

## 인공지능을 이용한 병렬 복합형 전기자동차 구동 시스템의 제어

구의서, 김우석, 최현성, 이현동, 설승기  
서울대학교 공과대학 전기공학부

### Control of Parallel Hybrid Electric Vehicle using AI Logic

Koo Euh-Suh, Kim Woo-Suk, Choi Hyun-Sung, Lee Hyeoun-Dong, Sul Seung-Ki  
Power Electronics Lab. School of Electrical Engineering, Seoul National Univ.

**Abstract** - 최근 환경에 대한 각국의 관심이 높아지면서 자동차의 배기가스 및 소음에 관한 규제 치들이 날로 높아 가고 있는 실정이다. 이에 대한 해결책의 하나로 전기 자동차에 관한 관심이 고조되고 있으며, 특히 기계적 에너지와 전기적 에너지를 동시에 제어함으로써 외부의 별도 전원 공급이 필요 없이 구동이 가능한 병렬 복합형 전기자동차가 많은 연구의 대상이 되고 있다. 병렬 복합형 전기자동차의 전동기는 저속에서 구동 회전력을 보조하여 배기가스와 소음을 감소시키며, 고속에서는 내연 기관으로부터 에너지를 공급받아 배터리를 충전한다. 본 논문에서는 인공지능을 이용하여 다양한 주행 조건, 운행 패턴 등에 효과적으로 대응할 수 있으며 배기가스 및 소음을 감소시킬 수 있는 운행 제어 알고리즘을 제안하고 이를 주행시험을 통하여 그 타당성을 입증하였다.

#### 1. 서 론

최근 고조되고 있는 환경 문제와 대형 차량의 효율 개선을 위하여 복합형 전기자동차의 관한 연구가 세계적으로 널리 진행되고 있다[1-5]. 이들 연구는 향상된 특성을 갖는 시스템의 개발에 주안점을 두고 있다. 따라서 병렬 복합형 구동 시스템을 장착한 차량이 실제 운행에 도입하기 위해서는 부가적인 제어를 필요로 하게 된다. [4]에서는 실제 병렬 복합형 차량이 운행에 도입되었을 때의 문제점에 관한 연구 결과와 문제점의 해결 방안을 제시하고 있으나 순시적 토크제어가 어려운 제어 방식을 택하고 있기 때문에, 동력 보조와 충전의 기능을 분리시켰다. 또한 차량의 가속시 발생하는 회생 전력만으로 배터리를 충전시키므로 배터리 충전 균형을 유지하지 못하여, 외부의 충전 장치를 통한 부가적인 충전이 필요하다는 단점을 안고 있다. 운전자의 가속형태, 주행도로의 상태, 차량의 부하조건에 따라 병렬 복합형 전기자동차의 특성이 매우 상이하게 나타날 수 있다.

본 논문에서는 이에 대한 해결책의 하나로 인공지능을 이용한 병렬 복합형 전기자동차의 토크 제어를 제안하였다. 제안된 제어기는 주행중의 디젤기관의 잉여 토크를 이용한 배터리의 충전이 내제되어 있고, 외란에 강인한 특성을 가지고 있기 때문에, 앞서 언급된 외란에 관계없이 병렬 복합형 전기자동차의 배터리 충전 평형을 유지할 수 있다.

#### 2. 본 론

그림 1은 본 연구에 사용된 대상 차량의 외관을 보여 준다. 대상 차량은 45인승 도심 주행용 대형 버스이며, 총중량은 13톤이다. 현재 이 병렬 복합형 전기자동차는 서울대학교 교내 셔틀로 사용되고 있다. 그림 2는 대상 병렬 복합형 전기자동차의 동력계의 구성도이다. 이는 디젤기관, 유도기, 인버터, 배터리 등으로 구성되어 있다. 각각의 상세한 사양은 표1과 표2에 나타나 있다.

##### 2.1 동력계의 특성시험

병렬 복합형 동력계에 가장 부합하는 제어방식을 수립하기 위하여 동력계의 특성시험이 선행되었다. 특성시험에서 디젤기관과 병렬 복합형 동력계의 토크특성과 디젤기관의 연비 및 NOx 배출 특성 등을 측정하였다.



