

규칙기반 알고리즘을 이용한 수소연료전지/ 배터리 하이브리드 철도차량 모델링

Modeling of Hybrid Railway Vehicles with Hydrogen Fuel-Cell/Battery using a Rule-Based Algorithm

오 윤 기*, 한 별*, 오 용 국**, 류 준 형**, 이 교 범*

Yoon-Gi Oh*, Byeol Han*, Yong-Kuk Oh**, Joon-Hyoung Ryu**, Kyo-Beum Lee*

Abstract

This paper presents the modeling of hybrid railway vehicles with hydrogen Fuel-Cells (FCs)/battery using a rule-based algorithm. The driving power of traction system is determined with the speed-torque curve by operation area of the electric machine and the electrical systems are modeled. The demanded power of electrical systems is set with the energy management system (EMS). The consumption of hydrogen is effectively managed with the subdivided operation region depending on the state of charge (SOC). The validity of the modeling is verified using MATLAB/Simulink.

요 약

본 논문에서는 규칙기반 알고리즘을 이용한 수소연료전지/배터리 하이브리드 철도차량 모델링을 제시한다. 모터의 운전 영역에 따른 토크 곡선을 계산하여 견인 시스템의 구동 전력을 결정하고 철도차량의 각 운전 모드에 적용하여 전기 시스템을 모델링 한다. 전기 시스템의 전력은 규칙기반 알고리즘을 이용한 에너지 관리시스템(Energy Management System, EMS)으로 결정한다. 배터리의 충전상태(State Of Charge, SOC)에 따라 운전 영역을 세분화하여 수소 소비량을 효율적으로 관리한다. 제안하는 철도차량 모델링의 타당성은 MATLAB/Simulink 시뮬레이션을 통해 검증한다.

Key words : Fuel-cells, Battery, Hybrid railway vehicle, Energy management system, Rule-based

* Dept. of Electrical and Computer Engineering, Ajou University

** Korea Railroad Research Institute

★ Corresponding author

E-mail : kyl@ajou.ac.kr, Tel : +82-31-219-2376

※ Acknowledgment

This research was supported by a grant(20RTRP-B146008-03) from Railroad Technology Research Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government.

Manuscript received Jun. 8, 2020; revised Jun. 14, 2020; accepted Jun. 17, 2020.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

세계적으로 에너지 수요량은 점차 증가하지만, 에너지원 중 친환경 에너지원의 비율이 적고 여전히 화석연료의 사용량은 높은 상황이다. 이는 환경적인 문제를 초래하므로 친환경 에너지원 개발, 이산화탄소 배출량 제한 및 미세먼지 저감 대책과 같은 친환경 규제를 통해 화석연료의 소비를 줄이려는 노력이 계속되고 있다[1-6].

디젤/배터리 하이브리드 철도차량은 이러한 세계적인 추세에 맞추어 도입된 친환경 철도차량으로 감속 시 회생 제동으로 발전된 에너지를 배터리에 저장하여 디젤의 사용량을 감소시킨다. 디젤/배터리 하이브리드 철도차량의 주요 에너지원은 여전

히 디젤이므로 환경 오염 및 화석연료 사용의 근본적인 문제를 해결하지 못한다[7].

수소연료는 많은 친환경 에너지원 중에 무게가 가볍고 소음이 적으며 에너지 밀도가 높은 장점이 있어 철도차량의 차세대 친환경 에너지원으로 주목받고 있다. 그러나 수소연료전지는 느린 응답특성을 갖기 때문에 이를 보상하기 위해 배터리를 병렬로 연결한 수소연료전지/배터리 하이브리드 철도차량에 대한 연구가 활발히 진행되었다[8-10]. 최근 독일 연방 철도 기관인 Federal Railway Authority는 Alstom 社가 개발한 수소연료전지 철도차량의 독일 내 상업 운전을 최종 승인했으며, 미국은 Stadler 社와 San Bernardino County Transportation Authority (SBCTA)는 수소연료전지 철도차량을 공급하기 위한 계약을 체결하였다[11-12].

수소연료전지/배터리 하이브리드 철도차량은 수소연료전지, 승압형 DC/DC 컨버터, 배터리, 그리고 견인 시스템 및 보조전원장치로 구성된다. 승압형 DC/DC 컨버터는 수소연료전지의 출력 전압을 견인 시스템의 정격 입력 전압으로 승압하고, 배터리와 병렬로 연결하여 견인 시스템, 보조전원장치에 전원을 공급한다. 수소연료전지/배터리 하이브리드 철도차량은 차량 감속 시 회생 제동으로 발생한 에너지를 배터리에 저장하므로 수소연료전지의 수소 소비량을 감소시킬 수 있다[7].

에너지 관리시스템(Energy Management System, EMS)은 수소연료전지를 효율적으로 관리하는 시스템으로 배터리의 충전상태(State Of Charge, SOC)와 주행상태에 따라 수소연료전지 및 승압형 DC/DC 컨버터의 지령 전류를 결정하여 배터리의 충전전량을 제어한다. 이러한 EMS의 알고리즘을 위해서 규칙기반(Rule-based), Dynamic Programming (DP) 등의 연구가 수행되었다[13]. DP 기법 기반 EMS는 전역 최적화, 비선형 제한조건에 대응이 가능하다. 하지만, 연산시간이 길고 주행조건을 주행 시작 전에 미리 알고 있어야 제어가 가능하므로 실시간 제어가 불가능하다[14-15]. 규칙기반 EMS는 구조가 간단하여 연산시간이 짧고, 온라인 및 오프라인 제어가 용이하므로 여러 응용 분야에서 연구 및 상용화가 활발히 진행 중이다[16].

