

슈퍼커패를 이용한 연료전지 하이브리드 전기자동차 전력계 시스템 구조 설계 및 분석

장민호, 이재문, 하태종, 조보형
서울대학교

Design and Analysis of Fuel Cell Hybrid Architectures Using Supercapacitors

Min-ho Jang, Jae-moon Lee, Tae-jong Ha, Bo-hyung Cho
Seoul National University / Power electronics system laboratory

ABSTRACT

연료전지 슈퍼커패를 이용한 하이브리드 자동차 전력계 시스템을 분석하기 위하여 시뮬레이션 도구를 이용하였으며 기존의 전력계 구조를 보완한 새로운 전력계 구조를 제안하였다. 차량의 성능 조건인, 가속 시험과 주행 시험(Japan 10-15 cycle과 FTP 75 cycle)을 모의 실험하여 전력계 시스템 중에 슈퍼커패 용량을 최적으로 설계하였다

연료전지 하이브리드 자동차 전력계 시스템 분석하였고, 새로운 구조를 제안하였다.

1. 서론

연료전지를 사용한 하이브리드 자동차는 기존의 내연기관 자동차를 대체할 수 있는 방법 중의 하나이다. 그러나 연료전지 하이브리드 자동차는 자동차 제동시의 회생에너지를 최대한 활용하고 경제적인 주행 제어를 위해서 보조 에너지 저장 장치를 필요로 한다. 연료전지 하이브리드 자동차 전력계 시스템 구성은 연료전지와 보조 에너지 장치, 전력변환장치, 모터-인버터로 구성되어 있다. 이 중에서 보조 에너지 장치로 배터리나 슈퍼커패를 사용한 기존의 하이브리드 자동차 전력계 시스템 구조는 그림 1과 같다.

2. 전력계 시스템 구조 설계 및 분석

2.1 시스템 구성품 모델링

모의실험 도구는 간단, 평균, 상세 모델 3가지로 나누어 모델링 되어 사용되었다. 시스템 수준의 분석을 위해서 간단 모델이 유용하다^[3]. 연료전지와 슈퍼커패, 전력변환장치, 모터-인버터로 구성된 연료전지 하이브리드 자동차 전력계 시스템 구성은 그림 2에 보여주고 있고 각각의 모델링 설명은 다음과 같다.

- 연료전지 : 연료전지 시스템은 공기공급기와 수소공급기, 유로, 가습기와 체어기 같은 주변장치와 스택으로 구성되어 있다. 연료전지 시스템의 간단 모델은 연료전지 스택의 전압-전류 특성 곡선과 주변장치 소모 파워로 구성되어 있다.
- 슈퍼커패 : 전기화학적 특성을 이용한 회로 모델로 구성되었다.
- 모터&인버터 : 모터는 유도기로 선정되었으며 공간 벡터 PWM과 최대 토크 제어를 이용한 간단 모델로 구성되었다.
- 전력변환장치 : 출력 전력과 소자 손실 전력을 고려한 간단 모델로 구성되었다.

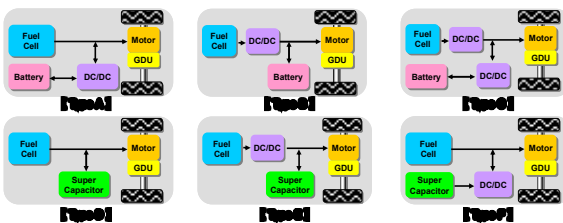


그림 1 연료전지 하이브리드 자동차 전력계 시스템

배터리 하이브리드 자동차보다 고효율의 에너지 사용과 더 좋은 가속 성능, 연료전지 사용 수명의 연장 등의 장점이 있다^{[1][2]}. 전력계 시스템 구성품 중에서 연료전지 용량이나 모터-인버터 용량은 최고 속도나 가속능력, 등판능력과 같은 기본적인 성능 조건을 만족하도록 결정된다. 이들의 용량은 전력계 시스템 구조나 제어 전략에 의해 결정되지는 않는다. 그러나 슈퍼커패나 전력변환장치의 용량은 전력계 시스템 구조나 제어 전략에 의존해서 결정된다. 전력계 구조에 따라 전력변환장치나 슈퍼커패 용량을 최적으로 선정하기 위하여 가속성능 시험 및 주행 성능 시험을 모의 실험하였다. 또한, 이 논문에서는 기존의