그림 1. 병렬 복합형 전기자동차의 외관

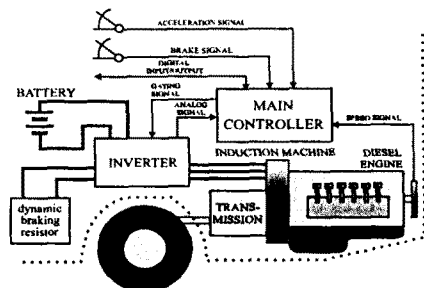


그림 2. 병렬 복합형 전기자동차의 동력계 구성도

표 1. 디젤 내연기관의 제원

내연기관의 종류	직접 분사식 디젤 엔진
실린더 용량	9419.5(cc)
Bore and Stroke	124×130(mm)
실린더 개수	6
행정수	4
최대 출력	230(ps)

표 2. 전기적 장치의 제원

유도기	정격 출력	34[kw]
	정격 선간 전압	170[V]
	극수	12극
	정격 속도	800[r/min]
배터리	최대 속도	3000[r/min]
	정상 전압	300[V]
	용량	70[Ah]
인버터 및 제어기	총중량	750[kg]
	스위칭 주파수 및 소자	5[kHz], IGBT
	제어기 보드	DSP
		TMS320C31

각 동력원의 토크특성 시험 결과를 그림 3에 도시하였다. 그림 3의 (A)는 디젤 기관 단독의 토크특성이고 (B)는 유도기가 정격토크 보조 제어를 수행할 경우 병렬 복합형 동력계의 토크특성이다. 그림 4와 5에 각각 병렬 복합형 동력계의 NOx 배출 특성과 연비 특성을 도시하였다. 특성시험 결과 디젤기관은 저속 영역에서 많은 NOx 배출과 함께 상대적으로 낮은 토크를 발생시킴을 알 수 있으나, 병렬 복합형 동력계에서는 유도기의 토크 보조로 말미암아 저속에서의 토크특성과 NOx 배출 특성이 현저히 개선됨을 알 수 있다. 또한 구동장치의 전반적인 연비 효율의 향상을 도모할 수 있다.

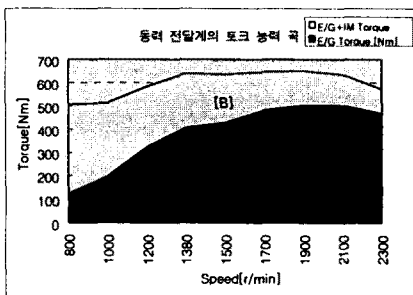


그림 3. 병렬 복합형 동력계의 토크특성

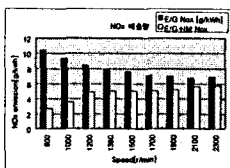


그림 5. 병렬 복합형 동력계의 NOx배출 특성

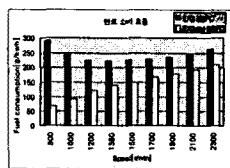


그림 4. 병렬 복합형 동력계의 연비 특성

## 2.2 제어의 목적

본 논문의 제어의 목적은 다음과 같다.

- 배터리 충방전 평형
- NOx 배출 규제치 만족
- 차량의 주행 능력 개선

별도의 외부 충전 장치를 제거하기 위하여 병렬 복합형 전지자동차의 배터리 충방전 평형을 유지하는 것이 제어의 중요한 목적중 하나이다. 차량 감속시의 회생 전력만으로는 배터리 충방전 평형을 유지할 수 없다. 따라서 주행중 디젤기관의 효율이 상대적으로 높은 고속 영역에서 디젤기관 잉여 토크를 이용한 배터리 충전 제어가 필수적이다. NOx 배출 규제치를 만족시키고 차량의 주행 능력을 개선하기 위해서는 저속 영역에서 유도기의 토크 보조 제어 수행이 필요하다. 이에 부가하여 운전자의 운전 습관이나 차량의 부하 조건, 운행 도로의 특성을 고려하여 제어 전략을 구성하였다.

## 2.3 제어기의 구현

병렬 복합형 차량 시스템과 차량에 외란으로 작용하는 운전자의 운전 습관이나 차량의 부하 조건, 운행 도로의 특성은 수학적으로 명확히 정의되기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 퍼지 로직을 적용한 병렬 복합형 구동계의 토크 제어를 제안하였다. 제안된 퍼지로직 토크 제어기는 불분명한 외란이나 시스템에 대하여 강인한 제어 특성을 나타낸다. 또한 전문가의 지식이나 경험을 제어에 반영할 수 있고 그 구현이 용이하다는 장점을 가진다. 제안된 퍼지로직 토크 제어기는 크게 운전자 가속속 의지 추정기, 동력 분배 제어기 그리고 최종 토크 합성기로 구성되어 있다. 제안된 퍼지로직 토크 제어기의 구성을 그림 6에 도시하였다.

### 2.3.1 운전자 가속속 의지 추정기

차량의 주행 성능 향상과 유도기의 토크 보조 및 배터리 충전 제어 시점을 결정하기 위하여 운전자 가속속 의지 추정기를 구현하였다. 운전자 가속속 의지 추정기는 가속페달 답력량의 변화량,  $\Delta Acc$ 와 유도기 출력토크의 변화량,  $\Delta Te$ 를 입력으로 하여 운전자의 가속/감속 의도를 현재 발생토크에 대한 증감 분으로 출력한다. 제어기의 포화를 방지하기 위해 출력은 현재 회전속도에서 가능한 최대토크의 10%로 한정하였다. 그림 7과 표 3에 입력 및 출력 멤버십 함수(memberhip function)와 룰베이스(rule base)를 나타내었다.