본 논문에서는 규칙기반 EMS 알고리즘을 이용한 수소연료전지/배터리 하이브리드 철도차량 모델링을 제시한다. 모터의 운전 영역을 정토크, 정출

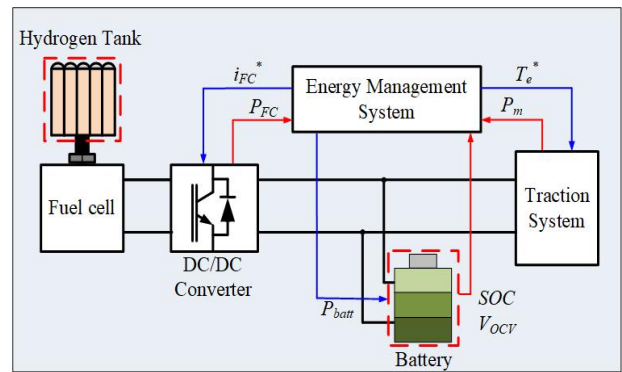


Fig. 1. Hybrid Railway Vehicles with Hydrogen Fuel-Cells/Battery.

그림 1. 수소연료전지/배터리 하이브리드 철도차량 블록도

력 영역으로 구분하고 토크 곡선을 계산하여 견인 시스템의 구동 전력을 계산한다. 수소연료전지를 효율적으로 사용하기 위해 배터리 SOC에 따라 제한조건을 세분화하여 배터리 충전전량을 제한하는 규칙기반 알고리즘을 제시한다. 제안하는 철도차량 모델링의 타당성은 MATLAB/Simulink 시뮬레이션을 통해 검증한다.

II. 수소연료전지/배터리 하이브리드 철도차량 모델링

1. 수소연료전지/배터리 하이브리드 철도차량

그림 1은 수소연료전지/배터리 하이브리드 철도차량을 나타낸다. 해당 차량은 수소연료탱크, 수소연료전지, 승압형 DC/DC 컨버터, 배터리, 견인 시스템 및 보조전원장치, 에너지 관리시스템으로 구성된다. 보조전원장치는 냉난방, 조명 등 차량 내부 전기 시스템에 전력을 공급하는 장치로 본 논문에서는 일정한 전력을 공급한다고 가정하고 생략한다. 수소연료전지는 수소를 전기분해하여 화학적 에너지를 전기적 에너지로 변환하여 철도차량에 전력을 공급한다. 승압형 DC/DC 컨버터는 수소연료전지의 출력 전압을 승압하여 견인 시스템에 전력을 공급하는 역할을 한다. 배터리는 수소연료전지의 수소 소비량을 감소시키고 수소연료전지의 느린 응답특성을 보상하기 위해 승압형 DC/DC 컨버터와 병렬로 연결한다[8].

2. 견인 시스템 모델링

견인 시스템은 인버터 및 모터로 구성하며, 수소연료전지/배터리 하이브리드 철도차량의 모터는 매입형

영구자석 동기 전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)를 사용한다. IPMSM은 유도 전동기보다 효율이 좋고 구조적으로 고속 운전에 유리하여 철도차량 분야에 적합하다[1].

IPMSM의 구동은 크게 일정 토크 영역, 일정 출력 영역으로 나뉜다. 일정 토크 영역과 일정 출력 영역은 기저 속도(base speed)를 기준으로 구분한다. 일정 토크 영역은 기저 속도 이하의 영역이고 IPMSM의 속도가 기저 속도 이상의 속도가 되면 일정 출력 영역에 진입한다[17].

가. 일정 토크 영역

일정 토크 영역에서는 IPMSM의 출력을 최대 발생시키는 단위 전류당 최대 토크 제어(Maximum Torque Per Ampere, MTPA) 운전을 한다. IPMSM의 토크는 식 (1)과 같이 나타내며, IPMSM의 q 축 인덕턴스가 d 축 인덕턴스보다 크고 음(-)의 전류를 인가하는 경우, 필러턴스 토크 성분으로 인해 더 큰 출력 토크를 얻을 수 있다[18].

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} [\phi_f I_q + (L_d - L_q) I_d I_q] \quad (1)$$

여기서, I_{dq} , L_{dq} 는 각각 d - q 축 전류, 인덕턴스, T_e , P , ϕ_f 는 각각 IPMSM의 토크, 극수, 영구자석의 쇄교 자속을 나타낸다.

MTPA 운전을 위한 최적의 d - q 축 전류 각 β_{opt} 는 식 (2)로 나타낼 수 있다. 식 (2)에 의해 MTPA 운전을 위한 d - q 축 전류는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다[18].

$$\beta_{opt} = \cos^{-1} \left(\frac{-\phi_f + \sqrt{\phi_f^2 + 8(L_d - L_q)^2 I_s^2}}{4(L_d - L_q) I_s} \right) \quad (2)$$

$$I_d^* = I_s \cos \beta_{opt}, \quad I_q^* = I_s \sin \beta_{opt} \quad (3)$$

여기서, I_s 는 IPMSM의 고정자 전류 크기를 나타낸다.

