

배터리와 초고용량 커패시터의 내부 저항 비를 고려한 HEV의 충·방전 전략개발

김원겸 · 장재훈 · 유지윤
고려대학교 전기공학과

Performance Analysis Charging/Discharging Strategy for HEV Adopting ESR-Ratio of Batteries and Ultra-Capacitors

Wonkyum Kim · Jaehoon Jang · Jiyeon Yoo
Department of Electrical Engineering, Korea University

ABSTRACT

하이브리드 차량은 기존의 화석연료를 사용하는 엔진과 배터리, 초고용량 커패시터로부터 전원을 공급받는 전동기를 직·병렬 구조로 연결하여 연비를 개선하기 위해 개발되었다. 이를 위하여 가속 시 배터리와 초고용량 커패시터의 방전으로부터 전원을 공급받고, 감속 시 회생제동을 통해 다시 충전을 반복한다. 최근 배터리와 초고용량 커패시터의 용량 및 출력의 장단점을 상호 보완하고자 이중 보조 동력원에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 배터리와 초고용량 커패시터의 내부 저항을 고려하여 병렬 사용하는 이중 보조 동력원 시스템에 대하여 각각의 충전용량(SOC)에 따른 운전전략을 개발하고자 한다.

1. 서론

최근 계속되는 유가 상승과 화석에너지의 고갈 문제, 그리고 환경에 대한 관심증가로 인해 자동차의 연비 개선 및 배기가스 저감을 위하여 미국, 일본, 유럽 등 각국은 차세대자동차 기술 개발의 핵심과제로 하이브리드 자동차 (HEV)를 이미 상용화 하였거나 개발을 서두르고 있다. HEV는 화학적 에너지 저장장치에 차량 감속 시 회생제동을 통해 전기 에너지를 저장하여 가속 시 이 에너지를 다시 사용함으로써 연비 개선과 배기가스 저감 효과를 얻을 수 있는 차세대 자동차이다^[1]. 회생제동 시 발생하는 에너지를 저장하기 위해 배터리와 초고용량 커패시터가 사용된다. 배터리는 많은 에너지를 저장할 수 있지만 전류 출력이 작은 단점이 있고, 초고용량 커패시터는 에너지 저장용량은 작지만 전류 출력이 큰 장점이 있다. 이러한 서로의 장단점을 보완하기 위해 이중 보조 동력원에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 배터리와 초고용량 커패시터의 전기적 등가회로 모델을 이용하여 병렬 사용하는 이중 보조 동력원 시스템에 대한 충·방전 특성을 살펴보고 배터리와 초고용량 커패시터의 내부 저항을 고려한 효율적인 충·방전 전략을 연구하였으며, Simulink 시뮬레이션을 통하여 임의의 입력에 대한 출력을 고찰해 보았다.

2. 이중 보조 동력원 시스템 HEV

그림 1은 하나의 엔진과 하나의 모터를 갖는 이중 보조 동력원 HEV를 보인다. 이 시스템은 엔진을 구동하기 위한 주동

력 에너지원으로 화석연료를 사용하고 모터를 구동하기 위한 보조 에너지원으로 배터리와 초고용량 커패시터를 사용한다. 배터리와 초고용량 커패시터는 회생제동 시 에너지 저장장치로서, 모터 구동 시 에너지원으로 동작한다. 배터리는 높은 에너지 밀도와 낮은 출력 밀도 특성으로 과도 출력요구에 대한 응답특성이 좋지 않으므로 차량 주행 중 발생하는 과도전압, 전류 등에 효과적으로 대응할 수 없다. 반면 초고용량 커패시터는 에너지 밀도는 낮지만 전류출력이 높은 장점을 가지고 있다.^[2] 이러한 두 가지 에너지 저장장치의 장점을 살리기 위해 이중 보조 동력원 HEV가 등장하였다.

