

POWER FLOW DISTRIBUTION STRATEGY OF A DUAL MODE LOCOMOTIVE

ESTRATEGIA DE DISTRIBUCIÓN DE FLUJOS DE POTENCIA DE UNA LOCOMOTORA DUAL

Ing. Diana Sofía Mendoza¹, Ph.D. Javier Solano¹, Ph.D. Loïc Boulon²

¹Universidad Industrial de Santander Bucaramanga, Santander, Colombia.

²Université du Québec à Trois-Rivières Trois-Rivières, Québec, Canadá

E-mail: diana2198149@correo.uis.edu.co

jesolano@uis.edu.co

loicboulon@uqtr.ca

Abstract: This article presents a power flow management strategy for a hybrid locomotive equipped with a fuel cell, supercapacitors, and batteries. The locomotive also has intermittent access to a medium voltage network through a pantograph. The distribution of energy between sources complies with operating restrictions on the electricity sources. The proposed strategy does not consider information or predictions of future load consumption. The strategy aims to reduce a cost function that considers the cost of hydrogen, the electricity consumed from the grid, and energy sources' degradation. The results obtained are compared with those reported in the literature as the best solution proposed to this problem by the vehicle technology society (VTS) of the IEEE Institute.

Keywords: Power flow management strategy, fuel cell, batteries, dual locomotive, regenerative braking.

Resumen: Este artículo presenta una estrategia de gestión de flujos de potencia para una locomotora híbrida equipada con una pila de combustible, supercondensadores y baterías. La locomotora cuenta además con acceso intermitente a una red de media tensión mediante un pantógrafo. La distribución de energía entre las fuentes cumple con restricciones de operación en las fuentes de electricidad. La estrategia propuesta no considera información o predicciones del consumo de carga futuro. La estrategia busca reducir una función de costo que considera el costo del hidrógeno, la electricidad consumida de la red y la degradación de las fuentes de energía. Los resultados obtenidos se comparan con los reportados en la literatura como la mejor solución propuesta a este problema por la sociedad de tecnología vehicular (VTS, por sus siglas en inglés) del instituto IEEE.

Palabras clave: Estrategia de gestión de flujos de potencia, pila de combustible, baterías, locomotora dual, frenado regenerativo.

1. INTRODUCCION

Las locomotoras híbridas equipadas con pilas de combustible (FC, por sus siglas en inglés) son consideradas una excelente alternativa para reemplazar las locomotoras equipadas con motores diésel. Adicionalmente, una locomotora híbrida de modo dual puede operar en vías electrificadas y no electrificadas. Considerando el alto costo de la electrificación de la red, este es un buen compromiso para reducir el consumo de energía en el transporte ferroviario (Lhomme et al. 2019). La implementación de fuentes híbridas para estas locomotoras requiere definir estrategias de gestión de energía (EMS) que determinan la distribución de flujos de potencia las fuentes de energía disponibles. Las soluciones buscan

minimizar una función de costo multiobjetivo, sujeta a restricciones estáticas y dinámicas para limitar la potencia, las corrientes y el estado de carga (SOC) de las fuentes de almacenamiento de energía.

En condiciones de operación real, no es siempre posible predecir los perfiles de consumo de potencia en una locomotora y, por lo tanto, las EMS deben generar referencias para perfiles no conocidos a priori y utilizando únicamente información del estado presente del sistema. Los enfoques basados en reglas se apoyan en la experiencia humana para diseñar las EMS. En comparación con otros enfoques, estas estrategias son intuitivas y fáciles de implementar. Muchas investigaciones proponen metodologías basadas en reglas para determinar la distribución de

energía en trenes híbridos (Allègre et al. 2010; Ciccarelli et al. 2017).