나. 일정 출력 영역

IPMSM의 회전 속도가 기저 속도에 도달하면, 인버터 출력 전압의 한계로 IPMSM의 고정자 전압을 증가시키지 못한다. 따라서, IPMSM의 속도를 증가시키기 위해서는 공극의 유효 자속 크기를 감소시키는 약자속 제어를 수행해야 하며 이를 일정

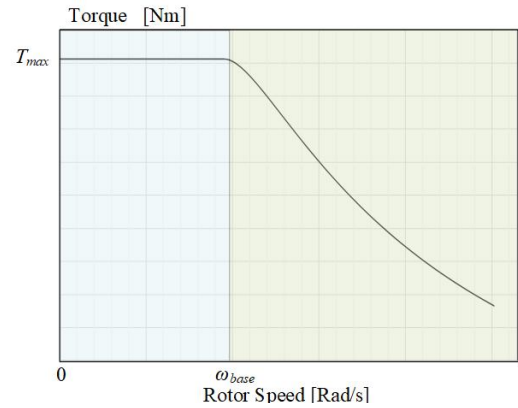


Fig. 2. Curve of Speed-Torque.

그림 2. 속도-토크 곡선

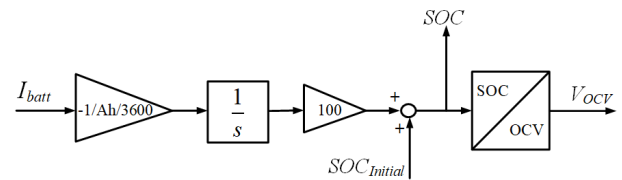


Fig. 3. Block diagram of Battery.

그림 3. 배터리 블록도

출력 영역이라고 한다.

기저 속도 ω_{base} 는 고정자 전압의 최대 값 V_{smax} 과 회전자 각속도 ω_r 을 이용하여 식 (4)와 같이 나타내며, 고속 영역에서 토크를 최대 발생시키기 위해 d 축 전류를 음(-)의 방향으로 인가한다. 일정 출력 영역에서는 고정자 전압의 크기와 전류의 크기는 일정하게 유지되며 d - q 축 전류는 식 (5)와 같다[1].

$$\omega_{base} = \frac{V_{smax}}{\sqrt{(L_d I_d + \phi_f)^2 + (L_q I_q)^2}} \quad (4)$$

$$I_d^* = \frac{e_1 - \sqrt{e_1^2 + e_2 \phi_f^2 + e_3 - (V_{smax}/\omega_r)^2}}{e_2}$$

$$I_q^* = \sqrt{I_{smax}^2 - I_d^{*2}} \quad (5)$$

$$\begin{cases} e_1 = L_d \phi_f \\ e_2 = L_q^2 - L_d^2 \\ e_3 = (L_q I_{smax})^2 \end{cases}$$

그림 2는 식 (3), (5)를 이용하여 나타낸 전속도 영역의 속도-토크 곡선이다. 견인 시스템의 출력 전력은 토크와 기계적 각속도로 표현하며 식 (6)으로 나타낸다.

$$P_m = T_e \times \omega_m \quad (6)$$

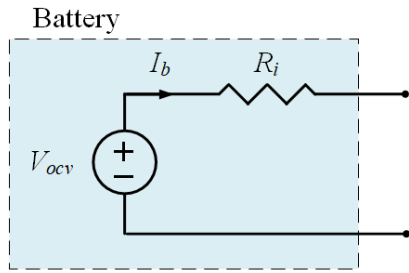


Fig. 4. Equivalent model of Battery.
그림 4. 배터리 등가 모델

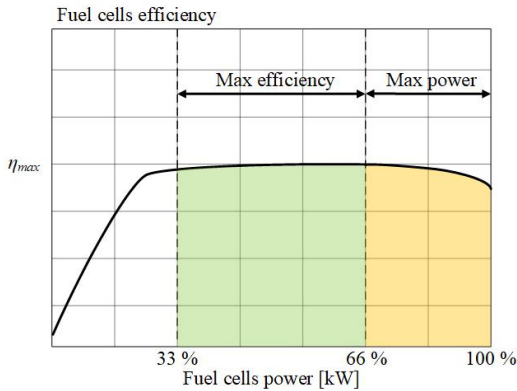


Fig. 5. Power-efficiency curve of Fuel-cells.
그림 5. 연료전지의 전력-효율 곡선

여기서, P_m , ω_m 은 각각 전인 시스템의 출력 전력, 기계적 각속도를 나타낸다.

3. 배터리 모델링

그림 3은 배터리 SOC를 이용한 배터리 개방회로 전압(Open Circuit Voltage, OCV) 추정 블록도를 나타낸다. 해당 철도차량의 배터리는 리튬-이온 2차전지로서 선정하며, SOC에 따라 OCV가 변동하기 때문에 SOC를 올바르게 추정할 필요가 있다. SOC를 추정하는 방법에는 Kalman Filter(KF), Extended Kalman Filter(EKF), Ampere-hour 방법 등이 있다 [19]. 그 중에서 Ampere-hour 적분은 배터리 전류와 전하량을 적분하여 SOC를 추정하므로 계산이 간단하다.

