Check for updates

Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 37, No. 5, 2026, pp. 439~450
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2026.37.5.439

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

고부하 연료전지 하이브리드 차량을 위한 동적계획법 기반 적응형 에너지 관리 전략 연구

최유라[1] · 우종빈[1] · 이찬희[2] · 유상석[3†]

[1]충남대학교 기계공학과, [2]현대로템 미래추진시스템개발팀, [3]충남대학교 기계공학부

A Dynamic Programming-Based Adaptive Energy Management Strategy for Heavy-Duty Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles

YOORA CHOI[1], JONGBIN WOO[1], CHANHEE LEE[2], SANGSEOK YU[3†]

[1]Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea
[2]Advanced Propulsion System Development Team, Hyundai-Rotem Company, 37, Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 16082, Korea
[3]School of Mechanical Engineering, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea

[†]Corresponding author : sangseok@cnu.ac.kr

Received 5 August, 2026
Revised 18 August, 2026
Accepted 18 August, 2026

© The Korean Hydrogen and New Energy Society

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0, https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), which permits non-commercial use, sharing, adaptation, distribution, and reproduction in any medium or format, provided the original work is properly cited.

Abstract >> Evaluating real-time energy management performance is crucial for heavy-duty fuel cell hybrid vehicles. Unlike the State-based Equivalent Consumption Minimization Strategy (S-ECMS), the Adaptive Equivalent Consumption Minimization Strategy (A-ECMS) achieves real-time optimal control by adjusting the equivalence factor using Dynamic Programming (DP) global optimization results. An integrated powertrain model incorporating validated fuel cell voltage models and auxiliary components dynamics was established for precise fuel economy estimation. Driving cycle evaluations showed that A-ECMS adopted a proactive battery charging strategy under the high-load World Harmonized Vehicle Cycle (WHVC), while maintaining the fuel cell output at its high-efficiency minimum operating point under the low-load Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS). Consequently, the fuel economy corrected for battery state of charge (SOC) improved by approximately 2.0% for WHVC and 1.02% for UDDS compared to S-ECMS. In conclusion, A-ECMS successfully reduces hydrogen consumption and maintains SOC sustainability in real-time control environments without prior driving information.

Key words : Fuel Cell Electric Vehicle(연료전지 전기차), Heavy-duty Hybrid Vehicle (고중량 차량), Energy Management System(에너지 관리 시스템), Equivalent Consumption Minimization Strategy(수소 소비 최소화 전략), Dynamic Programming(동적 프로그래밍)

2026 The Korean Hydrogen and New Energy Society. All rights reserved.

1. 서 론

친환경 모빌리티 전환 흐름에 따라 수소 연료전지 차량(Fuel Cell Vehicle)은 내연기관을 대체할 핵심 대안으로 주목받고 있다. 특히 이온교환막 연료전지(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)는 높은 출력밀도와 낮은 운전 온도, 빠른 기동 특성을 가지므로 고부하·장거리 운전이 요구되는 차량용 동력원으로 적합하다. 이러한 특성으로 인해 승용차뿐만 아니라 버스, 트럭 및 특수 목적의 대형 차량을 대상으로 연료전지 시스템을 적용하기 위한 연구가 확대되고 있다[1,2].

그러나 대형 차량은 큰 공차 중량과 주행저항으로 인해 요구 출력의 변동 폭이 매우 크다. 연료전지 단독으로 이러한 급격한 부하 변동에 대응할 경우, 운전점이 빈번하게 변동하여 수소 소비량 및 주변기기(Balance of Plant, BOP)의 동력 소비가 증가하게 된다. 또한 급격한 출력 변화는 연료전지 스택의 내구성과 시스템 안정성에도 부정적인 영향을 미친다. 이를 보완하기 위해 일반적으로 연료전지 차량은 고전압 배터리를 함께 사용하는 하이브리드 구조로 구성되며, 연료전지를 주 동력원으로 사용하고 고전압 배터리는 급격한 부하 변화에 대응하도록 운전한다[3,4].

이와 같은 하이브리드 시스템에서 수소 소비량을 최소화하고 스택 및 배터리의 내구성을 확보하기 위해서는 효율적인 에너지 관리 시스템(Energy Management System, EMS) 구축이 필수적이다. EMS는 차량의 요구 출력을 연료전지와 배터리 출력으로 분배하는 제어 알고리즘으로, 배터리의 충전 상태(State of Charge, SOC)를 적절한 범주 내로 유지하면서 전체 시스템의 연료 효율성을 극대화하는 것을 목적으로 한다[5,6].

에너지 관리 전략은 일반적으로 규칙 기반 전략, 최적화 기반 전략 및 학습 기반 전략으로 구분할 수 있다. 규칙 기반 전략은 구현이 간단하고 실시간 적용이 용이하지만, 다양한 주행 조건에서 최적성을 보장하기 어렵다. 최적화 기반 전략에는 등가 소비 최소화 전략(Equivalent Consumption Minimization Strategy, ECMS)과 오프라인 전역 최적화 기법인 동적계획법(Dynamic Programming, DP) 등이 대표적이다. 인공신경망 및 강화학습 등을 활용하는 학습 기반 전략 역시 연구되고 있으나, 대량의 학습 데이터가 요구 및 실시간 적용에 한계점이 있다[7-9].

ECMS는 배터리 전기에너지를 등가 수소 소비량으로 환산한 후, 각 시간에서의 총 수소 소비율이 최소가 되도록 동력원 출력을 결정하는 최적화 기반 에너지 관리 전략이다. ECMS는 순간 최적화를 수행하므로, 동적계획법에 대비 계산량이 적고 실시간 적용이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 ECMS의 성능은 배터리 에너지를 수소로 변환하는 등가계수(Equivalence factor)에 크게 의존한다[10,11].

등가계수가 너무 낮게 설정되면 배터리 방전이 과도해져 SOC가 지속적으로 감소하며, 반대로 높게 설정되면 연료전지 사용량이 과도해져 수소 소비량이 증가한다. 더욱이 최적 등가계수는 주행 프로파일, 요구 출력, 초기 SOC 및 시스템 운전조건에 따라 달라지므로, 단일 고정 등가계수만으로는 다양한 운전 환경에 유연하게 대응하기 어렵다.