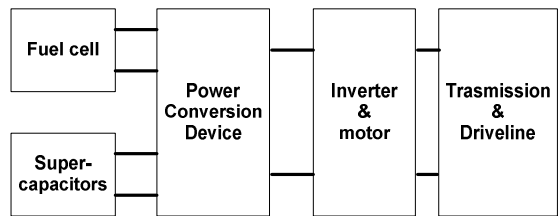


그림 2 연료전지-슈퍼커패 하이브리드 자동차 전력계 시스템

2.2 전력계 시스템 구조와 제어 전략

배터리를 사용한 구조보다는 슈퍼커패를 사용한 구조가 연료전지 하이브리드에서는 더 효과적이다. 연료전지-슈퍼커패 하이브리드 기본적인 제어 전략은 연료전지는 차량의 평균 전력이거나 최대 전력을 제공하고 슈퍼커패는 짧은 시간의 피크 전력을 제공하는 것이다. 그림 1의 슈퍼커패를 사용한 기본 3가지 구조에서 타입 E와 F는 다양한 전력제어 전략을 수행할 수 있으나

전력변환장치의 용량이 연료전지의 용량이나 회생 제동 전력의 용량과 같이 커야 하는 단점이 있다. 또한 타입 F는 갑작스런 주행 전력이나 회생 제동에서 직류 연결 전압을 제어하는데 어려움이 있다. 타입 D는 구조가 간단하고 저가이며 컨버터에 의한 전력 손실이 없다는 장점이 있어서 대개의 경우 선호되어진다. 그러나 다음과 같은 단점이 있다.

- 초기 연료전지 구동 시 슈퍼캡 충전 방법
- 회생 제동 시 연료전지와 회생 에너지가 슈퍼캡을 충전하여 회생 충전 효율이 떨어지는 단점
- 직류 연결 전압(dc link 전압)을 제어할 수 없는 단점

기존의 방법의 문제점을 해결하고 장점을 가진 새로운 전력계 구조를 제안하였으며 그림 3 (b)에서 보여주고 있다. 새로운 타입 E2prime에서는 기존의 구조의 전력변환장치 용량보다 적은 차량의 평균 전력 요구 용량만으로 선정된다. 또한, 타입 D 보다 적은 슈퍼캡 용량 Csc 선정으로도 가속 성능이나 주행 성능이 좋은 결과가 나온다. 타입 E2prime은 타입 D 보다 슈퍼캡 용량을 적게 사용하여 가격 및 무게 부피를 줄일 수 있다. 타입 E2prime은 전력변환장치로 비반전 강승압 전력회로를 사용하였다. 새로운 구조의 제어 전략은 전력변환장치 사용 모드와 타입 D 모드, 정지 모드로 구성되었다. 즉, 슈퍼캡의 전압이 연료전지의 정해진 전압보다 크면 전력변환장치 작동 모드이고, 그 이하이면 타입 D 모드이고 회생 제동 시에는 정지 모드로 되어 있다.

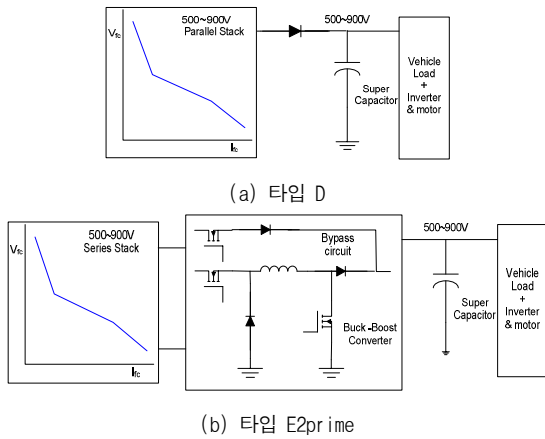


그림 3 타입 D와 타입 E2prime의 구조

2.3 모의실험 결과

제안된 구조 타입 E2prime은 성능 시험을 모의 실험하여 타입 D와 비교하였다. 타입 D와 E2prime에 대해 모의실험을 통해서 최적의 Csc를 결정하였다.