La EMS presentada en este artículo busca reducir en lo posible la energía disipada durante el frenado del tren. En algunos sistemas ferroviarios urbanos, este valor puede llegar hasta el 50 % de la energía de tracción neta (González-Gil et al. 2014). Por tanto, no es casualidad que una de las oportunidades más significativas para reducir el consumo de energía en los trenes sea realizar un uso eficiente de la energía regenerada durante el frenado. La mayoría de los trabajos publicados en recuperación de energía mediante fuentes empotradas se centran en trenes de metro y tranvías, considerando sus frecuentes arranques / paradas. La mayoría de estas investigaciones estiman una reducción del consumo total de energía en torno al 12-35 %.

Este trabajo propone una versión ampliada de la investigación presentada en (Mendoza et al. 2019) que fue la mejor solución presentada al desafío de vehículos de motor IEEE VTS 2019. Esta EMS tiene nuevos objetivos como maximizar la energía recuperada durante el frenado, que representa un parte importante de las pérdidas totales de energía del tren. El documento está organizado de la siguiente manera: la sección 2 presenta la EMS global del sistema y las estrategias de gestión locales para la pila de combustible, baterías, supercondensadores y condensador de bus de CC. La sección 3 presenta los resultados obtenidos en simulación y la sección 4 presenta las conclusiones.

2. MODELO Y DISTRIBUCIÓN DE FLUJOS DE POTENCIA EN UNA LOCOMOTORA DUAL

La locomotora híbrida puede ser impulsada por la red eléctrica a través de un pantógrafo y/o usando un sistema a bordo de pila a combustible, baterías y supercondensadores (SC). Las fuentes están conectadas a un bus DC a través de convertidores de potencia. La figura 1 presenta el esquemático de la locomotora dual.

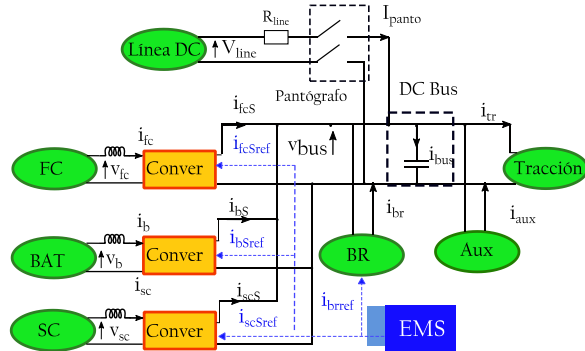


Fig1. Esquemático de la locomotora híbrida

La distribución de flujos de potencia propuesta define la corriente de referencia para el sistema de

pila de combustible $i_{fcs}(t)$, el sistema de baterías $i_{bs}(t)$ y el sistema de supercondensadores $i_{scs}(t)$ y la resistencia de frenado $i_{br}(t)$. La corriente suministrada por el pantógrafo $i_{pant}(t)$, cuando está disponible, y la corriente suministrada a por el capacitor del bus DC i_{bus} depende de la tensión en el bus DC, la cual puede ser indirectamente controlada. La corriente consumida por la tracción de la locomotora $i_{tr}(t)$ y los auxiliares $i_{aux}(t)$ no se conocen a priori. La distribución de corriente entre las fuentes y cargas al nivel del bus DC, cumple la ecuación de balance definida en la ecuación 1.

$$i_{tr}(t) + i_{aux}(t) + i_{bus}(t) - i_{pant}(t) = i_{fcs}(t) + i_{bs}(t) + i_{scs}(t) + i_{br}(t) \quad (1)$$

2.1. Restricciones

Las soluciones deben respetar las restricciones en la potencia, corriente, tensiones y SOC de las fuentes. Las referencias de la EMS se dan al nivel del bus DC, después de los convertidores de potencia, pero la mayoría de las restricciones están dadas al nivel de las fuentes, antes de los convertidores de potencia. Estas restricciones están definidas por la tensión y la corriente los terminales de la pila a combustible $i_{fc}(t)$, $v_{fc}(t)$, las baterías $i_b(t)$, $v_b(t)$ y los supercondensadores $i_{sc}(t)$, $v_{sc}(t)$. Los estados de carga SOC de las baterías y los supercondensadores SOC_b , SOC_{sc} también presentan restricciones. Adicionalmente las restricciones de potencia suministrada están dadas para los convertidores de potencia $p_{scs}(t)$, $p_{bs}(t)$ y $p_{br}(t)$.