이러한 한계를 보완하기 위해 배터리 SOC에 따라 등가계수를 보정하는 State-based ECMS (S-ECMS)나, DP의 전역 최적화 궤적을 추종하도록 등가계수를 조정하는 Adaptive ECMS (A-ECMS)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

따라서 본 연구에서는 고부하 주행 조건의 대형 수소 연료전지 하이브리드 차량을 대상으로 MATLAB/Simulink® 기반의 파워트레인 시스템 모델을 수립하고, S-ECMS와 A-ECMS의 실시간 운전 성능을 분석하고자 한다. 이를 위해 차량 동역학, DC/DC 컨버터, 인버터 및 모터 모델을 통합 수립하였으며, 특히 냉각 및 연료공급 시스템 등 BOP 동특성을 포함한 연료전지 모델과 고전압 리튬이온 배터리 모델을 구축하였다.

구축된 시스템 모델을 기반으로 S-ECMS 및 A-ECMS 제어 알고리즘을 설계하였으며, WHVC (World Harmonized Vehicle Cycle)와 UDDS (Urban Dynamometer Driving Schedule) 주행 사이클 조건에서 각 전략의 동력 분배 특성을 해석하고, DP 기반

등가계수 보정이 대형 연료전지 차량의 수소 소비량 감축 및 연비 향상에 미치는 유효성을 검증하였다.

2. 시스템 모델 개발

수소 연료전지 차량 시스템의 구조는 Fig. 1과 같다. 연료전지 시스템과 고전압 리튬이온 배터리, DC/DC 컨버터, DC/AC 인버터 및 유도 전동기를 포함하는 파워트레인으로 구성된다. 본 연구 대상 차량은 일반적인 포장도로 주행뿐만 아니라 높은 구동력이 요구되는 험로 주행 및 고등판 운전조건을 고려하여 구성된 연료전지 하이브리드 차량이다. 이러한 운전조건에서는 차량 중량과 주행저항에 의해 상용차 대비 높은 구동출력이 요구되며, 특히 고부하 구간에서 연료전지와 배터리 사이의 적절한 출력분배가 중요하다. 이에 따라 본 연구에서는 높은 요구출력에 대응할 수 있도록 두 개의 연료전지 스택과 고전압 배터리로 구성된 하이브리드 파워트레인을 적용하였으며, 차량의 주요 제원은 Table 1과 같다.

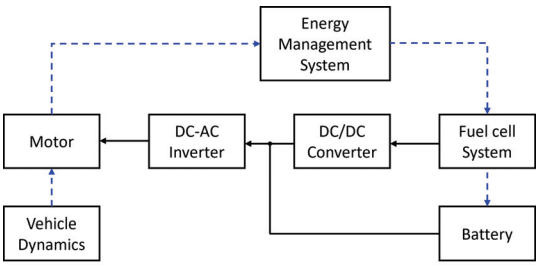


Fig. 1. Power train configuration of fuel cell vehicle

Table 1. Specifications of the heavy-duty vehicle

Parameters	Specification
Weight	13,750 kg
Wheel radius	0.342 m
Maximum speed	70 km/h
Maximum gradeability	60%
Rolling resistance coefficient	0.05
Aerodynamic drag coefficient	0.8
Motor maximum power	250 kW

2.1 차량 동역학 모델

차량의 동적 특성을 해석하기 위해 구동력(F_{trac}), 공기 저항(F_{aero}), 구름 저항(F_{roll}) 및 경사 저항(F_{grad})을 반영한 종방향 차량 동역학 모델을 구축하였다. m은 차량의 중량, v는 차량의 종방향 속도를 나타내며, 구동력의 i_g는 기어비, τ_{motor}, τ_{loss}는 각각 모터 토크와 손실, r_w는 휠 반경을 나타낸다. C_d는 공기 저항 계수, C_r은 구름 저항 계수, θ는 경사도를 나타낸다. 차량의 운동 방정식은 다음과 같이 정의 된다[12].

$$m\frac{dv}{dt} = F_{trac} - F_{aero} - F_{roll} - F_{grad} \quad (1)$$

$$F_{trac} = i_g(\tau_{motor} - \tau_{loss})/r_w - F_{br} \quad (2)$$

$$F_{aero} = \frac{1}{2}\rho C_d A_f V^2 \quad (3)$$

$$F_{roll} = mgC_r\cos\theta \quad (4)$$

$$F_{grad} = mgsin\theta \quad (5)$$

2.2 전력 변환 및 구동 모터 모델

연료전지에서 출력되는 직류 전력은 DC/DC 컨버터를 통해 차량의 요구 전압에 맞게 승·강압되며, 이후 인버터를 통해 3상 교류 전력으로 변환되어 구동모터에 공급된다. 본 연구에서는 식 (6), (7)을 이용하여 DC/DC 컨버터의 출력 전압(V_{conv})과 출력 전류(I_{conv})를 계산하였으며, 인버터는 식 (8), (9)를 통해 직류 전압을 3상 교류 전압($V_{inv,3p}$)으로 변환하도록 수식화하였다. 또한 구동 모터는 유도 전동기(Induction Motor) 모델을 적용하였으며, 식 (10)은 전자기 토크를 나타내고, 식 (11)은 전자기 토크(T_e)와 부하토크(T_{load})를 고려한 회전자 운동 방정식을 나타낸다. 마지막으로 식 (12)는 슬립 각속도(ω_{sl})와 회전자 각속도(ω_r)를 이용한 전기 각속도(ω_e)를 계산하며, 이를 통해 유도 전동기의 동적 특성을 해석하였다.

여기서 V_{fc}는 연료전지 출력 전압, D는 듀티비, θ^*는 전기각, V_{dc}는 DC 링크 전압, J_m은 모터의 관성 모멘트, B는 점성 마찰계수, R_r은 회전자 저항, L_r과 L_m은 각각 회전자 및 여자 인덕턴스이며, i_{ds}^e, i_{qs}^e, i_{dr}^e, i_{qr}^e는 동기좌표계에서의 고정자 및 회전자 전류를 의미한다[13].

$$V_{conv} = \begin{cases} \dfrac{V_{fc}}{1-D} \\ V_{fc}D \end{cases} \tag{6}$$

$$I_{conv} = \frac{V_{fc}I_{fc}}{V_{conc}} \tag{7}$$

$$V_{inv,3p} = \begin{bmatrix} \sqrt{2}\,V_{dc}\cos(\theta^*) \\ \sqrt{2}\,V_{dc}\cos(\theta^* - \dfrac{2\pi}{3}) \\ \sqrt{2}\,V_{dc}\cos(\theta^* + \dfrac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$\theta^* = \int \omega_e^* dt \tag{9}$$

$$T_e = \frac{3}{2}\frac{P_n}{2}L_m(I_{qs}^e I_{dr}^e - I_{ds}^e I_{qr}^e) \tag{10}$$

$$J_m\frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_{load} - B\omega_r \tag{11}$$

$$\omega_e = \omega_{sl} + \omega_r = \frac{R_r}{L_r}\frac{I_{qs}^e}{I_{ds}^e} + \omega_r \tag{12}$$

