

스위치 제어를 통한 자동차용 복합형 에너지 저장 장치의 효율 개선에 관한 연구

김병훈*, 이백행*, 정진범*, 신동현*, 송현식*, 김희준**
 자동차부품연구원*, 한양대학교**

A Study on the Efficiency Improvement through the Switch Control of a Compound Energy Storage System for Vehicles

Byoung-hoon Kim*, Back-Haeng Lee*, Jin-Beom Jeong*, Dong-Hyun Shin*, Hyun-Sik Song*, Hee-Jun Kim**
 Korea Automotive Technology Institute*, Hanyang University**

Abstract - 본 논문에서는 마일드 하이브리드 자동차에 적용 가능한 복합형 에너지 저장 장치의 운용 효율 및 수명 개선이 가능한 스위치 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안한 제어 알고리즘은 복합형 에너지 저장 장치를 구성하는 축전지와 울트라커패시터의 전압, 전류, 전력 및 SOC의 변화에 따라 스위치를 적절히 제어함으로써, 시스템 전체의 운용 효율을 개선하고, 또한 축전지에 대전류 충/방전 상황 발생을 제한시켜 축전지의 수명저하 현상을 완화시킨다. 본 논문에서는 마일드 하이브리드 자동차의 운행 조건을 모사한 사이클 프로파일과 차량 시뮬레이터 장비를 활용하여, 단순병렬 구성의 에너지 저장장치와 스위치 제어 알고리즘이 적용된 에너지 저장장치의 운용효율을 비교함으로써 제안한 알고리즘의 유용성을 확인하였다.

1. 서 론

마일드 하이브리드 자동차의 에너지 저장장치는 Idle Stop&Go, 회생 제동(Regenerative Braking)등의 기능으로 인해 수명특성이 나쁜 일반적인 납산 축전지의 사용이 불가능하다. 또한 차량내 다양한 시스템의 전장화로 인해 전기 에너지의 사용량이 늘어남에 따라 이에 대응할 수 있는 고출력 특성을 갖는 새로운 형태의 에너지 저장장치가 요구되었다. 이러한 요구로 인하여 Ni-MH나 Li-Ion등과 같은 고출력, 장수명 특성의 에너지 저장장치가 제안되었으나 이들은 가격이 매우 높다는 단점을 지니고 있다. 따라서 상대적으로 저가이면서도 일반 납산 축전지에 비해 고출력특성을 갖는 VRLA (Value-regulated lead -acid) 배터리를 사용한 에너지 저장 시스템 구성에 대해 다양한 연구가 수행되었다[1-2].

VRLA 배터리를 활용한 에너지 저장 시스템은 다양한 형태로 구성이 가능하나, 그 중 대전류 충·방전이 가능하고 효율 특성이 우수한 울트라커패시터와 조합함으로써 효율 개선 및 수명 연장이 가능한 에너지 저장장치에 대한 연구가 최근 진행되었다[3-4].

그러나 관련 연구결과에 의하면 배터리와 울트라커패시터를 단순 병렬 형태로 연결한 에너지 저장 장치는 배터리 단독구조에 비해 효율 및 수명 특성이 개선되는 것이 분명하지만, 여전히 시동 및 회생제동 상황에서는 배터리에 순간적인 대전류 충/방전 상황이 발생하고, 또한 효율이 낮은 배터리의 영향으로 인하여 시스템 운용 효율이 낮아 보다 개선된 형태의 에너지 저장장치 구성이 요구되고 있다.

