

병렬형 하이브리드 자동차의 파워트레인 설계와 내연기관의 최적운전을 위한 퍼지논리제어

배태석, 임경배, 강태규, 임덕영, 최재호
충북대학교

PHEV Power Train Design and Fuzzy Logic Control for Optimal Engine Drive

Taesuk Bae, Kyungbae Lim, Taekyu Kang, Deokyoung Lim, Jaeho Choi
Chungbuk National University

ABSTRACT

본 논문에서는 병렬형 하이브리드 자동차 (PHEV) 파워트레인 구성요소 정격설계와 내연기관의 최적 운전을 위한 퍼지논리제어에 대하여 기술한다. 내연기관, 전동기, Energy Storage System (ESS)과 같은 파워트레인 구성요소들의 정격은 에너지 개념과 Electrical Peaking Hybrid (ELPH)를 이용하여 설계하였으며 내연기관의 운전효율을 증가시키기 위해 퍼지논리를 사용하여 파워트레인의 전력흐름을 제어하였다. 제안된 퍼지논리는 설계된 구성요소 정격값을 바탕으로 PHEV PSIM 시뮬레이터를 구성하고 시뮬레이션 하여 그 효율성을 분석하였다.

1. 서론

하이브리드 자동차는 일반적으로 차량의 구동력 공급을 위해 내연기관과 전동기를 함께 사용한다. 두 가지 이상의 동력원을 함께 사용하는 것은 차량의 파워트레인 제어를 복잡하게 만들지만 내연기관의 운전효율 증가와 회생제동사용으로 기존 내연기관 자동차 대비 효율적인 운전이 가능하다. PHEV는 내연기관과 전동기가 기계적으로 연결되어 있어 내연기관이 항상 최대 효율점에서 동작할 수 없다는 단점이 있지만 에너지의 다중변환 없이 내연기관에서 구동륜으로 동력 전달이 가능하다. 또한, 에너지 전달 효율이 높고 자동차에 필요한 구동력을 내연기관과 전동기에서 동시에 공급할 수 있으므로 전동기나 ESS의 용량을 줄일 수 있고 발전기가 필요 없다는 장점이 있다.^[1] PHEV에서 전동기와 기계적으로 연결된 내연기관의 최적 운전점 동작을 위해서는 적절한 전력제어 알고리즘이 필요하며 퍼지논리는 이를 실현하기 위한 좋은 방법이라 할 수 있다.^[2]

본 논문에서는 PHEV 내연기관의 운전효율을 높이기 위해 퍼지논리를 사용하여 파워트레인의 전력흐름을 제어하였으며 ELPH를 바탕으로 정적 PHEV PSIM 시뮬레이터를 구성하였다.^[2,3] 제안된 퍼지논리제어는 구성된 PSIM 시뮬레이터를 사용하여 그 효율성을 확인하였다.

2. 파워트레인 구성요소 설계

2.1 내연기관 정격설계

내연기관의 정격설계를 위해서는 빈번한 가속과 감속이 존재하는 도시형 운행패턴과 비교적 정속도 운행을 하는 고속도로형 운행패턴이 고려되어야 한다. 두 가지 운행 패턴 중 도시

형 운행 패턴에는 빈번한 회생제동이 존재하므로 필요한 내연기관의 전력은 고속도로형 운행패턴이 도시형에 비해 크게 된다. 내연기관의 정격은 두 운행 패턴 중 큰 값으로 설계되어야 하므로 고속도로형 운행패턴에서 필요한 내연기관의 전력을 나타내는 (1)로 내연기관의 정격을 설계한다.

$$P_e = \frac{V}{\eta_{te}} \left(\frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^2 + M g f_r + M g \sin(\theta) \right) \quad (1)$$

여기서 V 는 자동차 속도, η_{te} 는 트랜스미션 효율, ρ_a 는 공기밀도, A_f 는 자동차 전방 면적, C_D 는 공기저항계수, M 은 자동차 총 질량, g 는 중력가속도, f_r 은 회전마찰계수, θ 는 경사각을 나타낸다.

