

A Study on Energy Optimization Strategy using ECMS For Hybrid Train

하이브리드 철도차량의 ECMS 기반 소비에너지 최적화 연구

Yongkuk Oh · Joonhyoung Ryu · Jaewon Kim · Hyeongcheol Lee

오용국*, ** · 류준형** · 김재원** · 이형철†

Abstract

In hybrid train it is essential for new technologies to improve energy efficiency such as power distribution between energy sources, SOC(State Of Charge) management, unlike general electric trains driven by single power through catenary lines. This paper suggests an energy management strategy for energy consumption optimization of train. A new energy optimization strategy for hydrogen electric train based on ECMS(Equivalent Consumption Management Strategy) is described using PMP(Pontryagin's Minimum Principle). The EF(Equivalent Factor) that determines the power distribution between HFC(Hydrogen Fuel Cell) and battery system is changed according to the battery SOC through PI(Proportional-Integral) control. The proposed algorithm is implemented using Matlab/Simulink and verified through co-simulation with Amesim, which includes a vehicle model.

Key Words

Hybrid train, Equivalent Consumption Minimization Strategy(ECMS), Pontryagin's Minimum Principle(PMP), Energy management strategy

1. 서론

전 세계적으로 이산화탄소 배출량을 줄이기 위한 탄소중립에 대한 인식이 높아지면서, 친환경 교통수단에 대한 관심과 요구도 커지고 있다. 자동차 분야의 경우, 유럽연합(EU)은 2035년 이후 내연기관 엔진을 장착한 자동차의 생산 및 판매를 금지하는 계획을 수립 중이다. 또한 우리나라 역시 친환경 자동차의 판매 비중을 높이기 위한 다양한 정부 정책 등을 시행하고 있어 하이브리드 자동차(HEV, Hybrid Electric Vehicle), 전기차(EV, Electric Vehicle), 수소자동차(FCEV, Fuel Cell Electric Vehicle) 등에 대한 보급이 확대되고 있다.

철도차량 분야에서도 대표적인 탄소 배출원인 디젤기관차를 대체하기 위한 다양한 연구개발이 진행되고 있다. 차상에 배터리 시스템 또는 울트라 캐패시터와 같은 ESS(Energy Storage System)를 디젤엔진과 함께 탑재한 하이브리드 시스템을 적용한 경우, 회생에너지 저장 및 디젤엔진의 최대 효율 영역 운전이 가능하다 [1], [2]. 수소연료전지(HFC, Hydrogen Fuel Cell)를 적용할 경우, 디젤엔진 없이 1회 충전으로 장거리 운행이

가능하다. 따라서 기존 디젤기관차를 사용하여 운행하던 비 전철화 구간에 적용하기 적합하고, 전철화를 위한 별도의 전차선 건설 등이 필요하지 않다 [3].

수소연료전지가 포함된 하이브리드 추진시스템의 경우 에너지 관리 간 전력분배, 충전상태 및 수명 관리 등과 같은 에너지 관리 기술(EMS, Energy Management Strategy)에 대한 고려가 필수적이며, 이를 위한 다양한 연구 결과가 존재한다. 우선 규칙 기반(rule-based) 기법의 경우 EMS 구현을 위하여 엔지니어의 경험에 기반한다. [4]의 경우 배터리 SOC(State Of Charge)를 기준으로 배터리 시스템의 방전량이 변경되도록 수소연료전지의 출력전력을 제어하는 규칙기반 기법을 적용하였다. 이러한 규칙기반 기법은 구현이 쉽고 실시간 적용이 용이하여, 실제 널리 사용되는 알고리즘이다. 하지만 특정 운전상황에 대해서만 유효하며, 결과에 대한 전역 최적(global optimal)을 보장하지 않는다. 또 다른 기법인 퍼지로지(fuzzy logic) 기법도 규칙기반과 유사하게 SOC와 차량 요구전력에 대하여 퍼지룰(fuzzy rule)을 구성하고, 이에 대한 퍼지 멤버십 함수(fuzzy membership function)에 따라 최종 수소연료전지 출력을 결정한다 [5], [6].