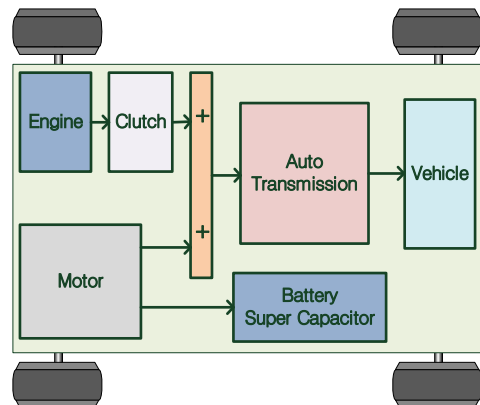


그림 1 이중 보조 동력원 HEV의 구조

3. 이중 보조 동력원 시스템의 충·방전 전략

이중 보조 동력원 시스템에서는 각각의 SOC에 따라 두 전원 사이의 에너지 흐름을 제어해 주어야 한다. 일반적으로 별도의 제어기나 양방향 DC/DC 컨버터를 이용하여 배터리와 초고용량 커패시터의 입출력 제어가 이루어진다.^[3] 본 논문에서는 배터리와 초고용량 커패시터의 주파수 응답 특성 측정으로부터 획득한 데이터를 이용하여 각 전원의 내부 저항 성분을 통한 전압-전류 관계를 획득하였으며, 이를 이용하여 Simulink 모델을 제작하였다. 또한 제어기와 DC/DC 컨버터를 모델링하여 두 동력원의 충·방전 전략을 수립하고 시뮬레이션 하였다. 그림 2는 배터리와 초고용량 커패시터의 모델링을 위해 사용된 등가회로 모델이다. 그림 3은 주파수 응답 실험을 통해 획득한 배터리의 SOC와 동작 주파수에 따른 임피던스 관계를 나타낸다.

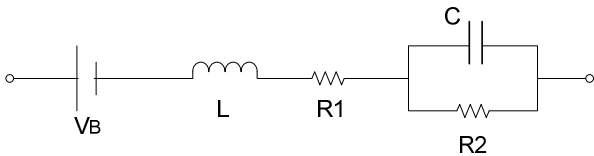


그림 2 배터리/초고용량 커패시터의 등가회로 모델

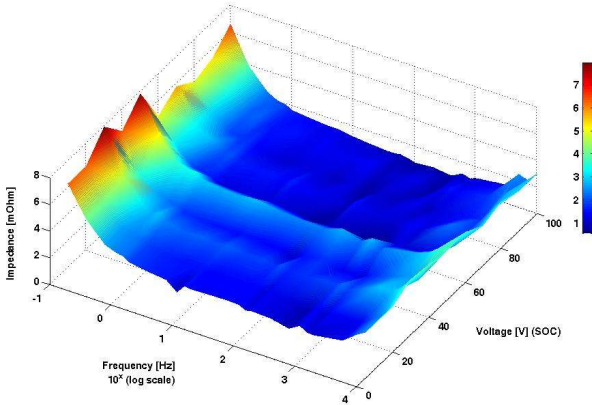


그림 3 SOC와 주파수에 따른 배터리의 임피던스 관계 (단 셀)