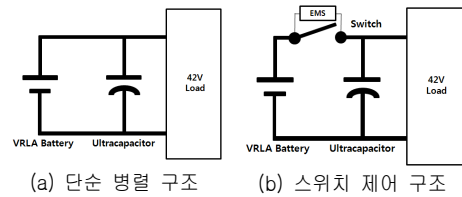
본 논문에서는 이러한 문제점을 개선하기 위해 VRLA 배터리와 울트라커패시터의 단순 병렬구조를 갖는 에너지 저장장치에 스위치를 추가하고, 이 스위치를 적절히 제어함으로써 에너지 저장장치의 효율 및 수명 특성을 개선할 수 있는, 복합형 에너지 저장장치의 스위치 제어 알고리즘을 제안하였다. 또한 마일드 하이브리드 자동차의 운행상황을 모사한 프로파일이 적용된 사이클 시험을 통해, 단순 병렬 구조의 에너지 저장장치와 스위치 제어 알고리즘이 적용된 에너지 저장장치의 시스템 운용 효율을 비교함으로써 제안된 알고리즘의 유용성을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 에너지 저장 장치의 구성

본 논문에서는 시스템 운용 효율 비교 시험을 위해 그림 1(a)의 단순 병렬 구조와 그림 1(b)의 스위치가 포함된 복합형 에너지 저장 장치를 각각 구성하였다. 그림 1(a)에 사용된 VRLA 배터리는 정격용량 20Ah를 갖는 GS사의 36V VRLA 배터리이며, 울트라커패시터는 Nesscap사의 1700F Cell을 18개 직렬 연결한 모듈구조로써, 운용범위내에서의 가용 용량은 0.41Ah이다. 그림 1(b)의 스위치가 포함된 복합형 에너지 저장장치는 그림 1(a)에 구조에 스위치 기능을 갖는 릴레이를 연결하고 이를 EMS(Energy Management System)가 제어하는 형태이다.

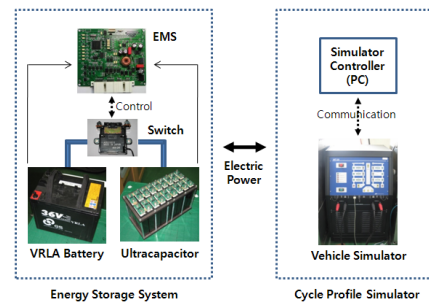
그림 2는 시험에 사용된 장치 구성을 나타낸다. PC의 운용 소프트웨어를 이용하여 차량 운행조건 모사가 가능한 AeroVironment사의 MT-30 장비에 그림 1(a)와 그림 1(b) 각각의 에너지 저장 장치 구조를



(a) 단순 병렬 구조 (b) 스위치 제어 구조

〈그림 1〉 복합형 에너지 저장장치의 구성

연결하여 시험을 진행하였다. 그림 1(b)의 스위치 제어를 위한 EMS는 운용 소프트웨어로부터 입력된 차량 운행상황과 배터리 및 울트라커패시터 각각의 전압, 전류, 온도 등의 측정 데이터를 이용하여 스위치 ON/OFF 제어하게 된다. 또한 각각의 구조에 대한 시험시 외부 온/습도 조건에 의한 영향이 제거되도록 항온/항습기를 이용하여 동일한 환경 조건을 형성하였다.



〈그림 2〉 시험 구성

2.2 시험 절차 및 스위치 제어 알고리즘

본 논문에서 제안한 스위치 제어 구조와 단순 병렬 구조의 동일 조건에서의 비교 실험을 위해 다음과 같은 시험 절차를 구성하였다.

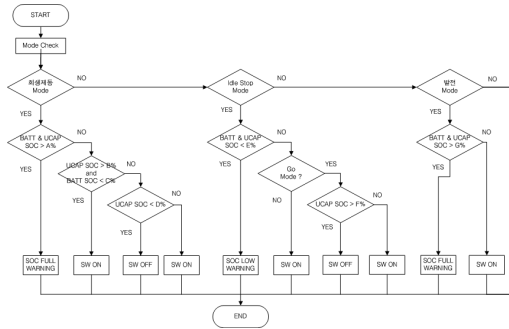
- 1) 에너지 저장 장치의 운용범위에서, 제조회사가 제시한 시험 조건에 따라 완전 충전 및 완전 방전을 반복하며 전체 용량을 측정한다.
- 2) 완전 충전상태에서 절차 1의 전체 용량 측정시와 동일한 방전전류로 SOC 60%가 될 때까지 방전하고, 이때 방전된 용량을 측정한다.
- 3) 차량 운행조건을 모사한 사이클을 300회 반복 수행한다.
- 4) 절차 2에서와 동일한 방전전류로 완전 방전상태까지 방전하며, 이 때 방전된 용량을 측정한다.