Ampere-hour 적분으로 추정한 배터리 SOC는 식 (7)로 나타낸다.

$$\begin{aligned} \dot{SOC} &= -I_b/Q \\ I_b &= \frac{V_{OCV} - \sqrt{V_{OCV}^2 - 4R_i P_{batt}}}{2R_i} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, \dot{SOC} 는 배터리 SOC의 변화량, I_b 는 배터

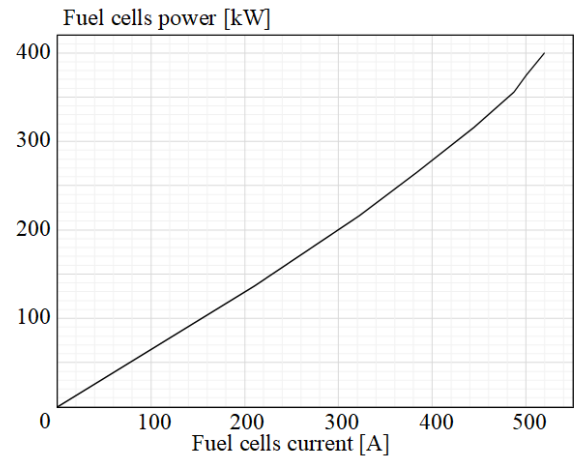


Fig. 6. Current-Power curve of Fuel-cells.
그림 6. 연료전지의 전류-전력 곡선

리 전류, Q , R_i , P_{batt} , V_{OCV} 는 각각 배터리 용량, 배터리 내부 저항, 배터리 출력 전력, 배터리 개방회로 전압이다.

SOC로 추정한 배터리 OCV와 배터리 효율 η_b 를 이용하여 배터리의 전력 P_{batt} 를 식 (8)로 나타내며, 그림 4는 배터리 등가 모델을 나타낸다.

$$P_{batt} = I_b \times V_{OCV} \times \eta_b \quad (8)$$

4. 수소연료전지 모델링

수소연료전지 시스템은 수소연료전지, 수소연료탱크로 구성하며, 수소의 화학에너지를 전기에너지로 변환하여 철도차량에 에너지를 공급한다. 그림 5는 수소연료전지의 전력-효율 곡선이다[15]. 수소연료전지는 전극의 표면 저항으로 인한 손실, 화학반응에 따른 전압손실, 반응 속도의 차이에 따른 농도손실이 있다. 본 논문에서는 위 손실을 항상 일정하다고 가정하여 수소연료전지가 그림 4의 최대 효율영역에서 동작할 수 있도록 모델링 한다. 그림 6은 수소연료전지를 간략화한 전류-전력 곡선이다. 이때 수소연료전지의 출력 전력은 식 (9)와 같이 나타낸다.

$$P_{FC} = I_{FC} \times V_{FC} \quad (9)$$

5. 승압형 DC/DC 컨버터 모델링

수소연료전지/배터리 하이브리드 철도차량의 승압형 DC/DC 컨버터는 제한된 공간을 갖는 철도차량에 적용하기 위해 그림 7과 같이 단방향 승압형 DC/DC 컨버터로 설정한다. 또한, 철도차량의 에너

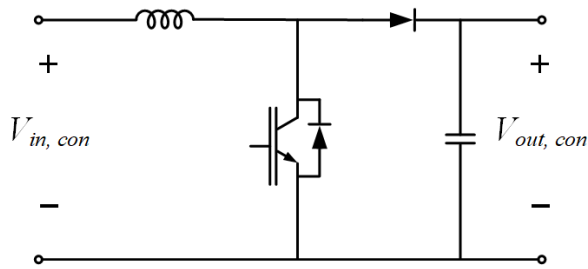


Fig. 7. Boost DC/DC converter.
그림 7. 승압형 DC/DC 컨버터

지원인 수소연료전지에서 전력을 입력받아 차량 전기 시스템에 전력을 전달하는 단방향 구조를 갖는다.

승압형 DC/DC 컨버터의 입력전압 $V_{in,con}$ 과 승압형 DC/DC 컨버터 출력전압 $V_{out,con}$ 의 관계는 식 (10)과 같고, 승압형 DC/DC 컨버터의 효율이 η_c 라면, 입력 전력 P_{in} 과 승압형 DC/DC 컨버터 출력 전력 P_{out} 의 관계는 식 (11)과 같다.

$$\frac{V_{out,con}}{V_{in,con}} = \frac{1}{1-D} \quad (10)$$

$$P_{out} = \eta_c \times P_{in} \quad (11)$$

여기서, D 는 듀티비이다.

III. 에너지 관리시스템

1. 규칙기반 에너지 관리시스템

규칙기반 EMS의 목적은 수소 소비량을 효율적으로 관리하는 것으로 운전 영역과 배터리의 SOC에 따라 연료전지의 지령 전류로 수소연료전지 및 배터리의 사용 전력량을 결정한다[13]. 수소 소비량을 최소화하기 위한 제한조건은 차량 전기 시스템의 전력 흐름과 배터리의 SOC로 설정한다. 식 (12)는 등식 제한조건으로 수소연료전지, 승압형 DC/DC 컨버터, 견인 시스템, 배터리의 전력 흐름을 나타낸다.

$$P_m = P_{FC} + P_{batt} \quad (12)$$

여기서, P_m , P_{FC} , P_{batt} 는 각각 모터의 구동 전력, 수소연료전지의 출력 전력, 배터리의 출력 전력을 나타낸다.

