

인공신경망을 이용한 플러그인 하이브리드 차량의 동력분배제어전략 개발 Development of Power Distribution Control Strategy for Plug-in Hybrid Electric Vehicle using Neural Network

심규현¹ · 이수지¹ · 이지석² · 남궁철² · 한관수³ · 황성호^{1*}

K. H. Sim, S. J. Lee, J. S. Lee, C. Namkoong, K. S. Han and S. H. Hwang

Received: 9 Jul. 2015, Revised: 20 Aug. 2015, Accepted: 25 Aug. 2015

Key Words : Plug-in Hybrid Electric Vehicle(플러그인 하이브리드 차량), Power Distribution Strategy(동력분배전략), Neural Network(인공신경망), Battery State of Charge(배터리 충전상태)

Abstract: The plug-in hybrid electric vehicle has a high fuel economy and can be driven long distances. Its different modes include the electric vehicle, hybrid electric vehicle, and only engine operating mode. A power management strategy is important to determine which mode should be selected. The strategy makes the vehicle more efficient using appropriate power sources for driving. However, the strategy usually needs a driving speed profile which is future driving cycle. If the profile is known, the strategy easily determines which mode is driven efficiently. However, it is difficult to estimate the speed profile for a real system. To address this problem, this paper proposes a new power distribution strategy using a neural network. The average speed and driving range are used as input parameters to train the neural network system. The strategy determines a limit for the use of the battery and the desired power is distributed between the engine and the motor simultaneously. Its fuel economy can increase by improving the basic strategy.

기호 설명

T_e, T_m : engine and motor torque, Nm
 T_{ci}, T_{co} : clutch input and output torque, Nm
 T_t : transmission torque, Nm
 T_d, T_w : differential gear and wheel torque, Nm

T_{cl} : clutch torque, Nm
 I_e, I_m : engine and motor inertia, $kg \cdot m^2$
 I_c, I_t : clutch and transmission inertia, $kg \cdot m^2$
 I_d, I_w : differential gear and wheel inertia, $kg \cdot m^2$
 α_e : engine angular acceleration, rad/s^2
 α_c : clutch angular acceleration, rad/s^2
 α_m : motor angular acceleration, rad/s^2
 α_t : transmission angular acceleration, rad/s^2
 α_d : differential gear angular acceleration, rad/s^2
 α_w : wheel angular acceleration, rad/s^2
 $F_{traction}$: traction force, N
 F_{drag} : drag friction force, N
 F_{roll} : roll friction force, N
 F_{app} : applied normal force, N
 a : vehicle acceleration, m/s^2
 M : vehicle mass, kg
 R : radius of tire, m

* Corresponding author: hsh@me.skku.ac.kr

1 Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, 2066 Seobu-ro, Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, 16419, South Korea

2 R&D Center, SECO Seojin Automotive Co., Ltd., 313, Gongdan 1-daero, Siheung-si, Gyeonggi-do, 15109, South Korea

3 Research & Business, Sungkyunkwan University, 2066 Seobu-ro, Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, 16419, South Korea

Copyright © 2015, KSFC

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.

N_f : number of active friction surfaces
 A_{app} : applied piston area, m^2
 p_{app} : applied piston pressure, N/m^2
 r_{eq} : equivalent radius of clutch disc, m
 a : inner radii, m
 b : outer radii, m
 sgn : signum function
 ω : clutch relative speed, rad/s
 OCV : open circuit voltage, V
 R_b : resistance of battery, Ω
 P_{MG} : power of motor and generator, W
 P_{tot} : desired power, W
 P_e : power of engine, W
 P_m : power of motor, W
 V_b : voltage of battery, V
 C_{max} : maximum battery capacity, Ah
 SOC : state of charge
 SOC_{init} : initial state of charge
 SOC_{traj} : trajectory of the state of charge
 SOC_{inst} : instantaneous state of charge
 i : current, A
 d : slope of depleting, sec^{-1}
 t : time, sec
 \bar{v}_{est} : estimated average velocity, m/s
 $dist_{est}$: estimated distance, m