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Biomedical Engineering, Hanyang University, Korea

E-mail: hclee@hanyang.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea

** <https://orcid.org/0000-0001-7503-5409>

*** Korea Railroad Research Institute, Korea

Received: Apr. 27, 2023 Revised: May. 19, 2023 Accepted: May. 23, 2023

Copyright © The Korean Institute of Electrical Engineers

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

최적 제어이론에 기반한 DP(Dynamic Programming) 기법은 수학적으로 전역 최적을 보장한다 [7], [8]. 하지만 DP기법은 연산이 시간의 역순으로 진행되고, 미래 차량 정보가 사전에 확보 되어야만 구현이 가능하여 실제 현실에서는 적용이 불가능한 단점이 있다.

ECMS(Equivalent Consumption Minimization Strategy)는 PMP(Pontryagin's Minimum Principle)를 사용하여 전역 최적화 문제를 순시 최적화 문제로 변환하는 기법이다. 이에 DP 기법과 다르게 실시간 구현이 가능한 이점이 있다 [9]-[11]. 특히 [11]에서는 ECMS로 수소연료전지 출력을 제어하기 위하여 MPC(Model Predictive Control)로 도출된 속도 프로파일을 적용하였다. 이외 철도차량이 아닌 수소자동차 분야에서도 ECMS를 적용하여 EMS 기능을 구현한 사례가 다수 존재한다. [12]-[20].

본 논문에서는 ECMS 기반 수소전기철도의 소비에너지 최적화 알고리즘을 제안하였다. ECMS 내 hamiltonian 함수에서 수소연료전지와 배터리 시스템의 출력 상관관계를 결정하는 EF(Equivalent Factor)를 SOC에 대한 PI(Proportional-Integral) 제어를 통하여 결정되도록 하였다. 그리고 제안 알고리즘의 성능 검증에 위하여 임의의 속도 프로파일에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 수소전기철도 시스템 및 모델링

2.1 수소전기철도 시스템 구성 및 사양

본 논문에서 대상으로 하는 수소전기철도의 추진시스템 구성은 그림 1과 같다.

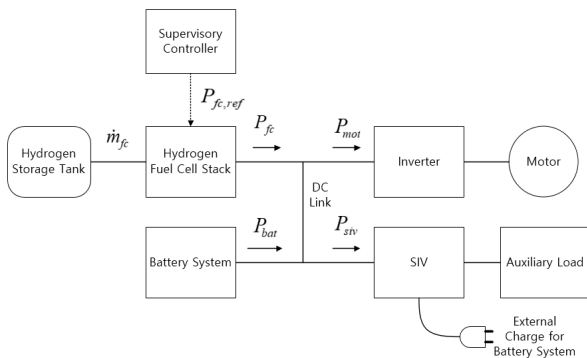


Fig. 1 Propulsion system of hydrogen electric train

상위제어기(Supervisory Controller)의 지령 ($P_{fc,ref}$)에 따라 수소연료전지 출력(P_{fc})과 배터리 시스템의 출력 (P_{bat})은 dc-link 단을 통하여 차량에 전달되며, 이때 P_{bat} 는 P_{fc} 와 차량부하 (P_{mot} , P_{siv})에 따라 결정된다. Dc-link 단의 전압은 전압원인 배터리 시스템에 의하여 결정되며, 수소연료전지 출력은 내부 DC/DC 컨버터의 전류제어를 통하여 차량 측에 공급된다. SIV(Static Inverter)는 보조부하를 공급하기 위한 전력변환장치로 차량 내 제어전원, 냉난방장치 등에 전력을 공급한다. 또한,

SIV는 양방향 동작이 가능하여 외부 전력을 이용한 배터리 시스템 충전 기능(external charge)도 담당한다.

Table 1 Specification of hydrogen electric train

Components		Spec.	Unit
Vehicle	Full Weight	130	tonne
	Max Acceleration	2.99	km/h/s
	Max Deceleration	3.49	km/h/s
Hydrogen Fuel Cell	Type	PEMFC	-
	Max power	400	kW
Traction system	Max Traction Force	6,080	kN
	Max Power	1,280	kW
Battery System	Capacity	380	kWh
	Nominal voltage	1,555	V
	Max power	2,000	kW

2.2 차량 모델링

본 논문에서 사용된 차량 모델은 점질량 모델(point mass model)이며, 차량 속도는 식 (1)과 같이 차량에 가해지는 힘에 의하여 결정된다.

$$M_{veh} \frac{dv}{dt} = F_{tractive} + F_{brake} - F_{res} - F_{slope} - F_{curve} \quad (1)$$

$$F_{res} = c_1 + c_2 v + c_3 v^2$$

$$F_{slope} = M_{veh} g \sin \alpha$$

$$F_{curve} = M_{veh} g \frac{k}{r}$$

이때 v 는 차량 속도, M_{veh} 는 차량 중량이다. $F_{tractive}$, F_{brake} 는 운전자의 마스콘 위치에 따라 결정되는 차량 견인력과 제동력이며, F_{res} 는 주행저항, F_{slope} 는 경사각 α 에 대한 구배저항, 그리고 F_{curve} 는 곡선반경 r 에 대한 곡선저항이다.