배터리 수명은 배터리 SOC와 밀접한 관계가 있으므로 EMS에서 배터리 SOC의 제한조건을 설정하여 배터리 SOC의 변동량을 최소화한다. 배터리

의 제한조건은 부등식 제한조건을 이용하여 식 (13)으로 나타내며, EMS에서 배터리의 제한조건을 만족하도록 배터리의 충방전량을 결정한다.

$$SOC_{min} < SOC < SOC_{max} \quad (13)$$

철도차량의 운전 모드는 크게 3가지로 견인 운전 모드, 타행 운전 모드, 회생제동 운전 모드로 구분하고 수소연료전지/배터리 하이브리드 철도차량은 운전 모드에 따라 전력 흐름이 달라진다. 식 (14)는 견인 시스템, 수소연료전지, 배터리의 부등식 제한조건을 나타낸다.

$$\begin{aligned} P_{m\ min} &\leq P_m \leq P_{m\ max} \\ 0 &\leq P_{FC} \leq P_{FC\ max} \\ P_{batt\ min} &\leq P_{batt} \leq P_{batt\ max} \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, $P_{m\ min}$ 은 모터 출력의 최소 전력, $P_{m\ max}$ 는 모터 출력의 최대 전력이고, $P_{FC\ max}$ 는 수소연료전지의 최대 출력 전력, $P_{batt\ min}$ 과 $P_{batt\ max}$ 는 각각 배터리의 최소 출력 전력, 최대 출력 전력이다.

운전 영역에 따른 수소연료전지/배터리 하이브리드 철도차량의 전력 흐름은 다음과 같이 정리할 수 있다.

가. 견인 운전 모드

견인 운전 모드는 철도차량을 가속하는 운전 모드로 구동 전력 P_m 의 부호는 (+)이며, 수소연료전지 및 배터리에서 모터로 전력을 공급한다. 이때 배터리 SOC가 식 (13)의 제한조건 내에 있는 경우, 배터리는 항상 방전한다. 견인 운전 시 구동 전력의 관계식은 식 (12)과 같다.

나. 타행 운전 모드

타행 운전 모드는 철도차량이 관성으로 운전하는 것을 의미하며, 가속과 감속을 하지 않으므로 견인 시스템의 구동 전력은 0 kW이다.

다. 회생제동 운전 모드

회생제동 운전 모드는 철도차량을 감속하는 운전 모드로 구동 모터의 회전 방향과 반대 방향의 토크를 인가하여 모터를 제동한다. 이때, 구동 모터의 출력 전력은 음(-)으로 나타나며, 견인 시스템에서 발생한 회생 전력이 배터리를 충전한다.

IV. 시뮬레이션 결과

표 1은 철도차량의 파라미터를 나타내며 수소철도차량/배터리 하이브리드 철도차량은 2량 1편성으로 구성한다[7]. 본 논문에서는 수소연료전지와 배터리의 전력량을 에너지 관리시스템으로 분배하므로 견인 시스템 1대를 기준으로 철도차량 중량을 1/4로 축소하여 시뮬레이션을 진행한다.

Table 1. Railway vehicle parameters.

표 1. 철도차량 파라미터

Parameters	Value
Weight [ton]	30
Gear ratio	4.95
Wheel radius [m]	0.41

Table 2. Electrical systems parameters.

표 2. 차량 전기 시스템 파라미터

Parameters	Value
1. Traction motor	
Rated power [kW]	331.7
Maximum torque [Nm]	1521.97
Base speed [rpm]	2081
Pole	6
2. Hydrogen Fuel-cells and Battery	
Fuel-cells Rated power [kW]	400
Fuel-cells nominal voltage [V]	720
Battery overall energy [kWh]	186
Battery nominal voltage [V]	1550
3. Efficiency of electrical systems	
Inverter efficiency [%]	98
Traction motor efficiency [%]	96
Gear efficiency [%]	92
DC/DC Converter efficiency [%]	96
Fuel-Cells efficiency [%]	50

표 2는 해당 철도차량의 구동 모터, 수소연료전지 및 배터리, 전기 시스템의 효율을 나타낸다. 구동 모터는 330 kW급 IPMSM을 사용하였고 기저속도는 2081 rpm이다. 수소연료전지의 정격 전력은 500 kW로 선정하였고, 운행 한 주기에서 배터리의 총방전량을 고려하여 배터리 용량은 186 kWh로 선정하였다.

그림 8은 배터리 SOC에 따른 배터리 OCV를 나타낸다. 본 논문에서는 배터리의 평균 전압을 1550 V로 설정하기 위해 제한조건인 배터리 SOC의 최

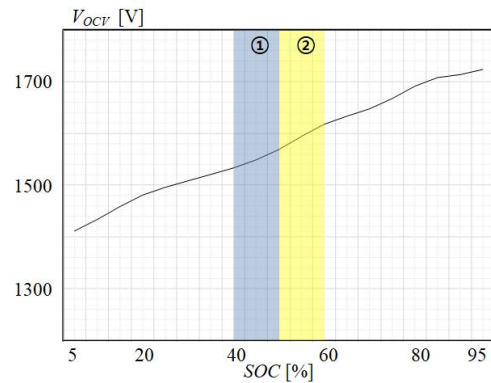


Fig. 8. SOC-OCV operation area of Battery.