1. 서 론

플러그인 하이브리드 차량 (Plug-in hybrid electric vehicle, PHEV)은 기존 하이브리드 차량에서 전기차로 넘어가는 중간 단계의 기술로 여겨왔으며 대부분 미국과 일본에서 상용차로 출시되어왔다. 하지만 최근 클린 디젤을 주로 연구하던 유럽 완성차 업체에서 향후 몇 년 안에 플러그인 하이브리드 차량의 출시 계획을 발표하고 개발에 박차를 가하고 있으며, 세계적으로 그 기술에 대해 주목받고 있다. 특히 세계 친환경차 시장조사 예측에 따르면 2016년 이후로 플러그인 하이브리드 차량이 전기차의 수를 넘을 것으로 예상하였다¹⁾.

플러그인 하이브리드 차량은 기존 하이브리드 차량과 다르게 외부 전기에너지를 이용하여 충전이 가능하며, 전기에너지 사용의 자유도가 높기 때문에 적절한 동력원의 분배가 중요하다. 동력분배전략

(power management strategy)은 기존 하이브리드 차량 때부터 활발히 연구가 진행되었다. 대표적으로 동적 계획법 (dynamic programming) 이용한 전략과 등가 소모량 최소화 전략 (equivalent consumption minimization strategy, ECMS) 이 있다^{2), 3), 4)}. 이 방법은 최적 제어 알고리즘으로 주행에 필요한 동력원을 적절히 분배하여 최적의 연비를 도출하는 제어 방법이다. 동적 계획법은 전역 최적화 방법(global optimization)으로 그 시스템의 최적 연비로 주행하도록 제어하지만, 계산 부하가 클 뿐만 아니라 주행 이전에 속도에 대한 정보를 알고 있을 때 적용이 가능하다²⁾. 반면에 ECMS는 국부 최적화 방법(local optimization)이며 현재와 미래의 연료 사용량에 따라 제어하는 방법으로, 실제 차량에 적용하는 연구도 진행되고 있다^{5), 6)}. 한편, 실제 차량에서는 실시간으로 변하는 도로상황과 운전자의 개입으로 인하여 최적의 연비로 동력을 분배하기 어렵다. 따라서 휴리스틱 (heuristic)하게 시스템을 제어하는 방법의 연구도 진행되었다. 차량의 효율 관점 등의 특정한 룰(rule)을 정하여 제어하는 룰 기반 전략 (rule-based strategy), 퍼지 이론 (fuzzy logic) 등을 이용한 전략 등의 방법이 있다^{2), 7), 8)}.

플러그인 하이브리드 차량은 배터리가 충분히 충전되어있을 때 전기차와 같이 전기에너지만 사용하는 CD 모드(charge depleting mode)로 주행하고, 이후 배터리가 모두 소모되었을 때 CS 모드 (charge sustaining mode)로 주행하는 두 가지 모드를 가지고 있다. CS 모드는 엔진과 모터로 주행하는 기존 하이브리드 주행과 동일하다⁷⁾. 하지만 CD 모드로 전기 에너지를 모두 소모할 시, 엔진 효율이 좋지 않아 전기 에너지가 필요한 구간에서 엔진으로 주행하여 연비에 나빠질 수 있다.

본 연구에서는 실제 차량에 적용이 용이한 동력분배전략을 개발하고 시뮬레이션을 통해 연비를 평가한다. 연비 평가를 위한 시뮬레이터를 개발하고, 동력분배전략으로 배터리 사용량을 제어하는 배터리 SOC (state of charge) 소모 기울기를 제안한다. 연비 평가 시뮬레이션을 통해 기존 룰 기반 전략과 개발된 제어 전략이 적용된 차량의 연비를 비교 분석한다.