A continuación, se presentan las restricciones para una fuente genérica k y su convertidor de potencia ks

$$V_{kmin} < v_k(t) < V_{kmax} \quad (2)$$

$$SOC_{kmin} < SOC_k(t) < SOC_{kmax} \quad (3)$$

$$I_{kmin} < i_k(t) < I_{kmax} \quad (4)$$

$$\frac{di_k}{dt}_{min} < \frac{di_k}{dt}(t) < \frac{di_k}{dt}_{max} \quad (5)$$

$$P_{ksmin} < p_{ks}(t) < P_{ksmax} \quad (6)$$

2.2. La función objetivo

Las soluciones que cumplen con las restricciones son evaluadas y comparadas empleando una función objetivo ϵ_{tot} compuesta de seis funciones de costo para minimizar el consumo de hidrógeno ϵ_{f_2} , la degradación de la pila de combustible ϵ_{fc} , la degradación de los supercondensadores ϵ_{sc} , la degradación de las baterías ϵ_b , la electricidad

consumida de la red ϵ_{net} y el costo de recarga de los SC y baterías después del ciclo ϵ_{sust} (Lhomme et al. 2019).

$$\epsilon_{tot} = \epsilon_{H_2} + \epsilon_{fc} + \epsilon_{sc} + \epsilon_b + \epsilon_{net} + \epsilon_{sust} \quad (7)$$

2.3. Solución

Se implementa una EMS global basada en reglas considerando las características y restricciones de cada fuente de energía. La pila a combustible es la fuente primaria de energía embebida en la locomotora dual. Junto al pantógrafo, cuando está disponible, deben suministrar la energía total consumida por el sistema de tracción. Sin embargo, durante el frenado, la corriente de la pila se reduce para limitar la energía disipada en la resistencia de frenado. El pantógrafo es una fuente interesante en términos de potencia y energía, pero la EMS tiene que considerar su disponibilidad intermitente (EMS modo-dual). Las baterías se caracterizan por un buen compromiso entre potencia y energía, se puede emplear para proveer energía a la carga y durante el frenado regenerativo. Los SC, como la principal fuente de potencia de la locomotora, son empleados para equilibrar la corriente de balance definida en la ecuación 1.

Las pautas tenidas en cuenta para definir las reglas de la EMS se mencionan a continuación.

- La FC y el pantógrafo recargan las baterías.
- Las baterías regulan el SOC de los SC.
- Los SC regulan la tensión del bus DC.
- Evitar usar la resistencia de frenador.

Comparada con la EMS previa presentada en (Mendoza et al. 2019) esta estrategia se orienta en reducir la energía consumida en la resistencia de frenado. Se emplean dos conjuntos de reglas para alcanzar este objetivo. El primero rápidamente reduce la salida de potencia de la pila de combustible cuando se detecta el frenado. El segundo conjunto de reglas permite emplear el capacitor del bus DC para almacenar parte de la energía de frenado.

2.3.1. EMS para la pila de combustible

La degradación de la pila se acelera cuando se enciende y se apaga la pila una y otra vez. En operación normal el único objetivo de la FC es regular el SOC de las baterías. La referencia para su corriente $i_{fcS_{ref}}$ incrementará con la reducción del SOC medido de las baterías SOC_b , comparado con una referencia estática SOC_{b-ref} . En este caso esta referencia es constante y es considerada un parámetro de optimización. Este controlador define la corriente de la pila de combustible $i_{fcS_{ref}}$ mediante un controlador proporcional con

ganancia K_{fc} . Se considera un segundo modo de operación cuando la aceleración a_{loco} cae por debajo de un valor predeterminado a_{min} (frenado rápido). En este modo de operación, el frenado regenerativo se activa y las baterías y SC esperan operar a la máxima corriente de recarga. Para reducir, la disipación de energía en la resistencia de frenado, la referencia de corriente de la pila de combustible se reduce rápidamente a un valor bajo. Para evitar apagar la pila de combustible, debido al alto costo de degradación, la corriente de referencia se limita por un límite inferior positivo.