그림 8. 배터리 SOC-OCV 운전 영역

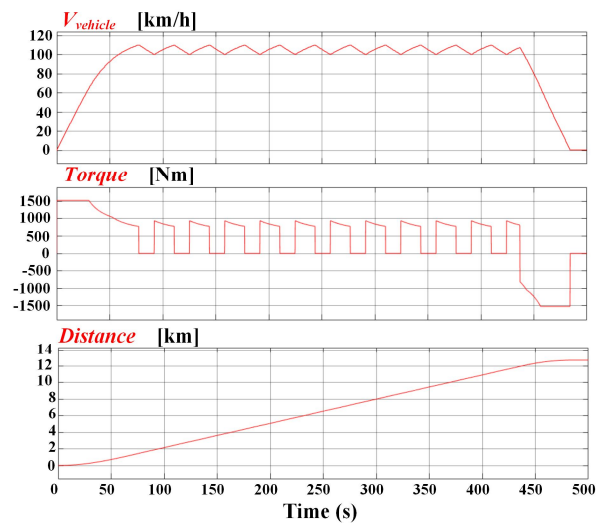


Fig. 9. Simulation result about driving profile, torque and distance.

그림 9. 주행 프로파일, 토크 및 이동 거리 시뮬레이션 결과

소 값과 최대 값을 각각 40 %, 60 %로 설정하였다. 본 논문에서는 효율적인 에너지 관리를 위해 SOC에 따라 제한조건을 2가지 영역으로 세분화한다. 첫 번째 영역은 40 % < SOC < 50 %이고, 두 번째 영역은 50 % < SOC < 60 %이다. 첫 번째 영역에서 철도차량 가속 시 배터리의 최대 방전량을 45 kW로 제한하여 배터리 SOC가 40 % 이하로 감소하는 것을 방지한다. 두 번째 영역에서는 철도차량 가속 시 최대 방전량을 90 kW로 설정하여 수소 소비량을 절감한다.

그림 9는 운행 한 주기의 주행 프로파일, 주행 거리와 모터의 출력 토크를 나타낸다. 철도차량이 정지상태에서 시속 110 km/h까지는 견인 운전 모드이며, 시속 110 km/h에서 타행 운전 모드로 진입한다. 철도차량이 관성에 의해 시속 100 km/h까지 감

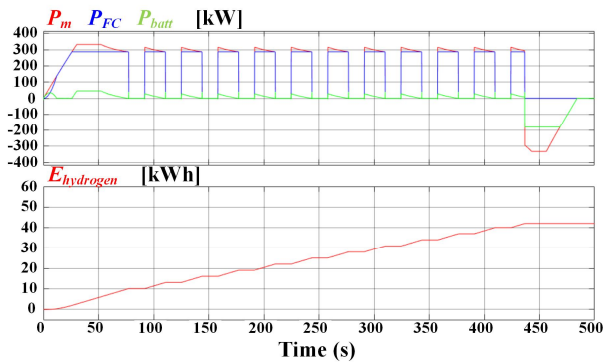


Fig. 10. Simulation result about power of electrical systems, hydrogen energy consumption at initial SOC 45%.

그림 10. 차량 전기 시스템의 출력 전력, 수소 에너지 소비량 시뮬레이션 결과(초기 SOC 조건 45%)

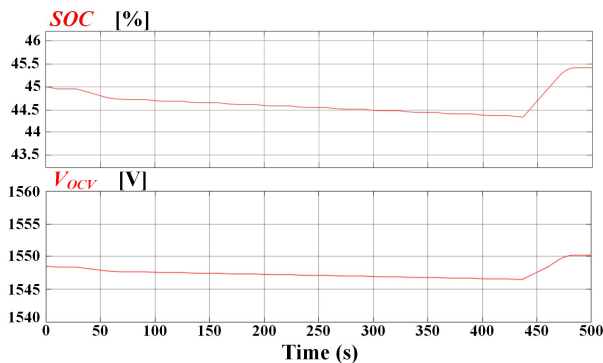


Fig. 11. Simulation result about battery SOC, OCV at initial SOC 45%.

그림 11. 배터리 SOC, OCV 시뮬레이션 결과(초기 SOC 조건 45%)

속하면, 다시 견인 운전 모드로 진입한다. 따라서, 철도차량은 견인 운전 모드와 타행 운전 모드를 반복하며 주행 프로파일에 따라 목적지 도달 직전 회생제동 운전 모드로 진입한다.

그림 10, 11은 초기 배터리 SOC 조건이 45 %인 경우의 차량 전기 시스템의 출력 전력, 수소 에너지 소비 시뮬레이션 결과를 나타낸다. EMS의 운전 영역은 1번 영역으로 배터리의 최대 방전량은 45 kW로 제한하였다. 주행 프로파일에 따라 주행 종료시의 SOC는 약 45.42 %로 나타나며, 초기 SOC 보다 약 0.42 % 증가하였다. 수소 1 kg당 전력 에너지는 연료전지의 효율 50 %를 고려하면 약 20 kWh로 나타낸다. 따라서, 초기 배터리 SOC 조건이 45 %인 경우의 수소 소비량은 약 2.1 kg이다.