2.3 배터리 시스템 모델링

배터리 시스템은 그림 2와 같이 내부저항 모델을 사용하여 구현하였다. SOC는 배터리 입출력 전류 I_{bat} 및 배터리 용량 Q_{bat} 에 따라 식 (2)와 같이 결정된다.

$$\frac{d}{dt} SOC = - \frac{I_{bat}}{Q_{bat}} \quad (2)$$

이때 배터리 입출력 전류 (I_{bat})는 배터리 입출력 전력 P_{bat} , 배터리 개방전압 V_{ocv} 와 배터리 내부저항 R_{in} 간 관계에 따라 아래와 같이 정의된다.

$$P_{bat} = V_{ocv} I_{bat} + R_{in} I_{bat}^2 \quad (3)$$

$$I_{bat} = -\frac{V_{ocv} - \sqrt{V_{ocv}^2 - 4R_{in} P_{bat}}}{R_{in}}$$

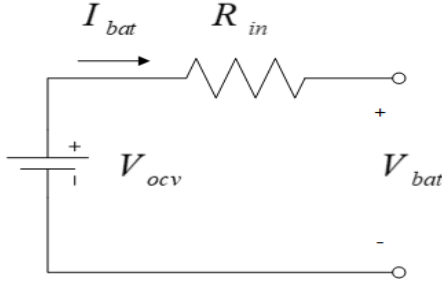


Fig. 2 Internal resistance model of battery system

2.4 수소연료전지 모델링

본 논문에서는 수소연료전지의 화학반응 시간, 공기압축기 등 주변장치의 동특성에 대하여 무시할 수 있다고 가정하며, 그림 3의 수소연료전지 특성곡선을 사용한 간소화 모델을 적용하였다. 이때 수소연료전지 발전 효율, η_{fc} 는 식 (4)와 같으며, \dot{m}_{fc} 는 순시 수소 소비량, LHV_{fc} (Lower Heating Value)는 수소의 저위발열량으로 120 MJ/kg이다.

$$\eta_{fc} = \frac{P_{fc}}{\dot{m}_{fc} LHV_{fc}} \quad (4)$$

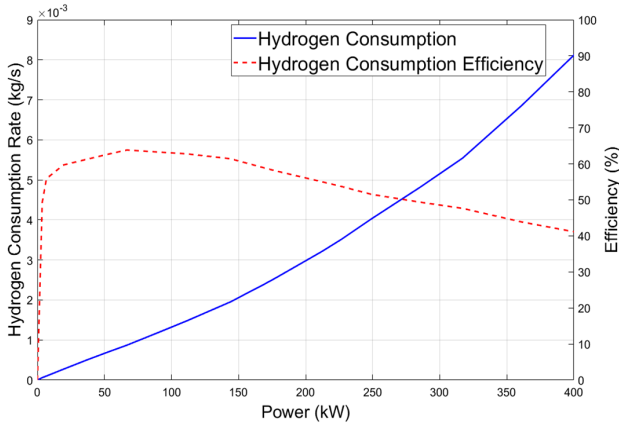


Fig. 3 Characteristic curve of hydrogen fuel cell

3. ECMS 기반 수소전기철도 에너지 최적화 전략

3.1 목적함수 및 제약조건

본 논문에서는 수소전기철도의 소비에너지 최적화를 위하여 식 (5)과 같이 목적함수를 정의하였다. J 는 전체 운행시간 동안 소비된 총 수소 소비량을 의미하며, 이를 최소화하기 위한 수소연료전지 출력량을 결정해야 한다.

$$J = \int \dot{m}_{fc} dt \quad (5)$$

이때 수소전기철도의 추진시스템을 구성하는 장치의 사양에 따른 제약조건은 아래와 같다.

