCICIO 2.

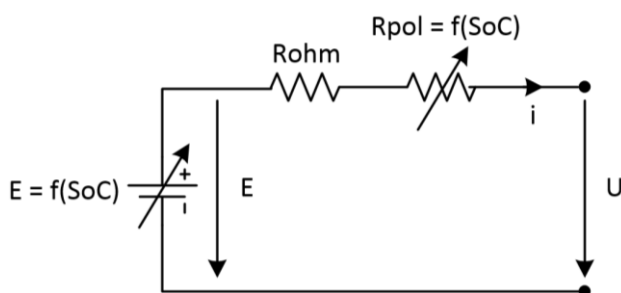
Como sabes, la ley de Peukert es una expresión que fue desarrollada para baterías de plomo para representar la no linealidad de la capacidad con la tasa de descarga, aunque se puede utilizar en otro tipo de baterías, entre otras las de litio. En el caso de una batería de litio, de la cual se conoce que su coeficiente de Peukert es 1.04 y que tras realizar un ensayo descargándola a 50A se puede utilizar durante 2 horas, ¿Cuál es la capacidad que, según la ley de Peukert, presentaría la batería si se quiere utilizar con una corriente de descarga de 150A?

EJERCICIO 3.

Es conocido que una celda de litio se puede representar mediante el siguiente circuito eléctrico equivalente. ¿Cuántas celdas en serie del tipo señalado en la tabla harían falta para que se pudieran utilizar en un vehículo eléctrico que requiere una tensión de continua mínima de 331V cuando está dando una corriente de 130A?

Es necesario saber para la resolución del problema que el estado de carga (SoC) mínimo permitido por el BMS del vehículo es de un 25%.

En el cual:

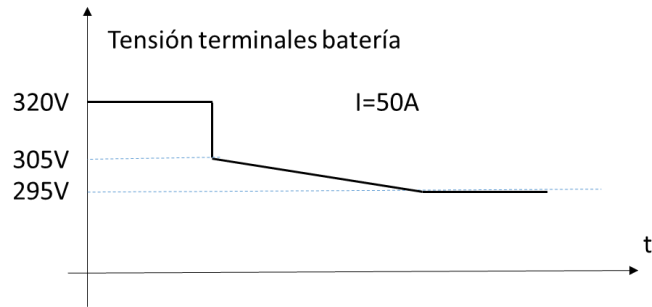


| |
|--|
| Celda de Litio: |
| 100Ah (a 0.05C y 20°C) |
| $E_{\text{celda}} = 4.0 - K \cdot \frac{100}{\text{SoC}(\%)}$, siendo $K = 0.2$ |
| $R_{\text{ohm}_{\text{celda}}} = 1.5\text{ m}\Omega$ |
| $R_{\text{pol}_{\text{celda}}}(\text{m}\Omega) = 2.5 - \frac{25}{1000} \cdot \text{SoC}(\%)$ |

NOTA: Los datos del circuito equivalente están dados por celda.

EJERCICIO 4.

Una determinada batería que se pone a descargar con 50A, partiendo de una situación de circuito abierto y cargada con tensión nominal, tiene una respuesta en la tensión en bornes que viene dada por el siguiente perfil. Si está compuesta por dos ramas en paralelo de 100 celdas cada una, determinar la tensión nominal de cada celda y las resistencias óhmica y de polarización de cada celda. ¿Cuál es el rendimiento del sistema en estas condiciones de operación?.



NOTA: La evolución de la tensión debida a la resistencia de polarización se ha aproximado mediante una recta, aunque debería ser una variación exponencial.

EJERCICIO 5

A partir de las expresiones de pérdida de capacidad de una batería de Li, donde la pérdida de capacidad por ciclado y por calendario de una batería de Li, así como la variación de resistencia interna, viene dada por las expresiones:

$$Q_{cal} = f \cdot e^{g \cdot SoC} \cdot e^{h/T} \cdot t^z$$

$$Q_{cyc} = (a \cdot T^2 + b \cdot T + c) \cdot e^{(d \cdot T + e) \cdot C_{rate}} \cdot Ah$$

$$\Delta R_{int} = a \cdot e^{b \cdot T} \cdot c \cdot e^{d \cdot SoC} \cdot t^g$$

$$[T] = [K]; [t] = [días]; [C_{rate}] = [-]; [Ah] = [Ah]; [Q_{cal}] = [Q_{cyc}] = [%]$$

donde los parámetros para esta determinada batería son los siguientes:

$$a = 2.0916 \cdot 10^{-8}; b = -1.2179 \cdot 10^{-5}; c = 0.0018; d = -1.7082 \cdot 10^{-6}; e = 0.0556$$

$$f = 5.9808 \cdot 10^6; g = 0.6898; h = -6.4647 \cdot 10^3; z = 0.5$$

Considerando una batería de 48.2 kWh de 340V de tensión nominal, si se somete a un ciclo diario de descargas y se recarga por la noche, de manera que la tasa promedio de descarga sea 1C y una tasa promedio de recarga de 0.5C, y su temperatura media sea de 40°C