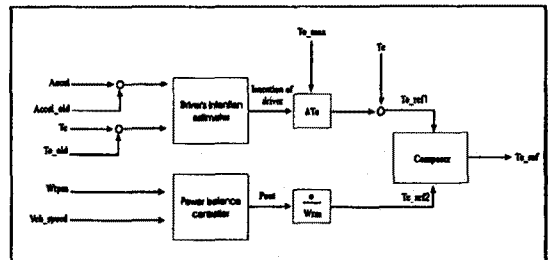


그림 6. 제안된 퍼지로직 토크 제어기의 구성도

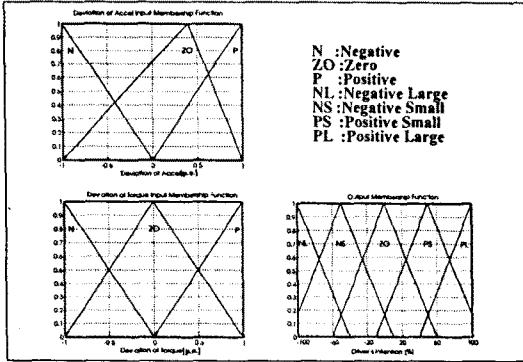


그림 7. 운전자 가감속 의지 추정기의 입력 및 출력 멤버십 함수

표 3. 운전자 가감속 의지 추정기의 룰 베이스

$\Delta Acc$		N	ZO	P
$\Delta Te$	N	NS	ZO	PL
	ZO	NS	ZO	PS
	P	NL	NS	PS

### 2.3.2 동력 분배 퍼지제어기

배터리 충방전량과 디젤기관의 NOx 배출 특성은 차량의 운행 상태와 밀접한 관계가 있다. 이를 유도기 토크제어에 반영하기 위하여 디젤기관의 회전속도와 차량의 주행속도로부터 배터리 충방전량의 평형을 유지시키고 NOx 배출을 저감시키는 유도기의 부하 분담량을 결정하는 동력 분배 퍼지 제어기를 구현하였다. 동력계 특성시험 결과와 주행 구간 운행 특성 분석을 고려하여 동력 분배 퍼지 제어기의 룰 베이스를 구성하였다. 실제 병렬 복합형 차량의 반복된 운행 시험 결과와 그 분석을 통해 이를 멤버십 함수 및 룰 베이스의 수정, 보완에 사용하였다. 그림 8과 표 4에 동력 분배 제어기의 입력 및 출력 멤버십 함수와 룰 베이스를 나타내었다.

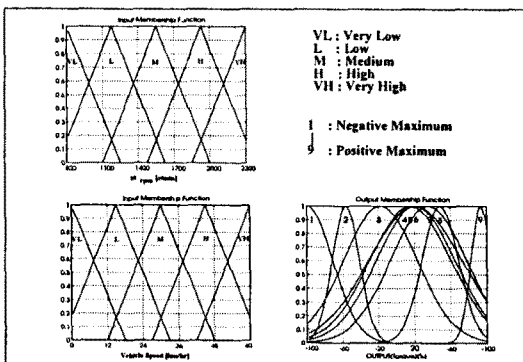


그림 8. 동력 분배 제어기의 입력 및 출력 멤버십 함수

표 4. 동력 분배 제어기의 룰 베이스

V veh	VL	L	M	H	VH
$\omega_{rpm}$	9	9	7	6	7
VL	9	8	7	6	7
L	7	5	4	5	5
M	5	3	2	3	2
H	5	2	1	1	1
VH	5	2	1	1	1

### 2.3.3 최종 토크 합성기

운전자 가감속 의지 추정기의 출력,  $Te_1^*$ 과 동력 분배기의 출력,  $Te_2^*$ 으로부터 (1)을 이용하여 유도기의 최종 토크지령치 계수 K를 생성한다. K는 현재 유도기가 발생시킬 수 있는 최대 토크에 대한 현재의 토크의 비로 정의되며, 따라서 유도기의 최종 토크지령치는 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$K = w \cdot Te_1^* + (1-w) \cdot Te_2^* \quad (1)$$

$$Te^* = K \cdot Te_{max} (\omega_{rpm}) \quad (2)$$

(1)에서 w는 가중치이고, 이 값을 조절함으로써 운전자가 가감속 의지 추정기와 동력 분배기가 차지하는 비율을 조절할 수 있다.