2.3.2. EMS para las baterías

Las baterías recargan los supercondensadores, para que estos operen como principal fuente de potencia. La corriente de referencia $i_{b_{ref}}$ incrementa si el SOC del SC medido, SOC_{sc} , decrece comparado con la referencia dinámica $SOC_{sc_{ref}}$. Este se realiza mediante un control proporcional de ganancia K_b . La referencia para el SOC de SC $SOC_{sc_{ref}}$ depende de la velocidad del tren: para una velocidad máxima, los SC son descargados hasta un SOC mínimo $SOC_{sc_{velmax}}$, esto permite dejar suficiente espacio para almacenar energía en el frenado regenerativo. Cuando la locomotora se detiene los SC se recargan a un SOC máximo $SOC_{sc_{vel0}}$ y esto deja disponible suficiente energía en el SC para apoyar la aceleración del tren.

2.3.3. EMS para los supercondensadores.

El sistema de los SC balancea las corrientes consumidas por la locomotora y las provistas por la pila de combustible y las baterías. Adicionalmente, el sistema de los SC regula la tensión en el bus DC, suministrando una corriente i_{bus} . Esta EMS solamente emplea corrientes como entradas.

2.3.4. EMS para el bus DC

El nivel de tensión del bus DC depende de la energía entregada al/por el capacitor del bus DC. Se puede suministrar una corriente $i_{bus}(t)$ al/por el capacitor para controlar el nivel de tensión del bus DC. Se emplea un controlador proporcional para determinar el valor $i_{bus}(t)$. Si el pantógrafo está disponible: Si las baterías están cargadas, la tensión de bus DC de referencia será ajustada al mismo valor de la tensión del pantógrafo V_{line} . Cuando las baterías están descargadas y su SOC llegan a un valor menor de un límite determinado $SOC_{b_{low}}$, se impone una tensión de referencia de valor menor a la tensión del pantógrafo. Si el pantógrafo no está disponible: el capacitor puede

almacenar una cantidad limitada de energía durante el frenado fuerte. Cuando el tren se encuentra en su operación normal la tensión de referencia es de un valor bajo, y en modo frenado regenerativo, esta tensión aumenta a un valor alto.