2. 연비 평가 시뮬레이터

2.1 차량 동역학 및 시스템 모델링

차량 구성 요소는 엔진, 모터, 클러치, 변속기, 배터리

기존의 전기에너지만 우선 이용하여 주행하는 전략은 필요에 따라 화석연료와 전기에너지를 같이 사용하여 주행하는 전략과 비교할 때, 전기에너지만으로 운전하였기 때문에 순간 연비 측면에서 무조건 우위에 있을 수 있다. 하지만 전기에너지를 일찍이 모두 소모된 상황에서는 실제 모터가 엔진보다 효율이 좋은 구간에서 엔진으로 운전할 수밖에 없기 때문에 전체 연비 측면에서 효율이 떨어질 수 있다. 따라서 전체 주행에 있어서 차량이 가진 에너지를 최대한 효율적으로 이용하려는 목적을 달성하기 위해, 본 연구에서는 전기에너지의 총 사용량을 동일하게 제한하여 비교한다.

MATLAB/Simulink를 이용하여 앞서 설계한 시스템 및 구성요소로 연비 평가 시뮬레이터를 구축하였다. 각 부품에 대한 모델은 Argonne National Laboratory에서 제작한 Autonomie의 차량 시뮬레이터의 데이터를 활용하여 구축하였다. Table 1은 차량 및 구성요소의 제원이며, Fig. 3은 개발된 시뮬레이터 구성이다.

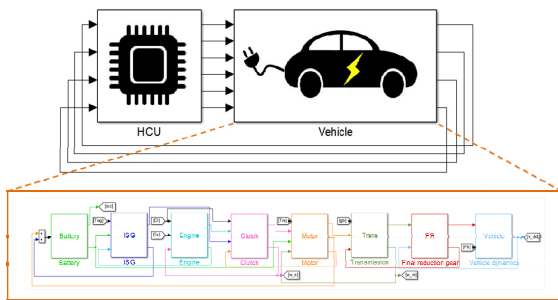


Fig. 3 Simulator for evaluation of fuel economy

Table 1 Specification of Vehicle

Engine	Type	Diesel
	Max. power	65 kW
	Speed range	1000~4000 rpm
Motor	Max. Power	60 kW
	Speed range	1~6000 rpm
Transmission	Type	DCT
	Gear ratio	6 speed
Battery	Type	Li-ion
	Capacity	37 Ah
Vehicle	Mass	1720 kg
	Front area	2.25 m ²
	Drag coefficient	0.29
	Rolling resistance coefficient	0.014

3. 동력 분배 전략

3.1 PHEV CD-CS 전략 (PHEV CD-CS strategy)

PHEV CD-CS 전략은 기존 플러그인 하이브리드 차량의 전기 주행 (CD 모드) 후 하이브리드 주행 (CS 모드)으로 운전하는 방식이다.

3.2 배터리 소모 기울기 및 전략에 따른 결과

배터리 소모 기울기 제어 전략은 주행 모드에 따라 배터리 SOC의 소모 기울기를 제안하고, 이에 따라 엔진과 모터를 제어하여 전체 주행의 동력을 적절하게 분배하는 방식이다¹²⁾. 배터리 소모 기울기는 다음과 같다.

$$SOC_{traj} = SOC_{inst} - d \times t \quad (14)$$

주행 모드에 따라 순간 기울기 d 가 결정되며 배터리 SOC에 따라 배터리 소모 기울기 SOC_{traj} 와의 비교를 통해 어떤 동력에 중점을 두고 운전할지 결정한다.

$$P_{tot} = \begin{cases} P_e, & SOC < SOC_{traj} \\ P_m, & SOC > SOC_{traj} \end{cases} \quad (15)$$

Fig. 4는 전략을 나타낸 흐름도이며, Fig. 5은 PHEV CD-CS 전략과 배터리 소모 기울기 전략에 따른 배터리 SOC의 시뮬레이션 결과를 비교한 그래프이다.