2.3 연료전지 모델

연료전지의 개방전압은 Nernst 전압방정식으로 산출되며, 연료전지 셀 전압(V_{cell})은 Nernst 전압(E_{Nernst})에서 막 전해질의 활성화 과전압(V_{act}), 저항 과전압(V_{ohm}), 농도 과전압(V_{con})을 반영하여 계산된다. 여기서 Δg_f°는 표준 Gibbs 자유에너지 변화, R은 기체상수, T는 절대온도, F는 패러데이 상수이며, a_x는 각 화학종의 활성도를 나타낸다. i는 전류 밀도, $i_{\max}$는 최대 전류 밀도, R_m은 전해질막 저항을 나타낸다[14,15].

$$V_{cell} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{con} \tag{13}$$

$$E_{Nernst} = -\frac{\Delta g_f^\circ}{2F} + \frac{RT}{2F}\ln\left(\frac{a_{H_2}a_{o_2}^{1/2}}{a_{H_2O}}\right) \tag{14}$$

$$V_{act} = V_{OC} - V_a(1 - e^{-C_1 i}) \tag{15}$$

$$V_{ohm} = iR_{mem} \tag{16}$$

$$V_{con} = i\left(C_2\frac{i}{i_{\max}}\right)^{C_3} \tag{17}$$

연료전지 시스템 제원은 Table 2에 나타내었으며, 본 연구에서는 정격 출력 약 95 kW의 연료전지 스택 2개를 적용하였다. 시뮬레이션에서는 스택의 최

Table 2. Specifications of the PEMFC stack

Parameters	Specification
Number of stacks	2
Maximum net power	95 kW
Allowable operating range	30 - 75 kW
Number of cells	445
Active area	270 cm^2

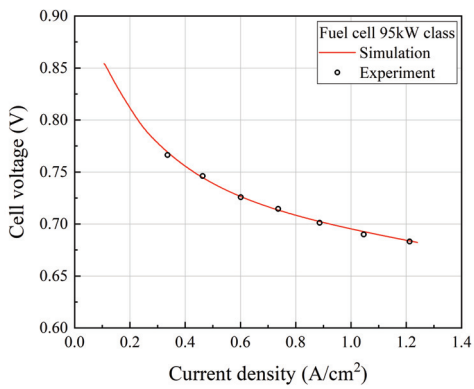


Fig. 2. Validation of the cell voltage using experimental data

소 운전점 및 연속 출력 한계를 고려하여, 스택 1개당 운전 범위를 30-75 kW로 제한하였다.

Fig. 2는 전류 밀도에 따른 단일 셀 전압의 시뮬레이션 검증 결과를 보여준다. 연료전지 스택 실험 데이터 기반으로 셀 전압 모델을 검증하였으며, 스택당 셀 개수(N_{cell})는 445개로 구성하였다.

$$\frac{dT_{fc}}{dt} = \frac{Q_{gen} - Q_{cool} - Q_{gas} - Q_{amb}}{C_{p,fc} m_{fc}} \tag{18}$$

$$Q_{gen} = N_{cell} V_{cell} I_{fc} \left(\frac{V_{OC}}{V_{cell}} - 1 \right) \tag{19}$$

$$Q_{cool} = \sum \dot{m}_{cool} C_{p,cool} (T_{cool,o} - T_{cool,i}) \tag{20}$$

$$Q_{gas} = \sum \dot{m}_{gas} C_{p,gas} (T_{gas,o} - T_{gas,i}) \tag{21}$$

$$Q_{amb} = h_{amb} A (T_{fc} - T_{amb}) \tag{22}$$

스택의 온도는 식 (18)-(22)에 나타낸 전기화학 반응에 의한 발열량(Q_{gen})과 냉각수(Q_{cool}). 가스(Q_{gas}), 외기(Q_{amb})로의 열전달량에 의해 결정된다[16,17]. 스택 온도 및 냉각수 온도는 각각 70°C와 60°C를 유지하도록 냉각수 펌프 및 팬 운전이 제어된다.

스택의 온도는 식 (18)-(22)에 나타낸 전기화학 반응에 의한 발열량(Q_{gen})과 냉각수(Q_{cool}). 가스(Q_{gas}), 외기(Q_{amb})로의 열전달량에 의해 결정된다[16,17]. 스택 온도 및 냉각수 온도는 각각 70°C와 60°C를 유지하도록 냉각수 펌프 및 팬 운전이 제어된다.

본 연구 모델은 냉각 시스템 및 연료공급 시스템을 포함하는 연료전지 BOP의 동특성을 포함하여 계산되었으며, 요소 부품의 수식 및 검증은 본 연구실에서 앞서 보고된 논문에 기재된 해석 방법과 동일하다[18-22].

2.4 배터리 모델

배터리는 개방회로전압(V_{oc})과 내부저항(R_{int})을 고려한 등가회로 모델을 적용하였다. 배터리 출력(P_{bat})은 내부저항에 의한 전압 강하를 반영한다. 식 (25)는 배터리 충전 상태(State of Charge, SOC) 계산식으로, 배터리 전류(I_{bat})를 적분하여 시간에 따른 SOC 변화를 계산한다. Q_{bat}은 배터리의 총 전하량을 나타내며, 방전전류를 양(+), 충전전류는 음(−)으로 계산된다. 본 모델에 적용된 배터리의 주요 제원은 Table 3에 제시하였다.