위의 시험 절차는 하이브리드 차량이 전체 가용 용량의 60%(SOC 60) 상태에서 사이클을 수행하고, 각각의 에너지 저장장치에 남아 있는 에너지량을 비교함으로써 두 에너지 저장장치 구조의 운용 효율을 비교할 수 있도록 설정되었다. 즉, 사이클 수행 이전의 에너지 저장장치에 남은 용량과 사이클 수행 이후의 에너지 저장장치에 남은 용량을 비교하여 봄으로써 두 구조에 대한 직접적인 비교를 수행하기 위함이다.

설정된 시험 절차에 따라 사이클 시험을 수행함에 있어, 그림 1(b) 구조의 스위치는 다음과 같은 알고리즘에 의해 제어된다. 스위치 제어 알고리즘은 그림 3에서와 같이 간략화 하여 나타낼 수 있다. 기본적으로 스위치는 회생제동 모드, Idle Stop 모드, 발전 모드로 구분되어 제어된다. 먼저 회생제동 모드에서는 기본적으로 울트라커패시터의 SOC를 살펴, SOC가 일정값 이하로 회생제동시 발생하는 에너지의 유입이 가능한 경우 스위치를 OFF 시켜 울트라커패시터 단독으로 회생제동 에너지를 저장하게 된다. 이는 상대적으로 충전효율이 높은 울트라커패시터에 발생 에너지를 저장함으로써 회생에너지의 흡수율을 최대화시키기 위함이다. 또한 배터리와 울트라 커패시터 각각의 SOC를 살펴, 회생제동으로 인해 과충전 발생 우려가 있는 경우, 이에 대한 경고 신호를 출력한

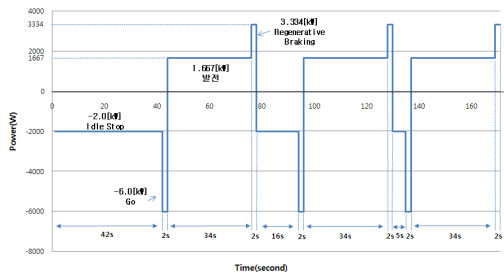
다. 또한 울트라커패시터의 SOC는 높으면 반해 배터리의 SOC가 낮아 회생제동 에너지를 저장할 수 있는 경우, 스위치를 ON 시켜 배터리에 회생제동 에너지가 충전되도록 제어한다. 이 경우 상대적으로 효율이 낮은 배터리로 인하여 회생제동 에너지의 흡수율이 낮아지게 된다.

Idle 모드에서는 울트라커패시터의 SOC가 일정값 이하로 낮아지게 되면 스위치를 ON 시켜 배터리로부터 에너지 방출이 가능하도록 제어한다. 만약 배터리의 SOC도 낮은 경우 이에 대한 경고 신호를 출력하여 차량의 전원 관리 기능의 동작이나 발전 동작이 수행되도록 한다. 그리고 발전모드에서는 배터리와 울트라커패시터의 SOC가 일정값 이상이 되면 발전 동작을 정지하도록 신호를 출력하는 형태이며, 기본적으로 발전 모드에서는 스위치를 ON 시킨다. 단, 발전모드 상태임에도 회생제동 모드로의 진입이 예측되는 상황에서는 스위치를 OFF 시키고 발전 동작을 정지시키도록 신호를 출력하여 울트라커패시터가 회생제동으로 발생하는 에너지를 충분히 흡수할 수 있도록 스위치를 제어한다.