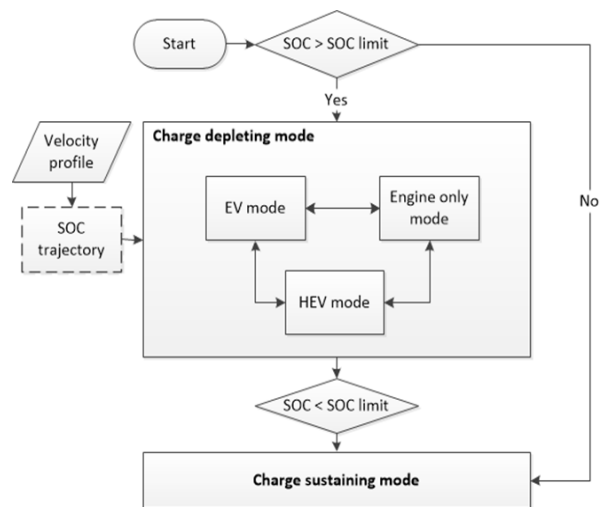


Fig. 4 Flow chart of mode change

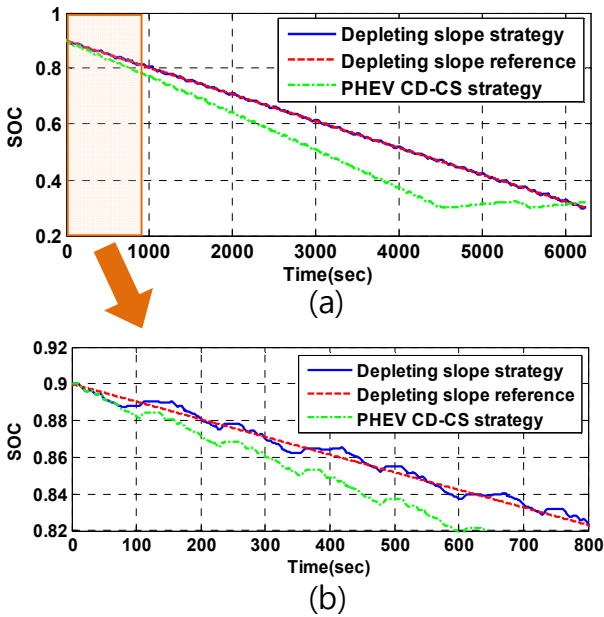


Fig. 5 Result of SOC on comparing different strategies by (a) 6000 sec and (b) 800 sec

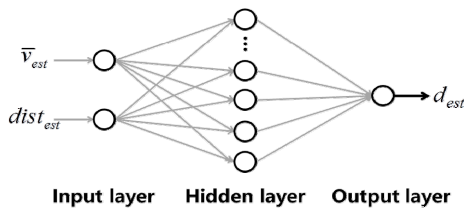


Fig. 6 Concept of neural network

3.3 인공신경망을 이용한 배터리 소모 기울기 제어 전략(Control strategy of depleting slope) 주행 모드에 따라 연비를 비교 분석하고, 이를 데이터로 이용하여 배터리 소모 기울기 제어 전략을 제안하고자 한다.

도심 주행 모드 UDDS (urban dynamometer driving schedule)를 13개 구간으로 분할하여 각각을 주행모드로 사용하고, 이를 원하는 시간 동안 반복 주행하여 평균 주행 속도와 주행 거리가 다른 65개의 새로운 주행 모드를 도출하였다. PHEV CD-CS 전략과 배터리 소모 기울기 전략을 적용한 차량에 대하여 각각 연비를 비교한다. Table 2는 주행 조건 및 비교한 결과이며, 밀집 친 조건일 때 배터리 소모 기울기 전략을 적용 차량이 PHEV CD-CS 전략보다 연비가 향상됨을 연비 평가 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 따라서 이를 이용하면 기존의 전략보다 연비가 향상된 제어 전략을 도출할 수 있다. 하지만 주행 속도와 주행 거리에 따라 연비가 향상될 수 있는 기울기가 다르며 각각의 관계를 수학적으로 표현하기 어렵다.

이때 인공신경망 (neural network) 이론을 이용하여 제어 전략을 설계하고자 한다.

인공신경망 이론이란 인간의 두뇌와 동일한 능력을 갖춘 시스템을 개발하는데 목적이 있으며, 뇌의 뉴런들이 서로 연결되어 있는 관계에서 착안하여 주어진 데이터를 기반으로 학습한다면 입력값과 출력값의 관계가 복잡한 시스템을 모델링 할 수 있다¹³⁾.