### 2.4. 주행 시험 결과

제안된 퍼지제어 토크제어를 적용하여 실제 병렬 복합형 전기자동차의 주행 시험을 실시하였다. 실험 결과는 RSC232 직렬통신을 통하여 취득하였으며, 제어기의 제어 주기는 60msec로 결정하였다. 주행 시험 결과를 그림 9에 도시하였다. 그림 9(a)에는 각각 토크지령치, 내연기관 회전속도, 운전자의 가속페달 답력량 및 차량의 속도를 도시하였으며, 본 논문에서는 배터리 충방전 평형의 기준으로 배터리 입력력 전류의 시간에 대한 적분을 선정하였고, 그림 9(b)에 그 시험결과를 도시하였다. 시험 결과를 분석해 보면, 운전자의 가감속 의지를 파악하여 차량의 가속 성능이 향상되었으며 운행중 잉여 토크를 이용하여 충전이 이뤄짐을 확인할 수 있다. 또한 정해진 운행 구간의 운행을 종료 한 후의 배터리 충방전량은 평형을 유지하였다. NOx 배출량은 운행중 그 측정이 불가능하다는 제약 때문에 자료를 취득하지는 못하였으나, 동력계 특성 시험 결과를 바탕으로 결과를 분석해 보면, 기존 차량에 비하여 감소하였음을 유추할 수 있다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 병렬 복합형 전기자동차의 퍼지제어 토크제어를 제안하였다. 제안된 퍼지제어기는 병렬 복합형 전기자동차의 배터리 충방전 평형을 유지할 수 있고 여러 가지 외란에 둔감한 특성을 가진다. 퍼지제어의 룰 베이스를 구현하기 위해서 동력 시험이 진행되었으며, 이 결과를 바탕으로 제안된 퍼지제어기를 구성하였다. 실제차량의 주행시험을 통해 제안된 제어기의 유용성과 우수성을 입증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] K. Rajashekara, E. Schneider, J. H. Hunter and M. A. Jeffers, Propulsion Control System for A 22 Foot Electric/Hybrid Shuttle Bus, 12th International Electric Vehicle Symposium, pp.169~178, 1994.
- [2] R. D. King, K. B. Haefner, L. Salasoo and R. Gunn, Development of a 225kW Hybrid Drive System for a Low-Floor, Low-Emissions Transit Bus, 12th International Electric Vehicle Symposium, pp.179~188, 1994.
- [3] A.Obata et al., Development of Diesel-Electric Hybrid Engine for Large Vehicles, TOSHIBA REVIEW, vol.46, No.8, Aug. 1991, pp.663~666 (in Japanese).
- [4] K. Endo, K. Nakajima, T. Tajima and A. Obata, Drive System for Hybrid Low Emission Vehicle, IPEC-Yokohama, pp.99~104, 1995.
- [5] J. I. Ha, E. S. Koo, H. D. Lee, J. S. Kim, S. K. Sul, Advanced Control Strategy of Parallel Hybrid Low Emission Electric Bus, Workshop on Power Electronics in Transportation, pp.71~76, 1996.

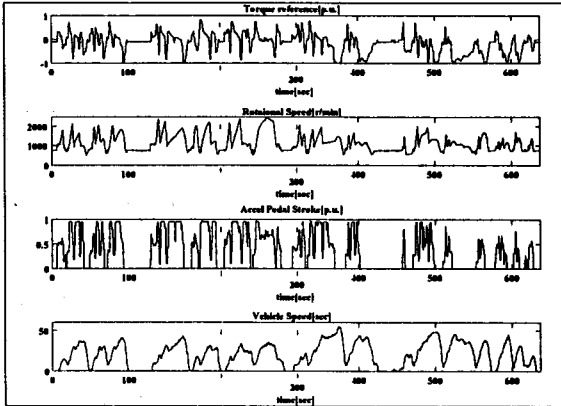


그림 8. 도로 주행 시험 결과 1.

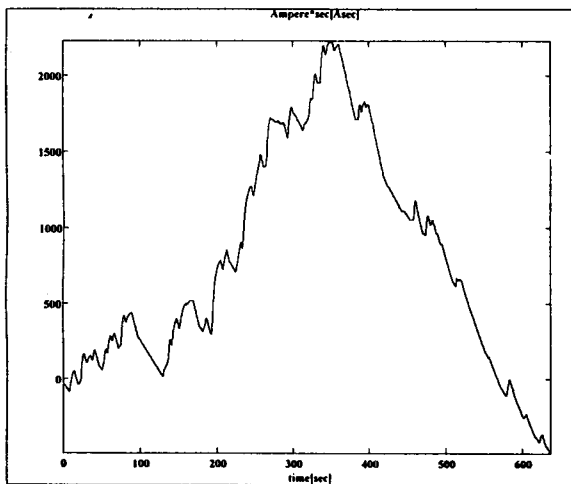


그림 9. 도로 주행 시험 결과 2.