$$P_{veh} = P_{fc} + P_{bat} \quad (6)$$

$$P_{fc,min} \leq P_{fc} \leq P_{fc,max}$$

$$\Delta P_{fc} \leq |\Delta P_{fc,max}|$$

$$P_{bat,min} \leq P_{bat} \leq P_{bat,max}$$

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max}$$

여기서 $P_{fc,min}$ 와 $P_{fc,max}$ 는 수소연료전지의 최소/최대 발전량이며, $\Delta P_{fc,max}$ 는 수소연료전지 출력의 최대 변화량, $P_{bat,min}$ 와 $P_{bat,max}$ 는 배터리 시스템의 최대 충/방전량, 그리고 SOC_{min} 과 SOC_{max} 는 배터리 시스템의 수명관리를 위한 최소/최대 SOC이다.

3.2 Equivalent Consumption Minimization Strategy

PMP에 따라 목적함수 J 및 시스템 방정식 $f(x,u,t)$ 에 대한 hamiltonian 함수 H 는 식 (8)과 같이 정의할 수 있다.

$$J = \int L(x,u,t) dt \quad (7)$$

$$H(x,u,t) = L(x,u,t) + \lambda f(x,u,t) \quad (8)$$

여기서 목적함수를 최소화하는 입력 u 는 아래 조건을 만족해야 한다.

$$H(x^*, u^*, t) \leq H(x,u,t) \quad (9)$$

이때 $\frac{d}{dt} SOC = f(x,u,t)$, $u = P_{fc}$ 라고 하면 H 는 식 (10)과 같으며, $s = \frac{\lambda LHV_{fc}}{V_{ocv} Q_{bat}}$ 와 같이 정의하면 식 (11)과 같이 변경된다.

$$H(x,u,t) = \dot{m}_{fc} + \lambda \frac{P_{bat}}{V_{ocv} Q_{bat}} \quad (10)$$

$$H(x,u,t) = \dot{m}_{fc} + s \frac{P_{bat}}{LHV_{fc}} \quad (11)$$

따라서 수소전기철도의 에너지 최적화 전략은 순시함수인 식 (11)를 최소화 하는 P_{fc} 를 찾는 문제로 변경된다. 그리고 s 는 수소 소비량을 전기에너지로 등가변환하는 EF(equivalent factor)이며, s 에 따라 목적함수 J 를 최소화하는 P_{fc} , P_{bat} 가 결정된다.

$$H = \arg \min_{u=P_{fc}} \left[\dot{m}_{fc}(P_{fc}) + s \frac{P_{bat}}{LHV_{fc}} \right] \quad (12)$$

수소연료전지의 경우, 급격한 출력변화는 수명관리에 부정적인 영향을 미친다. 따라서 이를 방지하기 위하여 수소연료전지의 출력변화량의 절대값 $|\Delta P_{fc}|$ 에 대하여 weighting factor를 적용한 penalty 함수를 반영하면, H 는 최종적으로 식 (13)과 같이 변경된다.

$$H = \arg \min_{u=P_{fc}} \left[\dot{m}_{fc}(P_{fc}) + s \frac{P_{bat}}{LHV_{fc}} + k_1 |\Delta P_{fc}| \right] \quad (13)$$

3.3 Equivalent Factor 결정

s 를 결정하기 위하여 사전 시뮬레이션을 통한 차량 요구전력 P_{veh} 및 s 에 따른 P_{fc} 의 변화를 그림 4와 같이 도출하였으며, 이를 통하여 s 의 유효범위를 확인할 수 있다. 즉 s 가 s_{min} 이하인 경우에는 $P_{fc,min}$, s_{max} 이상인 경우 $P_{fc,max}$ 가 식 (13)을 최소로 만드는 P_{fc} 이므로 s 는 식 (14)의 범위 내에서 결정되어야 한다.