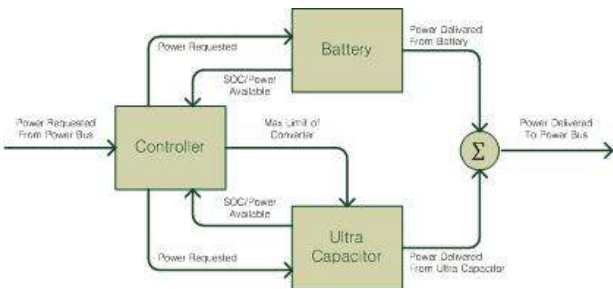


그림 4 이중 동력원의 동력 분배 기본 개념

그림 4는 제어기와 DC/DC 컨버터를 이용한 이중 동력원의 동력 분배비 제어 기본 개념을 나타낸다. 먼저 배터리와 초고용량 커패시터가 방전하는 경우, 배터리와 초고용량 커패시터의 SOC를 고려하여 모터의 요구 전력이 작은 경우에는 배터리에만 에너지를 방전한다. 이때 배터리의 남은 에너지는 초고용량 커패시터를 충전하는데 사용한다. 모터의 요구 전력이 큰 경우, 배터리와 초고용량 커패시터에서 모두 에너지를 방출한다. 이때 초고용량 커패시터의 방전에는 제한을 두어 에너지 저장량이 작은 초고용량 커패시터의 단점을 보완한다. 또한 배터리 및 초고용량 커패시터의 충전 시에도 역시 배터리와 초고용량 커패시터의 SOC를 고려하여 표 1과 같이 에너지의 충·방전 비율을 정한다.^[4]

표 1의 기본적인 충·방전 전략에 더하여 본 논문에서는 배터리와 초고용량 커패시터의 내부 저항 비율을 이용한 충·방전 전략을 수립하였다. DC/DC 컨버터의 동작 주파수가 정해진다면, 해당 주파수에서 그림 3으로부터 SOC에 따른 각각의 임피던스가 계산된다. 초고용량 커패시터 팩과 배터리 팩의 내부 저항 비에 따라 충·방전이 가능한 전압-전류 관계 또한 변화하게 되므로 이를 충·방전 전략에 감안하였다. 내부 저항 비에 따른 에너지의 충·방전 비율을 표 2에 나타내었다. 표 1에서 나타난 기존 충·방전 전략에 대해 배터리와 초고용량 커패시터

의 내부 저항 비에 의한 표 2의 충·방전 전략 가중치를 적용하여 저항 성분에 의한 발열 및 운전 효율을 높일 수 있었다.

표 1 기존 초고용량커패시터/배터리 충·방전 전략

초고용량커패시터/배터리 충·방전 비율	배터리 SOC			
	0.5	0.6	0.7	0.8
0	0.5/0.5	1/0	1/0	1/0
0.1	0.5/0.5	1/0	1/0	1/0
0.2	0.5/0.5	0.9/0.1	1/0	1/0
0.3	0.4/0.6	0.9/0.1	1/0	1/0
0.4	0.25/0.75	0.9/0.1	1/0	1/0
0.5	0.1/0.9	0.5/0.5	1/0	1/0
0.6	0/1	0.25/0.75	0.9/0.1	0.75/0.25
0.7	0/1	0.1/0.9	0.5/0.5	0.5/0.5
0.8	0/1	0.1/0.9	0.25/0.75	0.25/0.75
0.9	0/1	0/1	0/1	0.1/0.9

표 2 내부 저항 비에 의한 초고용량커패시터/배터리 충·방전 전략

초고용량커패시터/배터리 충·방전 비율	배터리 SOC			
	0.5	0.6	0.7	0.8
0	0.57/0.43	0.57/0.43	0.54/0.46	0.61/0.39
0.1	0.58/0.42	0.58/0.42	0.55/0.45	0.61/0.39
0.2	0.57/0.43	0.57/0.43	0.54/0.46	0.61/0.39
0.3	0.57/0.43	0.57/0.43	0.54/0.46	0.61/0.39
0.4	0.59/0.41	0.59/0.41	0.56/0.44	0.63/0.37
0.5	0.57/0.43	0.57/0.43	0.54/0.46	0.61/0.39
0.6	0.57/0.43	0.57/0.43	0.54/0.46	0.61/0.39
0.7	0.58/0.42	0.58/0.42	0.55/0.45	0.62/0.38
0.8	0.57/0.43	0.57/0.43	0.54/0.46	0.61/0.39
0.9	0.57/0.43	0.57/0.43	0.54/0.46	0.61/0.39

4. 시뮬레이터 구성 및 시뮬레이션 결과

그림 5는 이중 보조 동력원의 Simulink 구조를 보이고 있으며, 이 모델을 통해 차량 거동 프로파일을 사용하여 배터리와 초고용량 커패시터를 병렬 연결하는 이중 보조 동력원에 대해 기존 방법과 본 논문에서 제안하는 방법에 의한 각각의 출력 전류와 SOC를 그림 6과 그림 7에서 살펴보았다.