모의실험 대상 차량은 도시형 버스로 선정되었고 성능 시험 기준은 가속 성능은 60km/h까지의 가속 시간과 주행 시험, Japan 10-15와 FTP 75모드에 대한 수소 소모량에 대해 비교 분석하였다.

표 1 구성 요소의 변수 값

차량모델	공기역학계수:5.0, 구름마찰계수:0.013, 타이어 반지름:0.5m, 보조전원 전력:5kW, 총 질량:16,000kg
연료전지 (×2 직렬연결)	P:100kW, V:250~450V, I:0~400A, $\frac{\Delta P}{\Delta t}$:80kW/1.5sec
모터&인버터	P_N :120kW, P_{MAX} :240kW, ω_{base} : 2000rpm, ω_{max} : 7,200rpm
전력변환장치	P: 30kW, Vin: 750~900V, Vout: 750~900V

2.3.1 타입 D의 모의실험 결과

60km/h에 대한 가속 시험에 대해 슈퍼캡 용량 Csc=2,500F 부터 Csc=23,000F까지 대해 수행하였고 그림 4와 같이 최소점이 존재하였고 이때가 가속 시간 18초에 Csc=9,000F 이었다. 두번째로 Japan 10-15 주행 성능에서 소모된 수소 사용량은 그림 5에 보여주고 있다. 전체 주행 거리 4.16km에 대해 슈퍼캡 용량이 증가함에 따라 수소 사용량도 줄어드는 경향을 보여주고 있다. 세번째로 FTP-75 주행 성능 시험에서는 슈퍼캡 용량에 따른 최소 수소 사용량이 존재하였다. 시험하는 주행 프로파일에 따라 슈퍼캡 최적 용량이 다르게 나왔다. 가속 성능과 주행 성능 시험을 통해서 주어진 대상 차량에 대해 최적의 슈퍼캡 용량은 Csc=9,000으로 선정되었다.