앞서 주행 모드에 따라 비교 분석한 데이터를 이용하여 인공신경망을 학습하였으며, 주어진 주행 상황에서 동력을 적절하게 분배하여 연비가 향상될 수 있는 주행을 하도록 새로운 제어 전략을 설계한다. 입력값은 평균 주행 속도 \bar{v}_{est} 와 주행 거리 $dist_{est}$, 출력값은 향상된 연비가 도출되는 배터리 소모 기울기 d_{est} 이다. MATLAB의 Neural Network Fitting Tool을 이용하여 인공신경망의 학습을 진행하였으며, 입력층은 2개, 출력층은 1개이다. 은닉층은 입력값이 주어졌을 때 원하는 출력값을 도출하기 위한 계산의 중간 단계이다. 은닉층의 수에 따라 결과의 오류값이 달라지는데, 은닉층의 수가 많으면 학습한 입력에 대해서는 결과의 오류는 낮출 수 있으나 경험하지 못한 새로운 입력에 대해서는 결과가 좋지 못할 수 있다¹⁴⁾. 따라서 적절하게 제어 전략을 설계하기 위해 은닉층의 수를 조정하면서 인공신경망의 학습을 진행하였다. Fig. 6는 인공신경망의 개요이다.

4. 시뮬레이션 결과 및 전략 비교

PHEV CD-CS 전략과 배터리 소모 전략을 차량 시뮬레이터에 적용하여 시뮬레이션 하였다. Fig. 7은 배터리 소모 전략을 적용한 모델의 UDDS 모드를 6번 주행하였을 때 주행 속도, 배터리 SOC, 주행 모드(mode) 변화의 시뮬레이션 결과이다. 이때, 모드1은 EV 모드로 모터만으로 주행, 모드2는 HEV모드로 모터와 엔진으로 주행, 모드3는 엔진으로만 주행하는 구간이다. 각 주행 상황에 따라 배터리 소모 전략에 따라 기울기가 주어졌을 때 배터리 SOC가 이를 따라 제어되도록 주요 동력원을 결정한다. 시뮬레이션의 일정 구간은 배터리 소모 전략에서 지정한 기울기가 급격하여 배터리 SOC가 이를 따라가지 못하는 부분이 나타나는데, 이는 배터리 SOC가 기준 SOC 제어보다 높기 때문에 모터만으로 운전하면 효율적이라는 의미이다. 그 구간은 EV 모드 (mode 1)로 주행하도록 제어하는 기울기를 위와 같이 급격한 기울기 값을 적용하였다. 모드 변화 결과를 보았을 때 기울기가

가파른 구간에서 EV 주행을 함으로써 제어가 정확히 이루어짐을 확인하였다.

Fig. 8 은 두 전략에 따른 연비 비교 및 향상 정도를 나타낸 결과이다. 주행 거리가 증가할수록 엔진 구동이 증가하고, 이에 따른 화석 연료 사용량의 증가로 연비가 점차 떨어지는 것을 볼 수 있다. 하지만 PHEV CD-CS 전략의 경우에는 UDSS 주행모드를 6 번 반복 주행하였을 때 연비가 가장 좋지 못하며 그 이후 다시 증가하는 등, 연비의 변동이 심한 것을 볼 수 있다. 이는 주행 상황에서 모터로 운전하면 효율이 좋은 구간을 전기에너지가 모두 소모되었기 때문에, 엔진으로 운전하여 나타난 결과이다. 기존 PHEV CD-CS 전략 같은 경우에는 배터리의 SOC가 일정 이하 감소하게 되면 배터리의 SOC를 일정하게 유지하도록 동력분배를 하게 되어있다. 따라서 어느 시점 이후 전기에너지가 모두 소모되면 주로 엔진으로 운전을 하게 되어 연비가 급격하게 변동될 수 있고, 이후 주행거리가 증가할 때 다시 HEV 주행을 통해 일정 연비로 도달하게 된다.