Table 3. Specifications of the battery

Parameters	Specification
Capacity	155.4 Ah
Nominal voltage	547.5 V
Maximum charge/discharge current	200 A
Energy	85.1 kWh

$$P_{bat} = V_{oc} I_{bat} - I_{bat}^2 R_{int} \tag{23}$$

$$I_{bat} = \frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4 P_{bat} R_{int}}}{2 R_{int}} \tag{24}$$

$$SOC(t) = SOC(0) - \frac{1}{Q_{bat}} \int_0^t I_{bat} dt \tag{25}$$

3. 에너지 관리 전략

연료전지 차량의 에너지 관리 전략은 차량 요구출력을 연료전지와 배터리에 적절히 분배하여 수소 소비량을 최소화하고, 배터리 SOC를 허용범위 내에서 유지하는 것을 목적으로 한다. 본 연구에서는 SOC에 따라 등가계수를 조정하는 상태 기반 등가 소비 최소화 전략(State-based Equivalent Consumption Minimization Strategy, S-ECMS)과 동적계획법의 전역 최적 운전 결과를 이용하여 등가계수를 결정하는 적응형 등가 소비 최소화 전략(Adaptive Equivalent Consumption Minimization Strategy, A-ECMS)을 적용하였다.

3.1 상태 기반 등가 소비 최소화 전략

등가 소비 최소화 전략(ECMS)는 연료전지의 수소 소비량과 배터리의 전기 에너지 소비량을 수소 소비량으로 등가 환산하여, 매 순간의 총 등가 수소 소비율이 최소가 되도록 동력원 출력을 분배하는 제어 기법이다. 연료전지의 실제 수소 소비율($\dot{m}_{fc}$)과 배터리 출력에 대응하는 등가 수소 소비율을 합산한 순간 등가 수소 소비율($\dot{m}_{tot}$)은 식 (26)와 같이 정의된다. LHV_{H_2}는 수소의 저위발열량으로, 단위질량의 수소가 전기화학 반응을 통해 방출할 수 있는 에너지를 의미하며, 120.1 MJ/kg을 적용하였다. P_{bat}/LHV_{H_2}는 배터리에서 사용되는 에너지를 동일한 수소로 생산할 때 필요한 수소 질량 소비율(g/s)로 환산할 수 있다. 등가계수(s)는 배터리 에너지 사용에 대한 상대적인 비용을 조정하여 등가 수소 소비량을 결정한다[23,24]. 연료전지 출력에 대한 수소 소비율은 Fig. 3에 나타내었다.

$$\dot{m}_{tot} = \dot{m}_{fc} + s\frac{P_{bat}}{LHV_{H_2}} \tag{26}$$

최적 등가계수는 주행 프로파일과 차량의 운전조건에 따라 달라지므로, 고정된 등가계수를 적용할 경우 주행 중 배터리 SOC의 편차를 적절히 보상하지 못할 수 있다.

이를 보완하기 위해 State-based ECMS (S-ECMS)

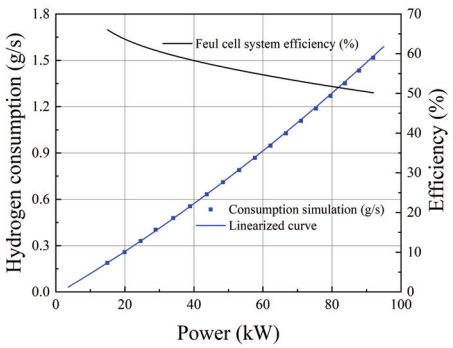


Fig. 3. Fuel consumption under fuel cell output

에서는 등가계수를 SOC의 함수로 조정하여 배터리 충전 상태를 목표값 부근으로 유지한다. SOC 상태 기반 등가계수 보정에는 선형 함수, 지수 함수 및 시그모이드 형태 함수 등이 사용되며, 본 연구에서는 식 (27) 같이 선형 보정함수를 적용하였다.

$$s = 1 - \left(\frac{SOC(t) - 0.5(SOC_H + SOC_L)}{0.5(SOC_H - SOC_L)} \right) \tag{27}$$

SOC_H와 SOC_L는 각각 배터리 충전 상태의 상한값과 하한값으로, 본 연구에서는 각각 0.8과 0.4로 설정하였다. SOC가 낮을수록 등가계수가 증가하여 배터리 방전을 억제하고, SOC가 높을수록 등가계수가 감소하여 배터리 사용을 증가시키도록 설계하였다. 식 (28)은 배터리 SOC와 연료전지 및 배터리 출력의 운전 제한조건을 나타낸다.

$$\begin{cases} P_{bat} = P_{dem} - P_{fc} \\ SOC_L \le SOC(t) \le SOC_H \\ P_{fc,\min} \le P_{fc}(t) \le P_{fc,\max} \\ P_{bat,\min} \le P_{bat}(t) \le P_{bat,\max} \end{cases} \tag{28}$$

3.2 적응형 등가 소비 최소화 전략

Adaptive ECMS (A-ECMS)는 동적계획법을 이용하여 계산된 전역 최적 운전 결과를 기반으로 상태에 따른 등가계수를 생성하여 실시간 제어에 적용하는 에너지 관리 전략이다.

DP는 전체 주행 프로파일 정보를 사전에 활용하여 주행 종료 시점까지의 모든 운전경로를 고려하는 전역 최적화 기법이다. 따라서 DP 계산 결과는 해당 주행 사이클 및 제약 조건하에서의 이론적 전역 최적해로 활용된다.

본 연구에서는 배터리 SOC를 상태변수로, 연료전지 출력을 제어변수로 정의하였다. 시간 단계 k에서 SOC_k일 때 주행 종료 시점까지 발생하는 최소 누적 수소 소비량은 Bellman 최적성 원리에 따라 식 (29) 같이 계산된다. 배터리 SOC의 상태천이는 식 (30)으로 계산하였다. 식 (31)은 최적화 과정에서의 상태 및

제어 변수의 제약 조건과 종단 조건을 나타낸다[25,26].

$$J_k(SOC_k) = \min\left[\dot{m}_{fc,k}\Delta t + J_{k+1}(SOC_{k+1})\right] \quad (29)$$

$$SOC_{k+1} = SOC_k - \frac{I_{bat},\Delta t}{Q_{bat}} \quad (30)$$

$$\begin{cases} SOC(N) = SOC(0) \\ SOC_L \le SOC(k) \le SOC_H \\ P_{fc,\min} \le P_{fc}(k) \le P_{fc,\max} \\ P_{bat,\min} \le P_{bat}(k) \le P_{bat,\max} \end{cases} \quad (31)$$

제약 조건과 종단 조건은 차량 특성을 반영하여 DP와 ECMS에 동일하게 적용하였다. 각 스택의 출력범위를 30-75 kW로 제한하여 전체 연료전지 출력은 60-150 kW 범위에서 결정되도록 하였다. 배터리 SOC의 허용범위는 0.4-0.8으로 설정하였으며, 초기 및 목표 SOC는 0.6으로 설정하였다. 또한 배터리의 전류 및 출력 조건은 제원과 동일하게 설정하였다.