그림 12, 13은 초기 배터리 SOC 조건이 55 %인 경우의 차량 전기 시스템의 출력 전력, 수소 에너지 소비 시뮬레이션 결과를 나타낸다. EMS의 운전

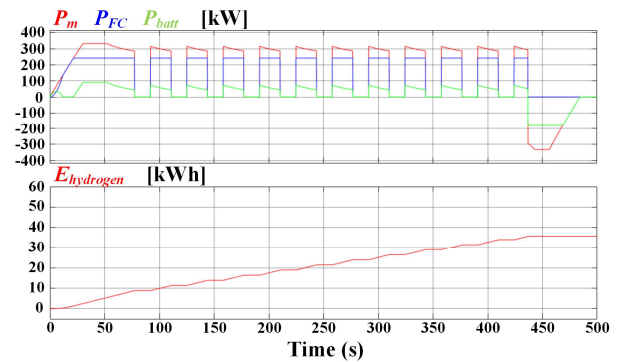


Fig. 12. Simulation result about power of electrical systems, hydrogen energy consumption at initial SOC 55%.

그림 12. 차량 전기 시스템의 출력 전력, 수소 에너지 소비량 시뮬레이션 결과(초기 SOC 조건 55%)

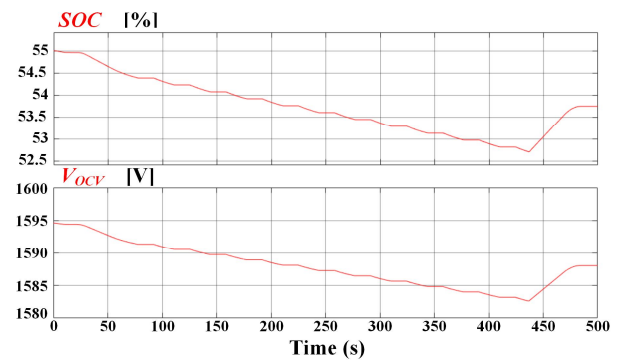


Fig. 13. Simulation result about battery SOC, OCV at initial SOC 55%.

그림 13. 배터리 SOC, OCV 시뮬레이션 결과(초기 SOC 조건 55%)

영역은 2번 영역으로 배터리의 최대 방전량은 90 kW로 제한하였다. 주행 프로파일에 따라 주행 종료시의 SOC는 약 53.74 %로 나타나며, 초기 SOC 보다 약 1.26 % 감소하였다. 따라서, 연료전지의 효율을 고려하면 초기 배터리 SOC 조건이 55 %인 경우의 수소 소비량은 약 1.8 kg이다. 따라서, 배터리 SOC에 따라 EMS의 운전 영역을 세분화하여 수소 소비량을 효율적으로 관리할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 규칙기반 알고리즘을 이용한 수소 연료전지/배터리 하이브리드 철도차량을 모델링하였다. 모터의 운전 영역에 따라 토크 곡선을 계산하여 견인 시스템의 출력 전력을 결정하였다. 또한, 규칙기반 알고리즘을 이용한 에너지 관리시스템은 철도차량의 운전 모드에 따라 제한조건을 설정하

고, 배터리 SOC에 따른 운전 영역을 세분화하였다. 이를 통해, 수소 소비량을 효율적으로 관리하는 에너지 관리시스템을 제시하였다. 제안하는 철도차량 모델링의 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