$$s_{min} \leq s \leq s_{max} \quad (14)$$

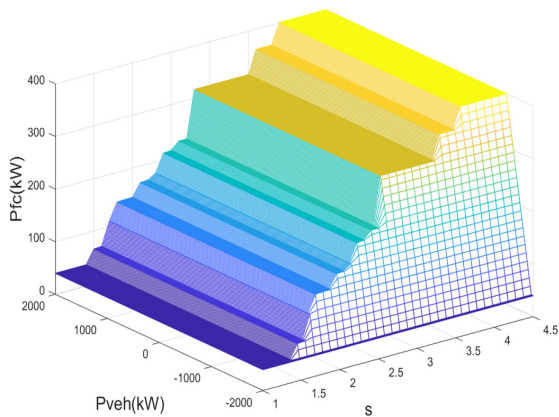


Fig. 4 Power of hydrogen fuel cell for demand power and EF

s 는 배터리 SOC 관리를 위하여 목표 SOC를 유지하기 위한 PI 제어를 통하여 결정된다. 이때 s 가 제한범위에서 벗어난 경

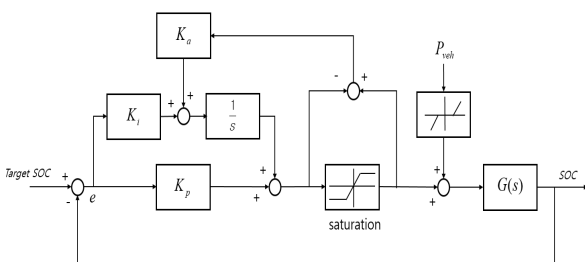


Fig. 5 PI Controller with anti-windup compensation

우, 포화되지 않도록 anti wind-up 제어를 적용하였다. 그리고 배터리 시스템의 수명관리를 위해서는 P_{bat} 의 순시 최대값을 감소시켜야 한다. 이를 위하여 P_{veh} 가 큰 경우, 수소연료전지 발전량을 높일 수 있도록 전방향 보상(feedforward compensation) 항목을 추가하여 최종적으로 s 가 보정될 수 있도록 하였다.

4. 시뮬레이션 결과

4.1 시뮬레이션 환경 및 조건

본 논문에서 제안된 알고리즘을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 Amesim-Matlab/Simulink 간 co-simulation을 통하여 수행하였으며, 차량 모델과 제안된 알고리즘은 그림 6과 같이 구현되었다.

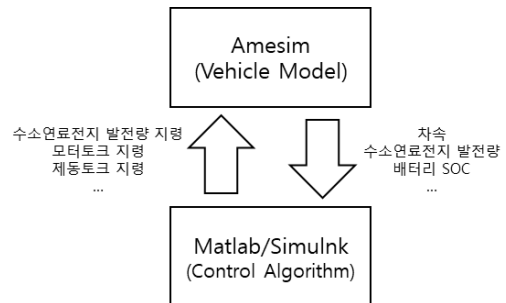


Fig. 6 Environment for simulation

시뮬레이션 조건의 경우, 배터리 시스템의 초기 SOC는 55%, 목표 SOC는 65%로 설정하였다. 그리고 직선 평탄 선로에 대하여 최고속도 120km/h로 가속, 제동 및 정차를 반복하여 총 주행거리 240km를 운행하도록 하였으며, SIV에서 사용하는 고정 보조부하는 100kW로 가정하였다.

Table 2 Condition for simulation

Components	Unit	Specification
Initial SOC	%	55
Target SOC	%	65
Max speed	km/h	120
Total driving distance	km	240
SIV Load	kW	100

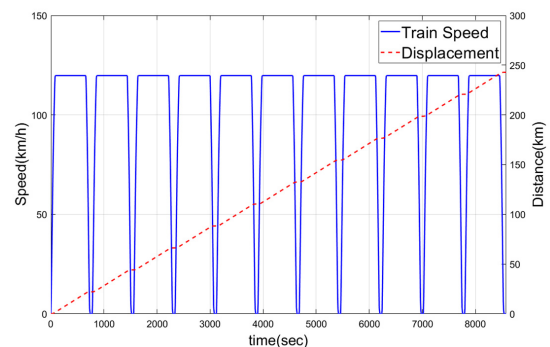


Fig. 7 Speed profile for simulation

4.2 규칙기반 알고리즘

본 논문에서 제안한 알고리즘의 성능을 비교하기 위하여 그림 8과 같이 규칙기반 알고리즘을 구현하였다. 차량 내 회생전력 발생 시에는 P_{fc} 를 최소로 하고, P_{veh} 가 큰 경우에는 P_{fc} 를 최대로 하여 배터리 시스템의 충/방전 최대 전력을 저감하도록 하였다. 이외의 경우 SOC에 따라 P_{fc} 가 가변되도록 하였으며, 최종적으로 P_{fc} 의 변화량을 $\Delta P_{fc,max}$ 범위 내에서 제한하여, 수소연료전지의 급격한 출력 변화를 방지하도록 하였다.