역방향 DP 계산을 통해 각 상태와 시간에서의 최적 연료전지 출력 정책을 구한 후, 초기 SOC로부터 순방향 추적을 수행하여 최적 SOC 궤적을 계산하였다. 이 과정은 식 (32)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 SOC_k^*와 P_{fc}^*는 각각 DP에서 계산된 최적 SOC와 최적 연료전지 출력을 의미한다.

$$SOC_{k+1}^* = f(SOC_k^*, P_{dem,k}, P_{fc,k}^*) \quad (32)$$

DP를 통해 도출된 최적 동력 분배 특성을 A-ECMS에 반영하기 위해, 각 시간 단계의 최적 운전점에서 등가계수(λ_k)를 도출하였다. 먼저 DP에서 계산된 SOC_k^*와 해당 시점의 차량 요구출력 $P_{dem,k}$을 기준으로 식 (33) 의 Hamiltonian을 함수를 구성하고, 식 (34)의 순간 최소화 만족하는 등가계수를 도출한다. 이때 연료전지 출력은 DP로 계산된 최적 연료전지 출력 $P_{fc,k}^*$과 일치한다. 이 과정을 전체 주행구간에 대해 수행하여, 식 (35)와 같이 SOC와 요구 출력에 따른 각 시간 단계의 등가계수를 도출하였다[27-29].

$$H(SOC_k, P_{fc,k}, \lambda_k) = \dot{m}_{fc,k} + \lambda_k \frac{P_{bat,k}}{LHV_{H_2}} \quad (33)$$

$$P_{fc,k}^* = \arg\min_{P_{fc,k}}\left[H(SOC_k, P_{fc,k}, \lambda_k)\right] \quad (34)$$

$$\lambda_k = f(SOC_k^*, P_{dem,k}) \quad (35)$$

최종적으로 A-ECMS에서는 등가계수 λ_k를 통해, 식 (34)의 Hamiltonian 최소화를 통해 연료전지 출력을 결정한다. 이를 통해 실시간 제어 과정에서 미래 주행 정보를 직접 이용하지 않으면서도 DP에서 도출된 전역 최적 동력분배 특성을 등가계수에 반영할 수 있다.

에너지 관리 전략의 성능은 주행거리와 수소 소비량을 이용하여 산정한 연비(km/kg)를 기준으로 비교하였다. 그러나, 에너지 관리 전략에 따라 주행 종료 시점의 SOC에 차이가 발생할 수 있으므로, 실제 수소 소비량만을 기준으로 연비를 비교할 경우 배터리 에너지 사용량의 차이가 반영되지 않는다. 따라서 본 연구에서는 초기 SOC와 최종 SOC의 차이에 해당하는 배터리 에너지를 등가 수소 소비량으로 환산하여 수소 소비량을 보정하였다.

식 (36)과 같이 종료 시점의 SOC와 초기 SOC의 차이를 ΔSOC로 정의하였다. 식 (37)은 ΔSOC에 해당하는 배터리 에너지를 연료전지의 기준 효율과 수소의 저위발열량을 이용하여 등가 수소량으로 환산한 SOC 보정량을 나타낸다. 여기서 $E_{bat,dis}$와 $E_{bat,chg}$는 각각 방전 및 충전시 대응하는 배터리 에너지 환산 값이다. 연료전지 효율 η_{fc}은 최대 출력 기준 0.5로 적용하였다. 최종 SOC 차이가 반영된 보정 수소 소비량은 식 (38)과 같이 계산하였다.

$$\Delta SOC = SOC_f - SOC_0 \quad (36)$$

$$\Delta m_{H_2,SOC} = \begin{cases} \dfrac{E_{bat,dis}\Delta SOC}{\eta_{fc} LHV_{H_2}}, & \Delta SOC > 0 \\ \dfrac{E_{bat,chg}\Delta SOC}{\eta_{fc} LHV_{H_2}}, & \Delta SOC < 0 \end{cases} \quad (37)$$

$$m_{H_2,corr} = m_{H_2} - \Delta m_{H_2,SOC} \quad (38)$$

4. 결과 및 고찰

4.1 주행 사이클 및 요구 출력

에너지 관리 전략의 성능 평가를 위해 WHVC와 UDDS 주행 사이클을 적용하였다. Fig. 4와 Fig. 5에 각 주행 사이클의 속도 및 요구 출력 프로파일을 나타내었다. 본 연구에서는 대상 차량의 최고속도 제한을 고려하여 각 주행 사이클의 속도 프로파일 형상을 유지하면서 최고속도가 70 km/h가 되도록 전체 속도 데이터를 비례 조정하였다. WHVC와 UDDS의 주행거리는 각각 15.97 km와 9.19 km이고, 평균 요구 출력은 각각 85.5 kW 및 59.5 kW이다.

WHVC와 UDDS에는 동일한 차량 모델, 구성요소 특성 및 제어 제약조건을 적용하였다. 다만 주행 사이클별 요구출력 프로파일이 서로 다르므로 각 주행 사이클에 대해 DP를 독립적으로 수행하였으며, 각각의 DP 결과로부터 계산된 최적 SOC 및 연료전지 출력 궤적을 이용하여 A-ECMS의 등가계수를 개별적으로 도출하였다.

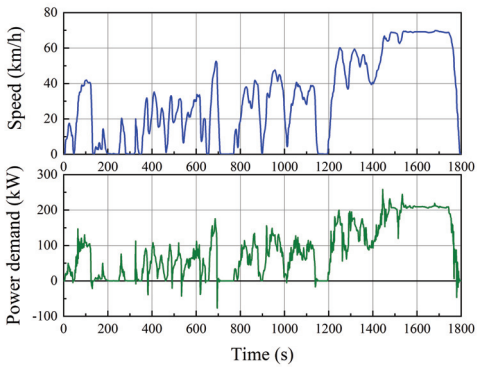


Fig. 4. Speed and power demand of WHVC cycle

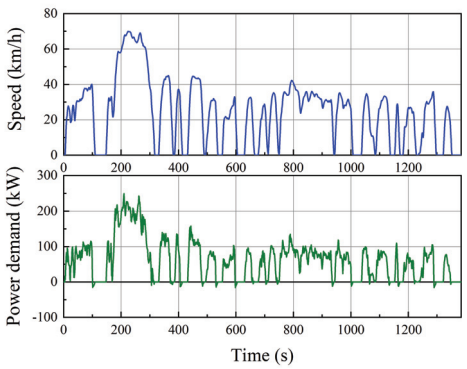


Fig. 5. Speed and power demand of UDDS cycle

4.2 S-ECMS와 A-ECMS 성능 비교

Fig. 6은 WHVC 주행 조건에서 S-ECMS와 A-ECMS의 연료전지 출력, 배터리 출력, SOC 및 누적 수소 소비량을 비교한 결과이다.