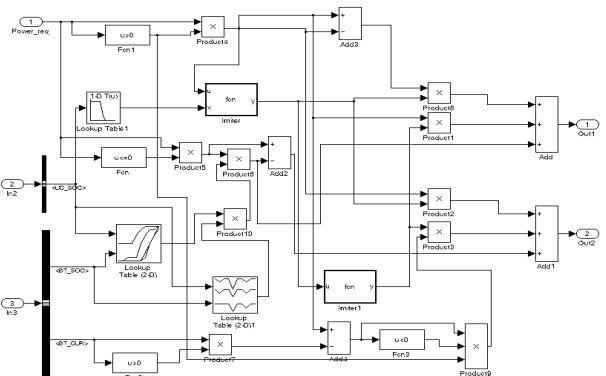


그림 5 제안한 이중 보조 동력원의 Simulink 모델 구조

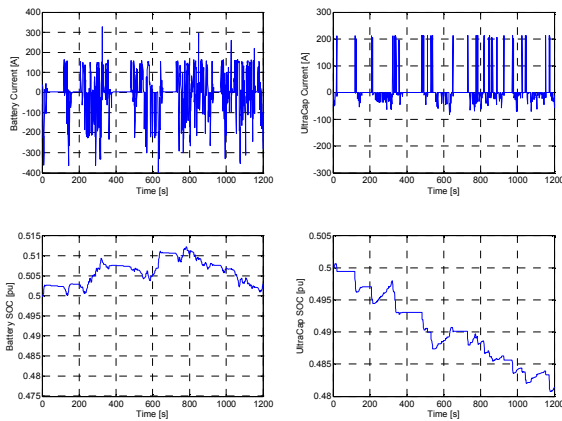


그림 6 기존 충·방전 전략에 의한 배터리-초고용량 커패시터의 출력 전류 및 SOC 변화

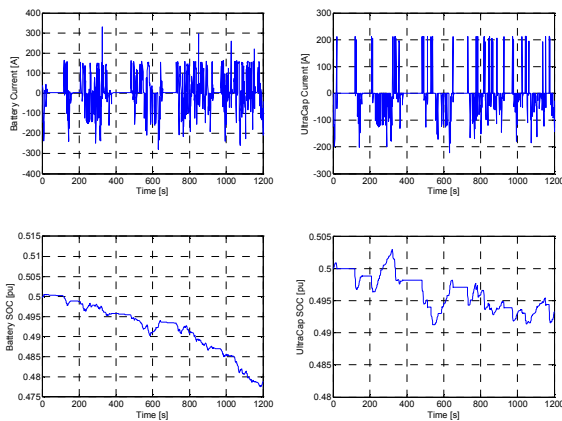


그림 7 제한한 충·방전 전략에 의한 배터리-초고용량 커패시터의 출력 전류 및 SOC 변화

그림 6은 내부 저항 비율을 고려하지 않은 기존의 경우 배터리와 초고용량 커패시터의 충·방전 전류 파형과 각각의 SOC 변화를 보이며, 그림 7은 본 논문에서 제안한 내부 저항 비를 고려한 경우의 시뮬레이션 결과이다. 그림 6의 기존 방법은 배터리 충·방전 시 순시 최대 전류가 300[A] 이상으로 커지는 경우가 다수 발생하여 배터리의 수명을 단축시킬 우려가 있으며, 주어진 프로파일에 대해 배터리의 SOC를 유지하면서 초고용량 커패시터의 SOC를 감소시키는 운전 전략임을 볼 수 있다. 그림 7의 제안한 방법에서는 배터리의 최대 충·방전 전류가 300[A] 이내에 대부분 존재하는 것을 볼 수 있으며, 배터리의 SOC를 감소시키면서 상대적으로 초고용량 커패시터의 SOC를 일정하게 유지시키는 것을 볼 수 있다.