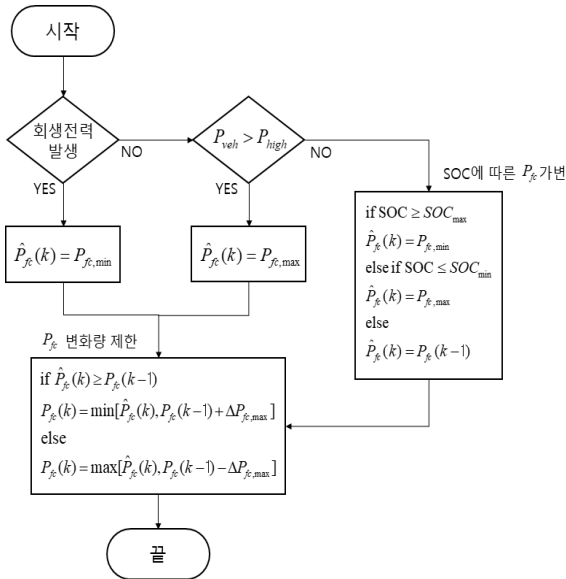


Fig. 8 Flow chart of rule-based algorithm for EMS

4.3 시뮬레이션 결과

규칙기반 알고리즘과 제안 알고리즘의 시뮬레이션 결과는 표 3과 같다. 시뮬레이션 종료 후 SOC는 두 알고리즘 모두 목표 SOC 65%에 근접한 것이 확인되었다. 수소 1kg당 주행거리는 규칙기반 알고리즘이 6.56 km, 제안 알고리즘이 7.52 km으로 약 16% 향상된 성능을 확인할 수 있다.

차량 제동 시에는 규칙기반 알고리즘의 경우 수소연료전지 출력이 최소로 설정되어 배터리 시스템의 충전전력이 제안 알고리즘에 비하여 상대적으로 적은 것이 확인된다. 반면 수소 소비량의 기울기 변화는 제안 알고리즘이 규칙기반 알고리즘에 비하여 일정하며, 이는 식 (13) 내 수소 발전량의 변화량을 제한하

Table 3 Summary of simulation results

Components	Unit	Rule-base Algorithm	Proposed Algorithm
Final SOC	%	65.35	65.22
Hydrogen Consumption	kg	36.56	31.91
Driving distance per hydrogen 1kg	km/kg	6.56	7.52

는 penalty 함수의 영향인 것을 확인할 수 있다. 또한 제안 알고리즘의 경우 s 가 포화되지 않도록 하는 anti wind-up 제어에 따라, 운행 중 SOC 변동범위가 약 6.5%이다. 이는 변동범위가 약 8%인 규칙기반 알고리즘에 비하여 상대적으로 배터리 시스템 수명관리에 유리함을 예측할 수 있다.