Table 2 Driving cycles for the comparison

Driving cycles		Average velocity (km/h)	Distance (km)				
Part1		13.2	16.5	19.8	24.2	27.5	31.9
Part2		18.4	21.7	27.1	32.5	38.0	43.4
Part3		20.6	24.4	32.5	36.6	42.7	48.8
Part4		20.9	25.5	31.9	38.2	44.6	51.0
Part5		22.6	28.3	33.0	42.4	47.1	51.8
Part6		22.7	27.3	34.1	40.9	47.7	54.5
Part7		22.9	26.9	33.7	40.4	47.1	53.9
Part8		23.3	27.4	35.2	43.0	48.5	54.8
Part9		31.0	32.5	43.3	54.2	65.0	75.8
Part10		34.4	39.8	53.0	62.9	69.6	79.5
Part11		35.0	41.5	53.3	65.2	77.0	88.9
Part12		37.6	43.3	57.7	64.9	79.3	86.6
Part13		56.8	63.1	78.9	94.6	110.4	126.2

UDSS 주행 모드를 4번 반복 주행하였을 때 기존의 PHEV CD-CS 전략이 새로운 제어전략보다 연비가 조금 높게 나타났다. 하지만 UDSS 모드를 5번 이상 반복주행 시, PHEV CD-CS 전략의 연비가 배터리 소모 기울기 전략을 적용했을 때보다 낮을 뿐만

아니라 연비의 변화 정도가 크게 나타났다. 반면, 배터리 소모 기울기 전략을 적용하였을 때 기존 전략 대비 연비가 최대 2.1% 향상되었으며, 주행 거리 변화에 따른 연비 감소도 줄일 수 있다.

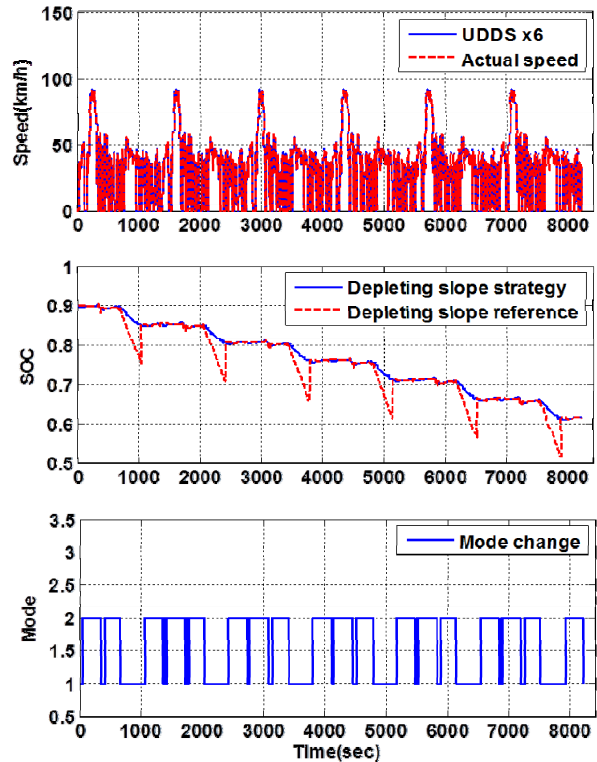


Fig. 7 Results of simulation with the depleting slope strategy at UDSS

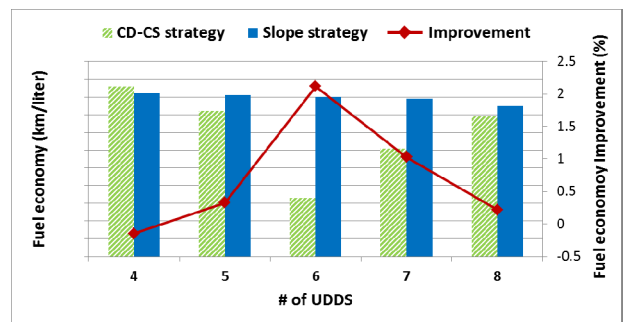


Fig. 8 Results of fuel economy and its improvement for the comparison

5. 결론

본 논문에서는 플러그인 하이브리드 차량의 연비 평가 시뮬레이터 및 인공지능망을 이용한 동력분배 전략을 개발하였다. 차량 동역학 및 시스템 모델링, 연비 평가 기준을 통해 연비 평가 시뮬레이터를 구축하였다. 주행 평균 속도 및 주행 거리가 다른 65개의 주