연료전지 출력을 보면 A-ECMS는 대체로 S-ECMS보다 높은 연료전지 출력을 사용하였다. 반면 배터리 운전에서는 상대적으로 충전량이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 모터 요구 출력이 낮은 초기 구간에서 연료전지 출력을 증가시켜 배터리를 충전하는 경향을 보였다.

SOC 결과를 보면, A-ECMS는 DP 기반 최적화 과정에서 도출된 등가계수를 적용함으로써, DP의 최적 SOC 궤적을 추종함을 확인하였다. A-ECMS의 SOC는 약 1,200 s까지 0.7 이상 증가한 후 감소하여 주행 종료 시 약 0.6에 도달하였다. 반면 S-ECMS의 SOC는 주행 후반부까지 지속적으로 감소하여 최종적으로 약 0.55에 도달하였다.

주행 후반의 고부하 구간에서는 요구 출력이 200 kW 이상으로 지속되기 때문에 A-ECMS는 종단 조건에 따라 초기 운전에서 높은 배터리 충전 상태를 확보하였다.

이에 따라 A-ECMS의 누적 수소 소비량은 S-ECMS 대비 높게 도출되었다. 그러나 S-ECMS의 낮은 수소 소비량은 배터리 에너지의 사용에 기인하므로, 두 전략의 연료 효율은 최종 SOC 차이를 보정한 수소 소비량을 기준으로 비교하는 것이 보다 정확하다.

UDDS 주행 조건에서의 S-ECMS와 A-ECMS에 대한 연료전지 출력, 배터리 출력, SOC 및 누적 수소 소비량 비교 결과를 Fig. 7에 나타내었다. UDDS는 WHVC 사이클과 비교하여 평균 요구 출력이 낮고, 주행 초반에 고출력 요구가 발생한다.

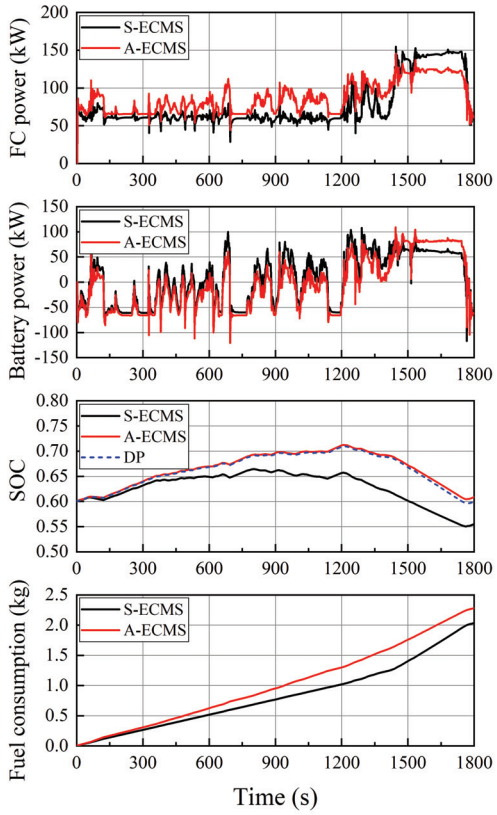


Fig. 6. Comparison of results between S-ECMS and A-ECMS under WHVC cycle

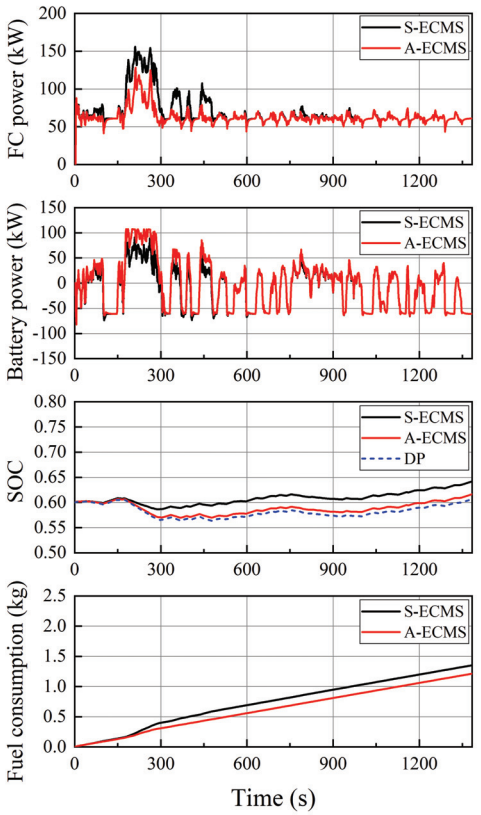


Fig. 7. Comparison of results between S-ECMS and A-ECMS under UDDS cycle

운전 전략에 따른 연료전지 출력 결과를 보면, A-ECMS는 고출력 요구 구간을 제외하고 거의 변동이 없는 최저 출력을 유지하였으며, S-ECMS도 비슷하지만 고출력 구간에서 출력이 조금 더 높게 운전되었다. 연료전지 출력에 따라서 배터리의 경우, A-ECMS는 방전 구간에서의 운전이 증가하였다.

SOC 분석 결과, 연료전지 출력이 높았던 S-ECMS는 주행 종료 시점의 SOC가 초기 대비 크게 증가한 반면, A-ECMS는 주행 중 SOC 변동폭은 다소 크나 종단 SOC가 초기 상태와 유사하게 유지되었다. 결과적으로 저출력 고효율 운전을 유지한 A-ECMS의 누적 수소 소비량이 S-ECMS 대비 적게 도출되었다.

A-ECMS에서 연료전지 운전점의 변동이 억제된 이유는 UDDS 사이클의 평균 요구 출력이 연료전지 최소 운전 조건인 60 kW(스택당 30 kW)보다 낮기 때문이다. 즉, A-ECMS는 연료전지의 출력을 변동시키는 대신 최저 운전 출력을 안정적으로 유지함으로써 고효율 영역에서의 운전 비율을 극대화한다.