그림 6, 그림 7의 경우와 같이 배터리와 초고용량 커패시터의 SOC가 40~50[%]로 유지되는 경우 표 2에 의해 초고용량 커패시터와 배터리의 충·방전 가중치가 약 0.57:0.43~0.59:0.41로 유지됨을 볼 수 있다. 이는 역으로 배터리와 초고용량 커패시터의 저항 비가 0.57:0.43~0.59:0.41의 비율로서, 배터리에 충·방전되는 전류 적산치가 클수록 내부 저항성분에 의한 에너지 손실이 커짐을 의미한다.

제한한 방법의 경우 기존 방법에 비해 배터리에 흐르는 전

류는 작아지고 초고용량 커패시터에 흐르는 전류가 커지지만, 그 저항 비를 고려하여 전류 적산치를 바탕으로 계산한 전력 손실은 약 14.92[%] 감소함을 알 수 있었다. 이는 배터리 내부 저항에 의한 발열을 줄여주는 역할을 하며, 배터리에 가해지는 과도 전압과 전류를 억제하여 상대적으로 충·방전 주기가 작은 배터리의 수명을 향상시킬 수 있다. 또한 배터리 팩 및 초고용량 커패시터 팩의 냉각장치 부피 및 무게를 감소시킬 수 있어 HEV의 연비 향상에도 기여할 것으로 예상된다.

5. 결론

배터리는 높은 에너지 밀도에 비해 낮은 출력 밀도의 단점을 가지며, 초고용량 커패시터는 낮은 에너지 밀도에 비해 전류 출력이 큰 장점이 있다. 이러한 서로의 장단점을 보완하기 위해 이중 보조 동력원의 구조 및 운전전략에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 배터리와 초고용량 커패시터의 전기적 등가회로 모델을 이용하여 그 내부 저항 결과를 산출하고 병렬 연결하여 사용하는 이중 보조 동력원 시스템에 대한 충·방전 특성을 고려하여 배터리와 초고용량 커패시터의 내부 저항 비를 고려한 효율적인 충·방전 전략을 연구하였으며, Simulink 시뮬레이션을 통하여 임의의 입력에 대한 출력을 고찰해 보았다. DC/DC 컨버터의 동작 주파수를 1kHz로 고정하여 해당 주파수에서 기존의 충·방전 전략에 더하여 비교적 내부 저항이 큰 배터리 팩의 충·방전 전류량을 초고용량 커패시터로 하여금 부담하게 하여 전력 손실을 감소시킬 수 있었으며 이는 배터리의 수명 연장과 궁극적인 HEV의 효율 향상에도 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

참고 문헌

- [1] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Sebastien E. Gay, Ali Emadi, "Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles," CRC Press, 2005
- [2] Xingyi Xu, V.H. and Sankaran, "Power Electronics in Electric Vehicles: Challenges and Opportunities" Industry Appl. and Conf., 2000. 20-27 Conf. Record of the 2000 IEEE, Vol.1, 2000
- [3] Schupbach, R.M. Balda, J.C.Zolot, M. Kramer, B. "Design methodology of a combined battery-ultracapacitor energy storage unit for vehicle power management." PESC, 2003. PESC '03. 2003 IEEE 34th Vol. 1, 15-19 June 2003 pp. :88-93
- [4] Andrew C. Baisden, and Ali Emadi, "ADVISOR-based model of a battery and an ultra-capacitor energy source for hybrid electric vehicles", IEEE Vehic. Tech., IEEE Trans. on Vol. 53, Issue 1, Jan. 2004 pp.199-205