3. RESULTADOS

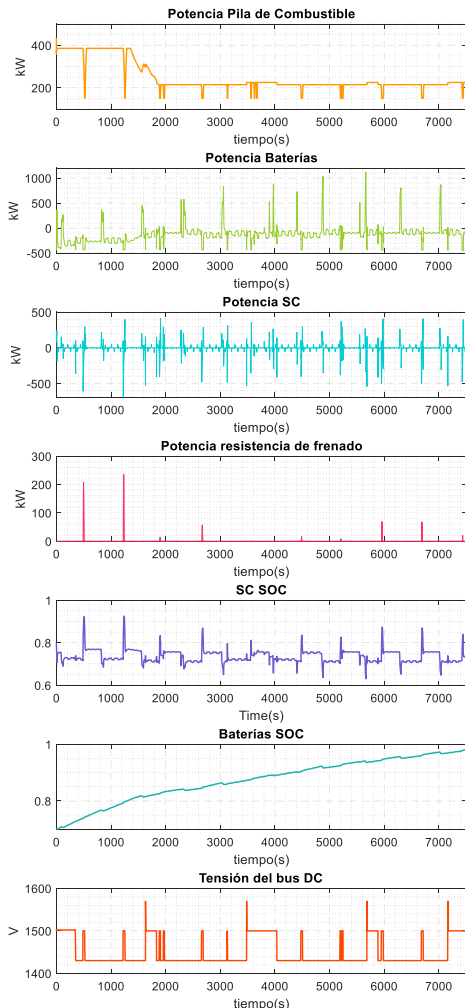


Fig 2. Distribución de potencia, estrategia UIS+ Perfil de prueba 2019

Tabla 1: Resultados de comparación entre estrategias

| Perfil velocidad | Bat [€] | FC [€] | H2 [€] | Net [€] | SC [€] | Sus [€] | Tot [€] | E br [kWh] |
|------------------|---------|--------|--------|---------|--------|---------|---------|------------|
| Baja | | | | | | | | |
| UIS+ | 1.84 | 4.28 | 0.07 | 0.12 | 0.62 | -5.83 | 1.10 | 0.00 |
| UIS | 1.66 | 4.27 | 0.09 | 0.00 | 0.62 | -5.20 | 1.43 | 0.00 |
| Media | | | | | | | | |
| UIS+ | 1.64 | 4.31 | 0.06 | 0.09 | 0.62 | -3.10 | 3.63 | 1.35 |
| UIS | 1.66 | 4.27 | 0.09 | 0.00 | 0.62 | -2.59 | 4.05 | 3.19 |
| Alta | | | | | | | | |
| UIS+ | 2.86 | 4.32 | 0.06 | 0.11 | 0.62 | 4.47 | 12.44 | 1.49 |
| UIS | 3.33 | 4.27 | 0.09 | 0.00 | 0.62 | 4.83 | 13.13 | 3.19 |
| Prueba 2019 | | | | | | | | |
| UIS+ | 6.26 | 6.69 | 0.25 | 0.22 | 3.90 | -16.75 | 0.57 | 2.21 |
| UIS | 5.50 | 7.41 | 0.27 | 0.00 | 3.90 | -11.06 | 6.03 | 3.08 |

Después de realizada la implementación de las reglas propuestas en la sección anterior, la distribución de flujos de potencia para el perfil de evaluación empleado al desafío de vehículos de motor IEEE VTS 2019 se presentan en la figura 2. La tabla 1 resume la comparación de resultados entre la estrategia mejorada (UIS+) y la estrategia ganadora en la competencia versión 2019 (UIS).

5. CONCLUSIONES

Se propone una estrategia de distribución de flujos de potencia para una locomotora dual, equipada con pila de combustible, supercondensadores, baterías y acceso intermitente a la red eléctrica. La estrategia se enfoca en reducir la función costo del problema y también en reducir la potencia disipada en la resistencia de frenado.

La comparación de resultados entre la mejor solución presentada al desafío de vehículos de motor IEEE VTS 2019 y la estrategia propuesta por este trabajo, presenta reducciones de hasta 57.68 % de la energía disipada en la resistencia de frenado para los perfiles de velocidad evaluados.

REFERENCIAS

- Allègre, Anne Laure et al. 2010. "Energy Storage System with Supercapacitor for an Innovative Subway." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 57(12): 4001–12.
- Ciccarelli, Flavio, Diego Iannuzzi, Davide Lauria, and Pasquale Natale. 2017. "Optimal Control of Stationary Lithium-Ion Capacitor-Based Storage Device for Light Electrical Transportation Network." *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 3(3): 618–31.
- González-Gil, A, R Palacin, P Batty, and J P Powell. 2014. "A Systems Approach to Reduce Urban Rail Energy Consumption." *Energy Conversion and Management* 80: 509–24.
- Lhomme, Walter et al. 2019. "IEEE VTS Motor Vehicles Challenge 2019 – Energy Management of a Dual-Mode Locomotive." *2018 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2018 - Proceedings*.
- Mendoza, Diana Sofia, Pedro Acevedo, Juan Sebastian Jaimes, and Javier Solano. 2019. "Energy Management of a Dual-Mode Locomotive Based on the Energy Sources Characteristics." *2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2019 - Proceedings: 2–5*.