1. ¿Cuántos días y años se podrá utilizar antes de que pierda un 20% de su capacidad?
2. ¿Qué variación en la resistencia interna de la batería en ese orden de tiempo? ¿es significativa?
3. ¿Qué ocurriría si en ese tiempo y que resulta como resultado del apartado anterior la temperatura se consigue mantener con una media de 30°C?

EJERCICIO 6

Se quieren utilizar celdas de Li para montar la batería de un vehículo eléctrico con un motor de tensión máxima 225V. Las celdas a utilizar tienen una resistencia interna de 1,5 miliohmios cada una y una tensión mínima de utilización de 2,85V, a partir de la cual el BMS no permitiría su utilización.

Considerando la situación más restrictiva de operación,

- a) Calcular cuántas celdas habría que colocar en el vehículo y en qué disposición para permitir que la batería pudiera dar una potencia máxima, en todo momento de 70 kW. Da la respuesta sin considerar y considerando la resistencia interna de las celdas, comentando si hubiera alguna diferencia entre estos dos casos.
- b) ¿Qué corriente máxima (de nuevo en la condición más desfavorable) están suministrando las celdas cuando el vehículo desarrolla una potencia de 70kW?
- c) Suponiendo que se eligen unas celdas para que el vehículo de esta potencia nominal cuando trabajan a 1.65C, ¿Cuál sería la capacidad de las celdas seleccionadas?
- d) Teniendo en cuenta que la tasa de descarga a la que se mantiene la energía de las baterías es 0.5C, aplicando la expresión de Peukert con un coeficiente de 1.04, cuánto tiempo tardaría la batería del vehículo en descargarse desde un 100% hasta un 50% si trabaja de forma continua con una intensidad de 80A? ¿Cuál es la energía que es aprovechable en la batería en estas condiciones?
- e) Se conecta el vehículo eléctrico a la red trifásica de 400V mediante un cargador reversible. Las baterías del vehículo están completamente cargadas, suponiendo una profundidad de descarga del 80% y un rendimiento entre la batería y el punto de conexión a la red del 90%. Si se descarga con una corriente hacia la red de 64A, ¿qué potencia se puede volcar a la red y durante cuánto tiempo?.
- f) Se utiliza un sistema adicional de baterías domésticas para recargar las baterías del vehículo eléctrico. Se sabe que estas nuevas baterías son capaces de dar 40kW durante 1.4 horas. ¿Cuál es la energía disponible si están totalmente cargadas?. Si tienen una profundidad de descarga máxima del 70%, ¿cuál sería la energía nominal de las baterías?. Si la tensión de las baterías es 500V, ¿para qué corriente habría que diseñar la instalación de suministro?.

NOTA: No dar sólo el resultado, es necesario explicar el desarrollo que se ha seguido para llegar al mismo. Utilizar el equivalente eléctrico de la batería.

EJERCICIO 7

Se dispone de un sistema de almacenamiento que contiene 10 módulos de ultracondensadores formado por 60 celdas cada uno que tienen las características por celda que aparecen en la tabla adjunta. Los módulos están dispuestos en dos ramas en paralelo de 5 módulos cada una en serie. Si para una aplicación se quiere obtener una energía de 1.2 kWh por ciclo de descarga partiendo de la tensión máxima de las celdas, ¿hasta qué tensión se deberían descargar las celdas? ¿Cuál sería la potencia útil (descontando las pérdidas) que entregaría el sistema en ese punto de trabajo en el que se ha terminado de dar la energía requerida por la aplicación?.



| <i>C</i> | <i>Tensión</i> | <i>ESR</i> | <i>I max</i> | <i>Peso</i> | <i>Volumen</i> |
|---------------|----------------|----------------|--------------|-----------------|----------------|
| 3200 F | 2.85 V | 0.09 mΩ | 100 A | 0.533 Kg | 0.390 l |

EJERCICIO 8

La empresa ONE propone un sistema innovador de batería que consiste en un sistema híbrido de 20.3 kWh que integra dos tipos de batería. La primera, llamada Aries, es una batería de litio-hierro-fosfato (LFP), más segura y que está destinada sobre todo a dar potencia. La segunda batería, denominada Gemini, sirve para extender la autonomía en términos de energía y se va a utilizar muchas menos ocasiones, aunque hay que dimensionar el sistema de forma conjunta.