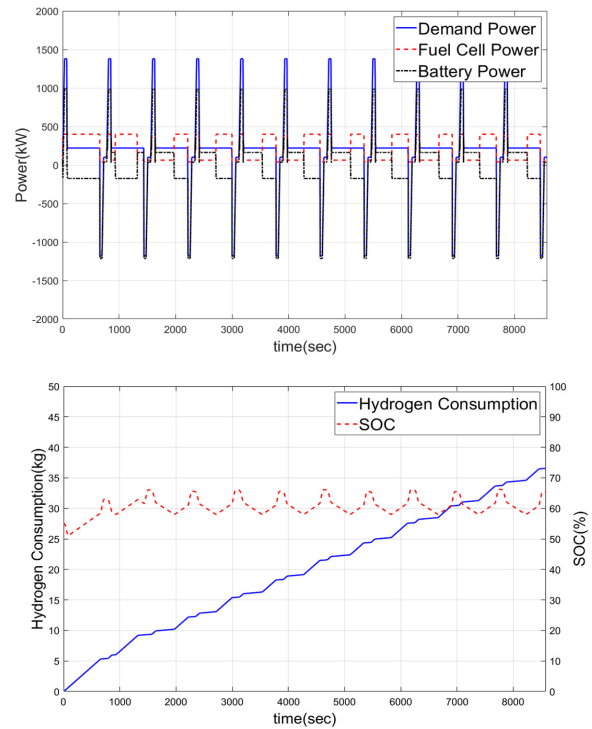


Fig. 9 Simulation results of rule-based algorithm

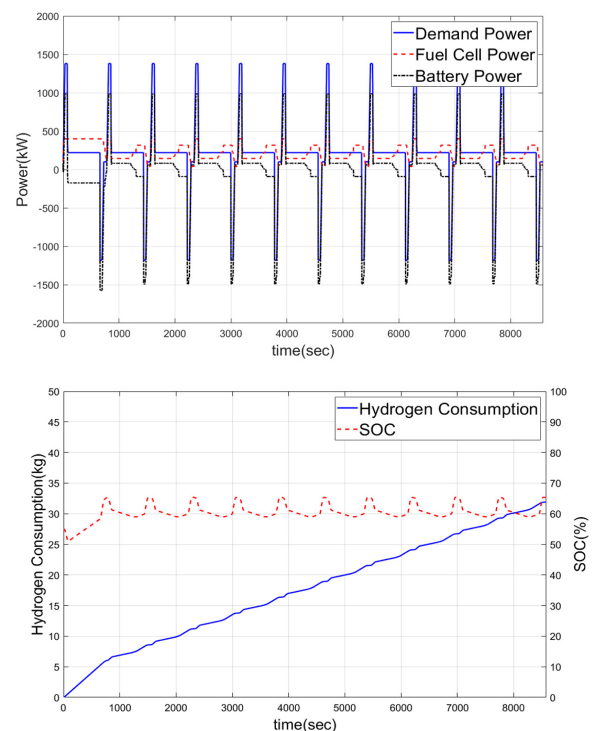


Fig. 10 Simulation results of proposed algorithm

5. 결론

본 논문에서는 수소전기철도의 소비에너지 최적화를 위하여 ECMS 기반 알고리즘을 구현하였으며, 이를 통하여 전역 최적화 문제를 순시 최적화 문제로 변경하였다. 또한 수소 소모량과 배터리 에너지 간 상관관계인 EF(equivalent factor)를 결정하기 위하여 anti-windup과 전방향 보상제어를 적용한 PI 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 시뮬레이션을 통하여 규칙기반 알고리즘과 성능을 비교하였으며, 수소 소비량이 저감됨을 확인하였다.

하이브리드 추진시스템 내에서 에너지 관리 기술은 소비에너지 저감 뿐만 아니라 에너지원의 수명증대를 통한 운영비 저감에도 기여할 수 있다. 이에 본 논문에서 제안된 알고리즘을 통하여 수소전기철도의 경제성 확보 및 상용화에 기여할 수 있으며, 이외 수소연료전지가 적용되는 모빌리티 분야에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

Acknowledgements

This work was supported by Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grant funded by the Korea government (MOTIE) (20225500000110, "Design and Analysis of AC/DC Hybrid Distribution Networks")