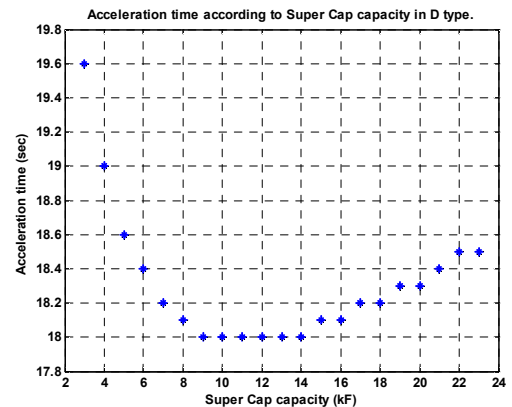


그림 4 60km/h에 대한 가속실험

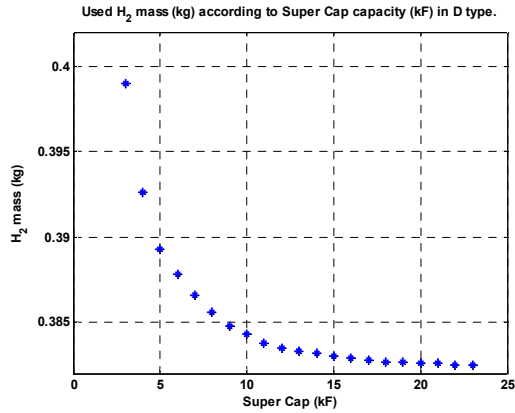


그림 5 Japan 10-15에 대한 수소 사용량

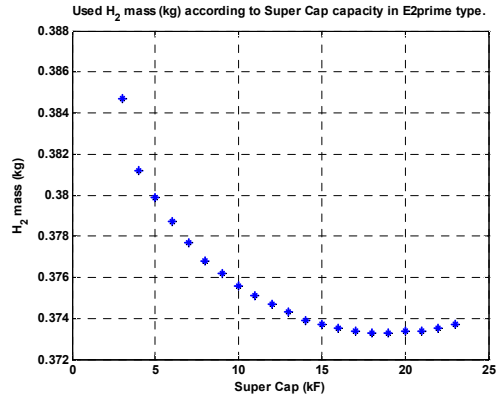


그림 8 Japan 10-15에 대한 수소 사용량

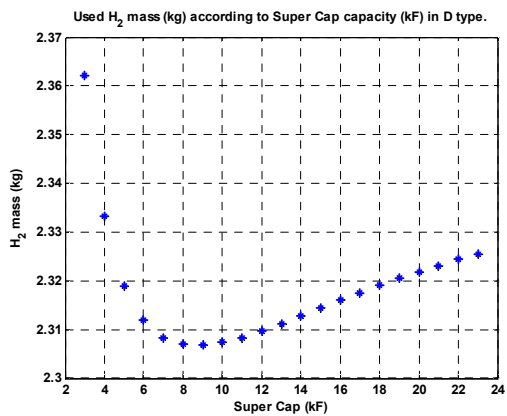


그림 6 FRP-75에 대한 수소 사용량

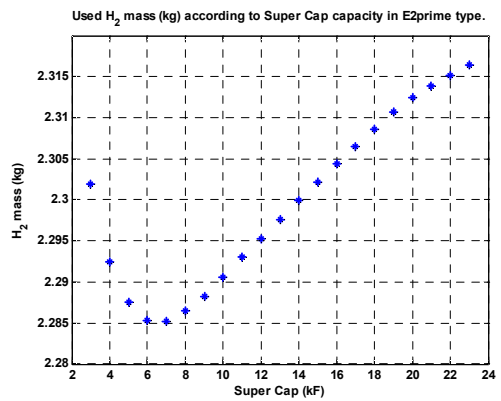


그림 9 FRP-75에 대한 수소 사용량

2.3.2 타입 E2prime의 모의실험 결과

타입 E2prime의 전력변환장치 용량은 차량 평균 출력 전력 30kW로 선정되었고 형태는 비반전 강승압 전력회로로 결정하였다. 그림 8 (a)는 가속 성능 시험에 대한 결과를 보여주고 있다. 가속 성능 시험 결과는 타입 D와 큰 차이를 보이지 않는다. 그림 8 (b)는 주행 시험 Japan 10-15모드에 대한 결과를 보여주고 있다. 그림 8 (c)는 주행 시험 FTP-75모드에 대한 결과를 보여주고 있다. 성능 시험에 따라 슈퍼캡 용량의 최적점이 존재하는 경우가 있기도 하지만 $C_{sc}=7,000F$ 선정에 대해서도 타입 D 보다도 더 좋은 결과 나왔다.

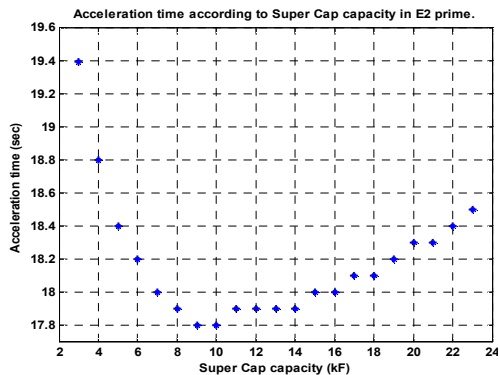


그림 7 60km/h에 대한 가속시험

3. 결론

모의실험 도구를 이용하여 연료전지-슈퍼캡 하이브리드 자동차 전력계 시스템을 분석 비교하였다. 기존의 전력계 시스템 성능 모의실험을 통하여 새로운 E2prime 구조를 제안하였다. 전력계 구조에 따라 슈퍼캡 용량이나 컨버터 용량이 다르게 선정되었으며 새로이 제안된 구조는 적은 슈퍼캡 용량 선정으로도 다른 구조 보다 가속 성능이나 수소 사용량이 좋게 나왔다.

참고 문헌

- [1] S.I. Jeon; J.Y. Lee; S.J. Jeong; T.W. Lim; "Hyundai Supercapacitor Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle", EVS 21, April 2005.
- [2] Andrew Burke and Marshall Miller, Ultracapacitor and Fuel Cell Applications, EVS20, 2003
- [3] M. Amrhein; P.T. Krein; "Dynamic Simulation for Analysis of Hybrid Electric Vehicle System and Subsystem Interactions, Including Power Electronics", Trans. on Vehicular Technology, , vol. 54, no. 3, pp. 825 - 836, May 2005.
- [4] L. Chu; Q. Wang; M. Liu; J. Li "Parametric Design of Series Power-Train for Fuel Cell Transit Bus", SAE 2004-01-2608, March 2004.