2.2 전동기 정격설계

자동차의 구동력 중 가속에 필요한 동력은 전동기에서 공급하고, 자동차 구동시 발생하는 저항성분 등의 정적인 동력은 내연기관에서 공급한다고 가정하면, 전동기 정격은 가속능력(정지상태에서 특정 속도로 가속 할 때 걸리는 시간)에 의하여 (2)와 같이 설계될 수 있다.

$$P_m = \frac{\delta M}{2t_a} (V_f^2 + V_b^2) \quad (2)$$

여기서 t_a 는 가속시간, V_f 는 최종 속도, V_b 는 전동기 기저속도에 해당하는 자동차 속도이다. 하지만 자동차 구동력 중에 정적인 동력만을 내연기관이 공급한다고 가정하였으므로 (1)에서 자동차 가속에 활용될 수 있는 여분의 전력이 발생할 수 있다. 이를 바탕으로 최종 전동기 정격은 (2)에서 (1)로부터 발생할 수 있는 여분의 평균 전력 P_{ea} 를 뺀 (3)으로 설계된다.

$$P_{mf} = P_m - P_{ea} \quad (3)$$

3. 퍼지논리제어

PHEV의 내연기관 속도는 자동차 속도에 독립적이지 않기 때문에 ESS의 잔존용량 (SOC)이나 필요한 구동력 등에 따라 내연기관의 운전효율을 증가시킬 수 있는 적절한 제어알고리즘이 필요하다. 퍼지논리제어는 내연기관의 운전효율 증대를 위해 전동기와 내연기관 사이에 구동토크 분배점 결정에 활용될 수 있다. 그림 1은 퍼지논리제어에 사용된 구동토크 T_d 와 SOC 및 내연기관의 출력토크 T_e 의 소속 함수 (membership function)를 나타내며 그림 2는 퍼지논리제어의 블록다이어그램을 보여준다. 퍼지논리제어의 출력은 내연기관의 출력토크처럼

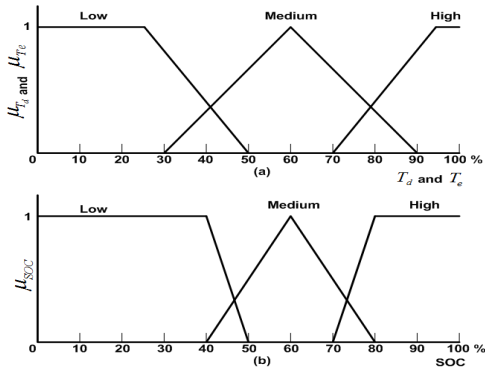


그림 1 T_d , SOC, T_e 의 소속 함수.
Fig. 1 Membership function of T_d , SOC, T_e .

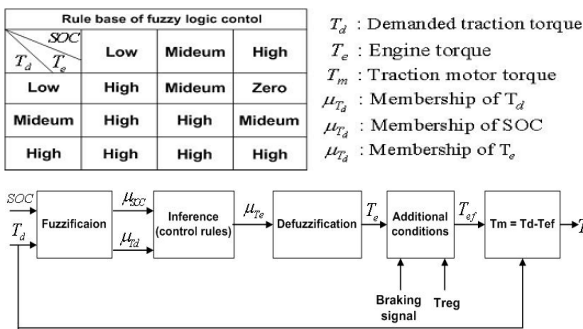


그림 2 퍼지논리제어 블록 다이어그램.
Fig. 2 Block diagram of fuzzy logic control.

T_e 지만 제동 등의 특별한 경우를 고려하여 최종적인 내연기관의 출력토크지령 T_{ef} 를 만들어낸다. 전동기의 출력토크지령 T_m 은 필요한 구동토크 T_d 에서 T_{ef} 를 빼서 구할 수 있다.

4. 시뮬레이터 설계 및 시뮬레이션 결과

표 1 시뮬레이션 파라미터.
Table 1 Simulation parameters.