행 모드를 시뮬레이션하여, 기존 PHEV 제어전략보다 연비가 향상될 수 있는 배터리 소모 기울기를 비교 분석하였다. 앞서 분석한 데이터를 이용하여 인공신경망 학습을 하였으며, 이를 통해 배터리 소모 기울기 전략을 개발하였다. 개발된 제어 전략을 적용한 차량의 연비는 기존 제어 전략으로 주행하였을 때보다 최대 2.1% 향상되었으며, 주행 거리에 따른 연비 감소에 덜 민감하게 반응하였다.

후 기

이 연구는 2015년도 산업통상자원부의 “산업융합 원천기술개발사업”의 연구비 (과제번호: 10047586) 일부지원에 의하여 수행되었음을 밝힙니다.

References

- 1) IHS Inc., "EV Charging Infrastructure report," IHS Automotive report, 2015
- 2) A. Sciarretta and L. Guzzella, "Control of Hybrid Electric Vehicles," IEEE Control Systems, Vol.27, No.2, pp. 60-70, 2007.
- 3) S. G. Wirasingha, and A. Emadi, "Classification and Review of Control Strategies for Plug-In Hybrid Electric Vehicles," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.60, No.1, pp.111-122, 2011.
- 4) L. Serrao, S. Onori, and G. Rizzoni, "A Comparative Analysis of Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicles," Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, Vol.133, No.3, 031012, 2011.
- 5) C. Musardo, G. Rizzoni, and B. Staccia, "A-ECMS: An Adaptive Algorithm for Hybrid Electric Vehicle Energy Management," The 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference, pp.1816-1823, 2005.
- 6) T. Nuesch, A. Cerofolini, G. Mancini, N. Cavina, C. Onder, and L. Guzzella, "Equivalent Consumption Minimization Strategy for the control of Real Driving NOx Emissions of a Diesel Hybrid electric Vehicle," Energies, Vol.7, No.5, pp.3148-3178, 2014.
- 7) P. B. Sharer, A. Rousseau, D. Karbowski, S. Paagerit, "Plug-in Hybrid Electric Vehicle Control Strategy: Comparison between EV and Charge-Depleting Options," SAE Technical Paper, 2008.
- 8) H. Alipour, B. Asaei, and G. Farivar, "Fuzzy Logic Based Power Management Strategy for Plug-in Hybrid Electric Vehicles with Parallel Configuration," International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ' 12), 2012.
- 9) J. Deur, J. Petric, J. Asgari, and D. Hrovat, "Modeling of Wet Clutch Engagement Including a Thorough Experimental Validation," SAE Technical Paper, 2005.
- 10) A. Khajepour, M.S. Fallah, and A. Goodarzi, "Electric and hybrid Vehicles: Technologies, Modeling and Control - A Mechatronic Approach," Wiley, pp. 214-219, 2014.
- 11) SAE International, "SAE J1711 - Recommended Practice for Measuring the Exhaust Emissions and Fuel Economy of Hybrid-Electric Vehicles, Including Plug-in Hybrid Vehicles," SAE International Surface Vehicle Recommended Practice, 2010.
- 12) K. H. Sim, H. U. Jeong, D. R. Kim, T. K. Lee, K. S. Han, and S. H. Hwang, "Control Strategy with the Slope of SOC Trajectory for Plug-in Diesel Hybrid Electric Vehicle with Dual Clutch Transmission," The 25th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS28), 2015.
- 13) C.H. Chen, "Fuzzy Logic and Neural Network Handbook," McGraw-Hill, 1996.
- 14) N. Murata, S. Yoshizawa, and S. Amari, "Network Information Criterion-Determining the Number of Hidden Units for an Artificial Neural Network Model," IEEE Transactions on Neural Networks, Vol.5, No.6, pp.865-872, 1994.