Table 4에 운전 조건별 수소 소비량 보정 결과 및 연비 결과를 나타내었다. WHVC 사이클의 경우 종료 시점의 수소 소비량은 S-ECMS가 적었으나, 종단 SOC 편차를 보정한 수소 소비량은 S-ECMS 2.282 kg, A-ECMS 2.237 kg으로 A-ECMS가 더 우수한 결과를 보였다. 이에 따른 보정 연비는 각각 6.998 km/kg 및 7.138 km/kg으로, A-ECMS 적용 시 연비가 약 2.0% 향상되었다. UDDS 사이클 역시 보정 수소 소비량이 S-ECMS 1.143 kg, A-ECMS 1.131 kg으로 도출되어 A-ECMS의 소비량이 더 적음을 확인하였다. 연비는 각각 8.043 km/kg 및 8.125 km/kg으로 A-ECMS의 연비가 약 1.02% 상승하였다.

Table 4. Summary of performance results

Cycle	WHVC		UDDS	
Strategy	S-ECMS	A-ECMS	S-ECMS	A-ECMS
Initial SOC (%)	60.00	60.00	60.00	60.00
Final SOC (%)	55.51	60.87	64.19	61.64
△SOC (%)	-4.49	+0.87	+4.19	+1.64
Fuel consumption (kg)	2.033	2.281	1.352	1.213
Equivalent consumption (kg)	2.282	2.237	1.143	1.131
Fuel economy (km/kg)	6.998	7.138	8.043	8.125

5. 결 론

본 연구에서는 험로 주행 및 고등판 조건이 요구되는 대형 수소 연료전지 하이브리드 차량을 대상으로, 시스템 동특성을 반영한 통합 모델을 구축하고 실시간 에너지 관리 전략(S-ECMS 및 A-ECMS)의 운전 특성 및 연비 성능을 검증하였다. 본 연구를 통해 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

1) 스택 실험 데이터 기반으로 단일 셀 및 스택 전압 모델을 검증하여 연료전지 출력 예측 정확도를 확보하였으며, 냉각 및 연료공급 시스템 등 BOP의 동특성을 포함한 통합 파워트레인 모델을 수립함으로써 정확한 수소 소비량 산출 및 연비 평가 기반을 마련하였다.
2) 평균 요구 출력이 높은 WHVC 사이클에서 S-ECMS는 주행 후반부의 지속적인 고부하 조건에서 배터리를 과도하게 방전시켜 최종 SOC가 0.55 수준으로 저하되었다. 반면 A-ECMS는 DP 최적화 궤적을 실시간 반영하여 주행 전반부의 저부하 구간에서 연료전지 출력을 증대시켜 배터리를 선제적으로 충전하는 전략을 구사하였다. 이를 통해 주행 고부하 구간에 안정적으로 대응하고, 종단 SOC 편차 보정 기준 수소 소비량을 2.282 kg에서 2.237 kg으로 감축시켜 약 2.0%의 연비 향상(7.138 km/kg)을 달성하였다.
3) 평균 요구 출력이 연료전지 최저 운전 출력(60 kW)보다 낮은 UDDS 사이클에서 S-ECMS는 요구 출력 변동에 따라 연료전지 출력을 변동시켰다. 반면 A-ECMS는 연료전지 출력을 고효율 최저 운전점(스택당 30 kW)에 안정적으로 고정하고, 부족한 요구 출력은 배터리로 대응하는 최적 제어 특성을 보였다. 이를 통해 연료전지의 불필요한 출력 변동 손실을 최소화하여 S-ECMS 대비 보정 연비를 약 1.02% 향상(8.125 km/kg)시키는 동시에 종단 SOC를 초기 수준으로 일정하게 유지하였다.
4) 본 연구를 통해 DP 기반 전역 최적화 특성을 실시간 ECMS 등가계수에 반영하는 A-ECMS 제어 전략이 주행 프로파일 특성에 따라 동력 분배를 유연하게 최적화함을 입증하였다. 이는 미래 주행 정보를 직접 이용하지 않으면서도 실시간 제어 환경에서 수소 소비 절감과 SOC 유지 성능을 동시에 달성할 수 있음을 보여준다.

다만, 본 연구의 A-ECMS는 주어진 주행 사이클의 DP 오프라인 최적화 결과를 기반으로 도출되었으므로, 본 연구에서 제시한 결과는 해당 운전 조건에서의 성능 향상을 나타낸다. 따라서 향후 연구에서는 다양한 주행 조건 및 도로 환경에 효과적으로 대응할 수 있도록, 확장된 A-ECMS 알고리즘으로 활용하는 연구를 수행할 예정이다.

후 기

이 논문은 2022년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(No. KRIT-CT-22-035, 차세대전차용 저소음 동력장치 및 대구경 무장설계 기술).