References

- [1] B. Han, J.-S Lee, Y. Bak, and K.-B. Lee, "Performance Analysis of Direct Torque Control method for Traction System based on IPMSM," *Journal of the Korean Society for Railway*, vol.23, no.1, pp.21-34, 2020.
DOI: 10.1007/s13369-020-04550-2
- [2] J.-H. Lee and K.-B. Lee, "A Dead-Beat Control for Bridgeless Inverter Systems to Reduce the Distortion of Grid Current," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics in Power Electron.*, vol.6, no.1, pp.151-164, 2018. DOI: 10.1109/JESTPE.2017.2734118
- [3] S. Cho, H.-S. Kang, K.-B. Lee, and J.-Y. Yoo, "Performance Improvement of a Grid-Connected Inverter under Distorted Grid Voltage Using a Harmonic Extractor," *Electronics*, vol.8, no.1038, pp.1-21, 2019. DOI: 10.3390/electronics8091038
- [4] C. C. Chan, A. Bouscayrol, and K. Chen, "Electric, Hybrid, and Fuel-Cell Vehicles: Architectures and Modeling," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.59, no.2, pp.589-598, 2010.
DOI: 10.1109/TVT.2009.2033605
- [5] X. Hu, N. Murgivski, L. M. Johannesson, and B. Egardt, "Optimal Dimensioning and Power Management of a Fuel Cell/Battery Hybrid Bus Via Convex Programming," *IEEE Trans. Mechatron.*, vol.20, no.1, pp.457-468, 2015.
DOI: 10.1109/TMECH.2014.2336264
- [6] W. Su, H. Eichi, W. Zeng, and M. Y. Chow, "A survey on the electrification of transportation in a smart grid environment," *IEEE Trans. Ind. Inf.*, vol.8, no.1, pp.1-10, 2012.
DOI: 10.1109/TII.2011.2172454
- [7] J.-S. Lee and J.-H. Ryu, "Hydrogen Fuel-Cell/Battery Hybrid Train," *Journal of the Korean Society for Railway*, vol.22, no.1, pp.19-26, 2019.
DOI: 10.7782/JKSR.2019.22.1.19
- [8] A. S. Abdelrahman, Y. Attia, K. Woronowicz, and M. Z. Youssef, "Hybrid fuel cell/battery rail car: A feasibility study," *IEEE Trans. Transport. Electrific.*, vol.2, no.4, pp.493-503, 2016.
DOI: 10.1109/TTE.2016.2608760
- [9] H. Yin, W. Zhou, M. Li, C. Ma, and C. Zhao, "An Adaptive Fuzzy Logic-Based Energy Management Strategy on Battery/Ultracapacitor Hybrid Electric Vehicles," *IEEE Trans. Transport. Electrific.*, vol.2, no.3, pp.300-311, 2016.
DOI: 10.1109/TTE.2016.2552721
- [10] M. H. Todorovic, L. Palma, and P. N. Enjeti, "Design of A Wide Input Range DC-DC Converter with A Robust Power Control Scheme Suitable for Fuel Cell Power Conversion," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.55, no 3, pp.1247-1255, 2008.
DOI: 10.1109/TIE.2007.911200
- [11] H. Glickenstein, "March 2019 Land Transportation News [Transportation Systems]," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol.14, no.1, pp.18-26, 2019.
DOI: 10.1109/MVT.2018.2881856
- [12] H. Glickenstein, "March 2020 Land Transportation News [Transportation Systems]," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol.15, no.1, pp.12-13, 2020.
DOI: 10.1109/mvt.2019.2959675
- [13] Y. Yan, Q. Li, W. Chen, B. Su, J. Liu, and L. Ma, "Optimal Energy Management and Control in Multimode Equivalent Energy Consumption of Fuel Cell/Supercapacitor of Hybrid Electric Tram," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.66, no.8, pp.6065-6076, 2019. DOI: 10.1109/TIE.2018.2871792
- [14] N. Kim, S. Cha, and H. Peng, "Optimal Control of Hybrid Electric Vehicles Based on Pontryagin's Minimum Principle," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol.19, no.5, pp.1279-1287, 2011.
DOI: 10.1109/TCST.2010.2061232
- [15] D. Zhou, A. Al-Durra, I. Matraji, A. Ravey, and F. Gao, "Online Energy Management Strategy of Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles: A Fractional-Order Extremum Seeking Method," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.65, no.8, pp.6787-6799, 2018.
DOI: 10.1109/TIE.2018.2803723
- [16] J. Wu, J. Ruan, N. Zhang, and P. D. Walker,

“An optimized real-time energy management strategy for the power-split hybrid electric vehicles,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol.27, no.3, pp.1194-1202, 2019. DOI: 10.1109/TCST.2018.2796551

[17] K.-B. Lee, *Advanced Power Electronics*, munundang, 2019, ISBN 979-11-5692-402-9.

[18] Y. Bak, J.-S Lee, and K.-B. Lee, “Driving Method of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Railroad Cars Using a Synchronous PWM Method,” *Journal of the Korean Society for Railway*, vol.22, no.2, pp.129-139, 2019.

[19] J. Kim and B. H. Cho, “State-of-Charge Estimation and State-Of-Health Prediction Of a Li-ion Degraded Battery Based on an EKF Combined with a per Unit System,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.60, no.9, pp.4249-4260, 2011.

DOI: 10.1109/TVT.2011.2168987

BIOGRAPHY

Yoon-Gi Oh (Member)



2020 : BS degree in Electrical Engineering, Chungbuk National University.

2020~present : MS student in Electrical and Computer Engineering, Ajou University.

Byeol Han (Member)



2015 : BS degree in Electronic System Engineering, Hanyang University ERICA.

2019~present : MS student in Electrical and Computer Engineering, Ajou University.

Yong-Kuk Oh (Member)



2005 : BS degree in Electrical and Electronic Computer Engineering, Hanyang University.

2007 : MS degree in Electrical Engineering, Hanyang University.

2010~present : Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute.

Joon-Hyoung Ryu (Member)



1997 : BS degree in Control and Instrumentation Engineering, Ajou University.

1999 : MS degree in Control and Instrumentation Engineering, Ajou University.

2005 : PhD degree in Control and Instrumentation Engineering, Ajou University.

2005~present : Principal Researcher, Korea Railroad Research Institute.

Kyo-Beum Lee (Member)



1997 : BS degree in Electrical and Electronic Engineering, Ajou University.

1999 : MS degree in Electrical and Electronic Engineering, Ajou University.

2003 : PhD degree in Electrical Engineering, Korea University.

2003~2006 : Research Associate, Institute of Energy Technology, Aalborg University.

2006~2007 : Assistant Professor, Chonbuk National University.

2007~present : Professor, Dept. of Electrical and Computer Engineering, Ajou University.