El sistema se quiere conectar a una red trifásica con tensión nominal de 220V, se quiere que aporte una potencia máxima de 41.7kW y, como se ha dicho antes, el sistema combinado tiene una energía de 20.3 kWh. Se conocen además las características de las celdas de cada tipo, son las que se muestran en la tabla siguiente:

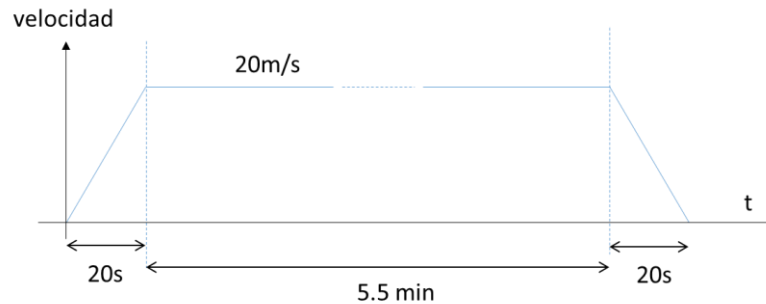
| | Tensión nominal | Capacidad | Máxima corriente |
|--------|-----------------|-----------|------------------|
| Aries | 3,2V | 12Ah | 4C |
| Gemini | 3,6V | 36Ah | 1.5C |

- ¿Qué número de celdas de uno y otro tipo elegirías?
- ¿Cómo dispondrías las celdas de los dos tipos de batería en relación a la electrónica de potencia con la que iría conectada a la red?

NOTA: Los datos del problema no se corresponden con un sistema real existente.

EJERCICIO 9

Se quiere diseñar el subsistema de baterías para un vehículo eléctrico destinado al reparto de mercancías en un aeropuerto. El vehículo realiza un perfil de funcionamiento constante 75 veces al día, realizándose la recarga de las baterías al final de cada día. Se conoce el perfil de funcionamiento de velocidad frente al tiempo que se muestra en la figura. Además, se sabe que además de la potencia requerida para la aceleración se debe usar energía para compensar el rozamiento, el cual depende de la velocidad a lo largo de todo el recorrido de la siguiente manera: $P_{roz} \text{ (W)} = 150 \cdot \text{velocidad (m/s)}$. La masa del vehículo se considera constante e igual a 1000Kg.



NOTA: A partir del perfil de velocidades se puede sacar la aceleración, de ahí con la masa la fuerza y de ahí la potencia. Considerar valores medios en los tramos de velocidad variable. Tener en cuenta que en el frenado la energía se devuelve a las baterías y por tanto contabiliza en sentido contrario. Añadir a la energía correspondiente al rozamiento que siempre es consumida.

- 1) Considerando este perfil resulta un balance de energía diario de 21,25 kWh. Realiza los cálculos pertinentes para comprobar que este es el valor de energía diario necesario. NOTA: Puedes optar por seguir adelante y tener en cuenta este resultado para el resto del problema.
- 2) ¿Cuál es la potencia máxima que requiere el sistema y para la cuál habría que diseñar las baterías?

Para este sistema se dispone celdas de litio LFeP con la siguiente información: $V_{nom} = 3.75V$; $C = 69.69Ah$; $R_{int} = 1 \text{ m}\Omega$; el fabricante da curvas de operación a 0.3C, a 0.5C y a 1C.

- 3) Sin considerar las pérdidas en la resistencia interna de las baterías, ¿Cuántas celdas serían necesarias para cubrir las necesidades del sistema?. Utiliza las restricciones de energía y potencia para determinarlo.
- 4) Considerando las pérdidas en la resistencia interna, ¿cómo se ve modificado el resultado anterior, haciéndolo para la variable más restrictiva?.
- 5) Si el motor que se va a utilizar para la tracción presenta una fuerza electromotriz de 190V entre fases a la máxima velocidad, ¿cómo dispondrías las celdas en la batería? ¿sería suficiente el número de celdas del apartado 3 para garantizar el correcto funcionamiento del sistema completo, considerando la situación más desfavorable del ciclo de trabajo?
- 6) Cuánto tardarían en recargarse completamente las baterías al final del día, suponiendo que se parte de un $SoC = 20\%$, si se dispone de un cargador de 5kW que tiene un rendimiento del 85%.