Parameters	Value
Vehicle total mass (M)	1500kg
Tire radius (r)	0.3m
Rolling resistance coefficient (f_r)	0.01
Aerodynamic drag coefficient (C_D)	0.3
Frontal area (A_f)	2.0m ²
Air density (ρ_a)	1202kg/m ³
Transmission efficiency (η_t)	0.9
Motor efficiency (η_m)	0.85

표 2 구성요소 설계에 사용된 자동차 능력 사양.
Table 2 Vehicle performance spec for components design

Specification	Value
Motor base speed	1850rpm
Motor maximum speed	6000rpm
Engine maximum speed	6000rpm
Acceleration time(0~100km/h)	10±1s
Maximum speed	160km/h
Gear ratio	3.95

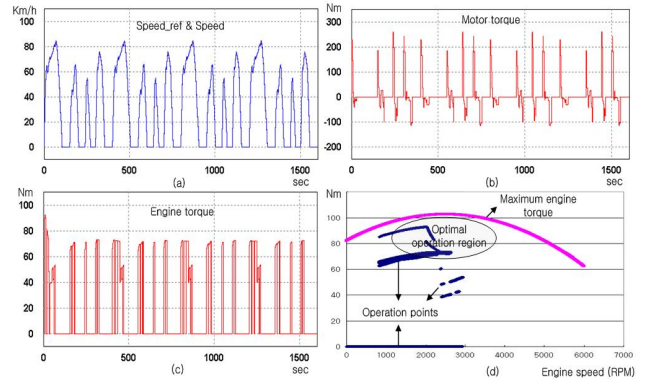


그림 3 시뮬레이션 결과: (a)자동차 속도지령과 실제 속도, (b) 전동기 토크, (c)내연기관 토크, (d)내연기관 운전점.
Fig. 3 Simulation result: (a)Vehicle speed reference and vehicle speed, (b)motor torque, (c)engine torque, (d)engine operation point.

제안한 퍼지논리제어의 효율성 판단을 위해 2장으로부터 PHEV 구성요소들의 정격을 설계하고 자동차 역학특성을 바탕으로 backward facing approach 방식과 부분적인 forward facing approach 방식을 사용하여 PSIM 시뮬레이터를 구성하였다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 파라미터들을 나타내고 표 2는 구성요소 설계에 사용된 자동차 능력 사양을 보여준다. 그림 3 (a)는 자동차의 속도지령과 실제 속도를 보여준다. 속도지령에 극심한 가속 구간이 없으므로 자동차 속도는 지령속도를 잘 추종한다. 그림 3 (b)와 (c)는 전동기와 내연기관의 토크를 보여준다. 전동기 토크 대비 내연기관의 토크가 정적인 출력을 보이는 것을 확인할 수 있는데 이는 가속에 필요한 구동력은 전동기에서, 저항성분 극복을 위한 구동력은 내연기관에서 출력되고 있는 것을 나타낸다. 그림 3 (d)는 시뮬레이션에서 형성된 내연기관의 운전점을 보여준다. 그림에 보여 지듯이 퍼지논리제어에 의해 내연기관 운전점이 비교적 고효율 부근에서 형성되는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 PHEV 파워트레인 구성요소의 정격을 설계하고 내연기관의 운전효율을 증대시키기 위한 퍼지논리제어를 제안하였다. 제안된 퍼지논리제어의 효율성을 확인하기 위해 설계된 구성요소 정격 값과 퍼지논리제어를 바탕으로 PSIM 시뮬레이터를 구성하였으며 시뮬레이션 결과 퍼지논리제어에 의해 내연기관의 운전점이 비교적 고효율 부근에서 형성되는 것을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] 임덕영, 임재관, 최재호, 정교범, "직렬형 HEV 운전 특성 분석을 위한 PSIM 시뮬레이터", 전력전자학회논문지, vol. 15, no. 6, pp. 487-497, 2010년 12월.
- [2] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Ali Emadi, Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles, pp. 253-279, CRC press, 2nd edition.
- [3] Niels J. Schouten, Mutasim A. Salman, and Naim A. Kheir, "Fuzzy Logic Control for Parallel Hybrid Vehicles", IEEE Trans. Ctrl. Sys. Tech, vol. 10, no. 3, may 2002.