References

- [1] M. Meinert, P. Prenleloup, S. Schmid, R. Palacin, "Energy storage technologies and hybrid architectures for specific diesel-driven, rail duty cycles: Design and system integration aspects," *Applied Energy*, vol. 157, pp. 619–629, 2015.
- [2] J. J. Mwambeleko and T. Kulworawanichpong, "Battery electric multiple units to replace diesel commuter trains serving short and idle routes," *Journal of Energy Storage*, vol. 11, pp. 7-15, 2017.
- [3] Y. Sun, M. Anwar, N. M. S. Hassan, M. Spiryagin and C. Cole, "A review of hydrogen technologies and engineering solutions for railway vehicle design and operations," *Railway Engineering Science*, vol. 29, pp. 212–232, 2021.
- [4] Y. G. Oh, B. H. Y. K. Oh, J. H. R, K. B. Lee, "Modeling of Hybrid Railway Vehicles with Hydrogen Fuel-Cell/Battery using a Rule-Based Algorithm," *Journal of IKEEE*, vol. 24, no.2, pp. 610 ~ 618, 2020.
- [5] J. Kong, Y. Guo, J. Liu, "Rule-based Energy Management Strategies for a Fuel Cell-Battery Hybrid Locomotive," 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration, 2020.
- [6] H. J. Kaleybar, M. Brenna, H. Li and D. Zaninelli, "Fuel Cell Hybrid Locomotive with Modified Fuzzy Logic Based Energy Management System," *Sustainability*, vol. 14, Issue 8336, 2022.
- [7] C. C. Lin, H. Peng, J. W. Grizzle, and M. K. Jun, "Power management strategy for a parallel hybrid electric truck," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 11, no. 6, pp. 839–849, 2003.
- [8] C. C. Lin, S. Jeon, H. Peng, and J. M. Lee, "Driving pattern recognition for control of hybrid electric trucks," *Vehicle System Dynamics, International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, vol. 42, no. 1-2, pp. 41–58, 2004.
- [9] D. E. Kirk, *Optimal Control Theory – An Introduction*, 3rd Edition, Dover Publications, 2004.
- [10] S. Onori, *Hybrid Electric Vehicles Energy Management Strategies*, 1st Edition, Springer, 2016.
- [11] K. Deng, T. Fang, H. Feng, H. Peng, L. Lowenstein and K. Hameyer, "Hierarchical eco-driving and energy management control for hydrogen powered hybrid trains," *Energy Conversion and Management*, vol. 264, 2022.
- [12] B. Geng, J. K. Mills and D. Sun, "Two-Stage Energy Management Control of Fuel Cell Plug-In Hybrid Electric Vehicles Considering Fuel Cell Longevity," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 2, pp. 498-508, 2012.
- [13] Y. Ko and H. Lee, "A Supervisory Control Algorithm for a Series Hybrid Vehicle With Multiple Energy Sources," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 11, pp. 4942-4953, 2015.
- [14] C. Zheng, W. Li and Q. Liang, "An Energy Management Strategy of Hybrid Energy Storage Systems for Electric Vehicle Applications," *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 4, pp. 1880-1888, 2018.
- [15] A. Rezaei, J. B. Burl and B. Zhou, "Estimation of the ECMS Equivalent Factor Bounds for Hybrid Electric Vehicles," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 26, no. 6, pp. 2198-2205, 2018.
- [16] C. C. Lin, M. J. Kim, H. Peng, J. Grizzle, "System-Level Model and Stochastic Optimal Control for a PEM Fuel Cell Hybrid Vehicle," *ASME J. Dyn. Syst. Meas. Control* 128 (4), pp. 878-890, 2006.
- [17] G. Paganelli, S. Delprat, T. M. Guerra, J. Rimaux, J. J. Santin, "Equivalent Consumption Minimization Strategy For Parallel Hybrid Powertrains," *IEEE 55th Vehicular Technology Conference*, vol. 4, pp. 2076-2081, 2002.
- [18] J. Li, Y. Liu, D. Qin, G. Li and Z. Chen, "Research on Equivalent Factor Boundary of Equivalent Consumption Minimization Strategy for PHEVs," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 6, pp. 6011-6024, 2020.
- [19] S. J. Moura, H. K. Fathy, D. S. Callaway and J. L. Stein, "A Stochastic Optimal Control Approach for Power Management in Plug-In Hybrid Electric Vehicles," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 19, no. 3, pp. 2198-2205, 2011.
- [20] 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.

 저자소개


오용국 (Yongkuk Oh)

He received the B.S. degree and the M.S. degree in electrical engineering from Hanyang university, Seoul, South Korea where he is currently working toward the Ph.D. degree with the Department of Electrical Engineering, in 2005 and 2007, respectively. Since 2010, he has been with Korea Railroad Research Institute, Uiwang, South Korea. His research interests include optimal control, hybrid power train control, and applications to vehicle control


류준형 (Joonhyoung Ryu)

He received the B.S., M.S. and Ph.D. degrees in control and instrumentation engineering and electronics engineering from Ajou University, Suwon, South Korea, in 1997, 1999 and 2005, respectively. He is currently a Principal Researcher with Korea Railroad Research Institute, Uiwang, South Korea,


김재원 (Jaewon Kim)

He received the B.S., M.S. and Ph.D. degrees in electrical engineering from Korea University, Seoul, South Korea, in 2006, 2008, and 2018, respectively. He is currently a Principal Researcher with Korea Railroad Research Institute, Uiwang, South Korea. His research interests include on-board energy storage system for railway vehicles, traction power supply systems analysis, and railway electric components reliability analysis,


이형철 (Hyeongcheol Lee)

He received B.S. and M.S. degrees from Seoul National University, Seoul, South Korea, in 1988 and 1990, respectively, and a Ph.D. degree from the University of California, Berkeley, CA, USA, in 1997. He is currently a professor with the Department of Electrical and Biomedical Engineering, Hanyang University, Seoul, South Korea. His research interests include adaptive and nonlinear control, embedded systems, applications to vehicle control, and vehicle dynamics.