References

1. L. Mauler, L. Dahrendorf, F. Duffner, M. Winter, and J. Leker, “Cost-effective technology choice in a decarbonized and diversified long-haul truck transportation sector: a U.S case study”, Journal of Energy Storage, Vol. 46, 2022, pp. 103891, doi: https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103891.
2. M. de las Nieves Camacho, D. Jurburg, and M. Tanco, “Hydrogen fuel cell heavy-duty trucks: review of main research topics”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 47, No. 68, 2022, pp. 29505-29525, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.271.
3. A. Ferrara, S. Jakubek, and C. Hametner, “Energy management of heavy-duty fuel cell vehicles in real-world driving scenarios: robust design of strategies to maximize the hydrogen economy and system lifetime”, Energy Conversion and Management, Vol. 232, 2021, pp. 113795, doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113795.
4. L. Guo, Z. Li, R. Outbib, and F. Gao, “Function approximation reinforcement learning of energy management with the fuzzy REINFORCE for fuel cell hybrid electric vehicles”, Energy and AI, Vol. 13, 2023, pp. 100246, doi: https://doi.org/10.1016/j.egyai.2023.100246.
5. N. Sulaiman, M. A. Hannan, A. Mohamed, E. H. Majlan, and W. R. Wan Daud, “A review on energy management system for fuel cell hybrid electric vehicle: issues and challenges”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 52, 2015, pp. 802-814, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.132.
6. H. Togun, H. S. S. Aljibori, A. M. Abed, N. Biswas, M. T. Alshamkhani, H. Niyas, H. I. Mohammed, F. L. Rashid, J. M. dhabab, and D. Paul, “A review on recent advances on improving fuel economy and performance of a fuel cell hybrid electric vehicle”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 89, 2024, pp. 22-47, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.09.298.
7. H. S. Lim, B. Kang, M. Ahn, and M. S. Kim, “Optimizing hydrogen utilization in fuel cell hybrid vehicles: modeling fuel cell systems and managing energy between batteries and fuel cells”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 99, 2025, pp. 819-835, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.12.150.
8. H. Li, A. Ravey, A. N’Diaye, and A. Djerdir, “Equivalent consumption minimization strategy for fuel cell hybrid electric vehicle considering fuel cell degradation”, Proceedings of the IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), Chicago, IL, United States, 2017, pp. 540-544, doi: https://doi.org/10.1109/ITEC.2017.7993328.
9. H. Sun, Z. Fu, F. Tao, L. Zhu, and P. Si, “Data-driven reinforcement-learning-based hierarchical energy management strategy for fuel cell/battery/ultracapacitor hybrid electric vehicles”, Journal of Power Sources, Vol. 455, 2020, pp. 227964, doi: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.227964.
10. C. P. Sahwal, S. Sengupta, and T. Q. Dinh, “Advanced equivalent consumption minimization strategy for fuel cell hybrid electric vehicles”, Journal of Cleaner Production, Vol. 437, 2024, pp. 140366, doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140366.
11. V. Mounica and Y. P. Obulesu, “Hybrid power management strategy with fuel cell, battery, and supercapacitor for fuel economy in hybrid electric vehicle application”, Energies, Vol. 15, No. 12, 2022, pp. 4185, doi: https://doi.org/10.3390/en15124185.
12. T. D. Gillespie, “Fundamentals of vehicle dynamics, revised edition”, SAE International, USA, 2021, Retrieved from https://saemobilus.sae.org/books/fundamentals-vehicle-dynamics-revised-edition-r-506?utm.
13. S. N. Manias, “Power electronics and motor drive systems”, Academic Press, USA, 2017, Retrieved from https://shop.elsevier.com/books/power-electronics-and-motor-drive-systems/manias/978-0-12-811798-9?utm.
14. F. Barbir, “PEM fuel cells: theory and practice”, Academic Press, USA, 2013, Retrieved from https://www.sciencedirect.com/book/monograph/9780123877109/pem-fuel-cells?utm.
15. R. O’Hayre, S. W. Cha, W. Colella, and F. B. Prinz, “Fuel Cell Fundamentals”, 3rd ed., John Wiley & Sons, USA, 2016, doi: https://doi.org/10.1002/9781119191766.
16. S. Yu and D. Jung, “Thermal management strategy for a proton exchange membrane fuel cell system with a large active cell area”, Renewable Energy, Vol. 33, No. 12, 2008, pp. 2540-2548, doi: https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.02.015.
17. S. Yu and D. Jung, “A study of operation strategy of cooling module with dynamic fuel cell system model for transportation application”, Renewable Energy, Vol. 35, No. 11, 2010, pp. 2525-2532, doi: https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.03.023.
18. J. Woo, Y. Choi, and S. Yu, “A study of auxiliary fuel cell power for cabin thermal comfort of electric buses”, Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 37, No. 2,

2026, pp. 155-166, (in Korean), doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2026.37.2.155.
19. J. Han, Y. Kim, J. Woo, and S. Yu, “Commercial hydrogen vehicle power distribution simulation using fuzzy control”, Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 34, No. 4, 2023, pp. 369-380, (in Korean), doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.4.369.
20. D. H. Trinh, X. L. Nguyen, Y. Choi, J. Woo, D. K. Song, and S. Yu, “Bypass capability evaluation of membrane humidifiers for high-power PEMFC systems using a multiphysics system-level framework”, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 176, 2026, pp. 111331, doi: https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2026.111331.
21. Y. Choi, Y. Yu, X. L. Nguyen, and S. Yu, “Cooling performance of large-capacity PEMFCs for heavy-duty fuel cell vehicles under varying cooling conditions”, Applied Thermal Engineering, Vol. 280, 2025, pp. 128421, doi: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.128421.
22. X. L. Nguyen, V. K. Phan, Y. Choi, J. Woo, and S. Yu, “Modeling heat and mass transfer through a gas-to-gas hollow-fiber membrane humidifier with cross- and counter-flow arrangements”, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 161, 2025, pp. 108478, doi: https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108478.
23. M. Piras, V. De Bellis, E. Malfi, R. Novella, and M. Lopez-Juarez, “Adaptive ECMS based on speed forecasting for the control of a heavy-duty fuel cell vehicle for real-world driving”, Energy Conversion and Management, Vol. 289, 2023, pp. 117178, doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117178.
24. Y. Sun, Q. Shang, and W. Jiang, “Equivalent minimum hydrogen consumption of fuzzy control-based fuel cells: exploration of energy management strategies for ships”, Batteries, Vol. 10, No. 2, 2024, pp. 66, doi: https://doi.org/10.3390/batteries10020066.
25. J. Han, Y. Park, and D. Kum, “Optimal adaptation of equivalent factor of equivalent consumption minimization strategy for fuel cell hybrid electric vehicles under active state inequality constraints”, Journal of Power Sources, Vol. 267, 2014, pp. 491-502, doi: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.05.067.
26. C. Musardo, G. Rizzoni, Y. Guezennec, and B. Staccia, “A-ECMS: an adaptive algorithm for hybrid electric vehicle energy management”, European Journal of Control, Vol. 11, No. 4-5, 2005, pp. 509-524, doi: https://doi.org/10.3166/ejc.11.509-524.
27. M. Sivertsson and L. Eriksson, “Design and evaluation of energy management using map-based ECMS for the PHEV benchmark”, Oil & Gas Science and Technology–Revue d'IFP Energies Nouvelles, Vol. 70, No. 1, 2015, pp. 195-211, doi: https://doi.org/10.2516/ogst/2014018.
28. C. Li, G. Hu, Z. Zhu, X. Wang, and W. Jiang, “Adaptive equivalent consumption minimization strategy and its fast implementation of energy management for fuel cell electric vehicles”, International Journal of Energy Research, Vol. 46, No. 11, 2022, pp. 16005-16018, doi: https://doi.org/10.1002/er.8296.
29. D. Fares, R. Chedid, F. Panik, S. Karaki, and R. Jabr, “Dynamic programming technique for optimizing fuel cell hybrid vehicles”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 40, No. 24, 2015, pp. 7777-7790, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.120.