〈그림 3〉 스위치 제어 알고리즘

본 논문에서는 설정된 시험절차를 통해 그림 1 각각의 구조에 대한 운용효율을 비교하기 위해 그림 4와 같은 차량운행 모사 사이클이 사용되었다. 그림 4는 하이브리드 자동차의 운용 상황을 적용하여 에너지 저장 장치의 성능시험을 위해 사용되는 FreedomCAR 42V Battery Test Manual의 ZPA(Zero Power Assist) 사이클 시험 프로파일을 회생제동이 적용된 마일드 하이브리드 차량의 운행 상황에 맞춰 수정한 사이클 프로파일이다.



〈그림 4〉 시험에 사용된 사이클 프로파일

2.3 시험 결과

그림 1(a)의 단순 병렬 구조를 갖는 복합형 에너지 저장 장치에 수행한 사이클 시험 결과 전/후의 용량 변화는 표 1과 같다. 시험결과에 의하면, 그림 1(a) 구조에서의 전체 용량은 23.6Ah 이며 SOC 60% 상태를 맞추기 위해 제조사에서 제정한 방전조건에 따라 방전된 용량은 16.1Ah 였다. 이 상태에서 그림 4의 사이클을 300회 반복 수행하였으며, 수행 후 완전 방전상태까지 방전하며 측정된 용량은 16.2 Ah였다. 즉, 그림 1(a)의 구조에 그림 4의 사이클을 반복수행하여 에너지 저장 장치의 에너지량 변화를 살펴본 결과, 변화가 거의 없었음을 알 수 있었다. 그림 5는 단순 병렬 구조에서의 300회 사이클 반복 시험시의 전압 변화를 나타내고 있으며, 전체적으로 전압 변화가 없음을 알 수 있다. 그러나 그림 5의 배터리 전류 파형에서 알 수 있듯이 울트라커패시터를 병렬 연결하였음에도 여전히 배터리에는 회생제동에 기인한 대전류 충전상황이 발생함을 알 수 있고, 이는 배터리 수명저하의 주요인이 됨을 알 수 있다.

그림 1(b)의 스위치 제어 구조를 갖는 복합형 에너지 저장장치를 단순 병렬 구조에서와 동일한 시험 절차에 따라 수행한 시험 결과는 표 2와 같다. 전체 용량은 23.6Ah와 동일하며 SOC 60%의 에너지량은 16.2Ah 이다. 사이클 시험을 수행한 후 완전 방전상태까지 방전하며 측정된 에너지량은 19.2Ah로써, 사이클 수행 전/후의 에너지 저장장치 용량 변화가 3Ah정도 발생하였다. 이는 사이클 시험시 그림 1(b)와 같은 구조가 단순 병렬 구조에 비해 보다 많은 에너지를 저장하게 되었음을

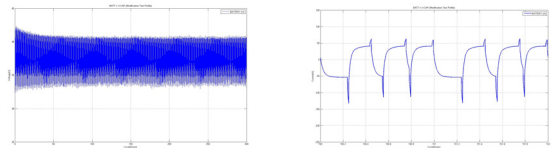
의미한다. 즉, 스위치를 적절히 제어함으로써 단순 병렬 구조에 비해 시스템 전체의 운용효율이 증가하였음을 나타내는 것으로, 이는 충/방전 효율 특성이 상대적으로 우수한 울트라커패시터의 운용을 최대화 시킨 스위치 제어 알고리즘에 기인한 것이다. 또한 그림 6의 배터리 및 울트라커패시터 전압 파형으로부터 에너지 저장장치 전체의 보유 에너지량이 증가하고 있음을 알 수 있다. 그리고 배터리의 전류 측정 파형을 살펴보면, 그림 5에서와는 달리 회생제동에 기인한 배터리의 순간적인 대전류 충전상황이 발생하지 않고 있음을 알 수 있는데, 이는 회생제동시 스위치를 OFF 시켜 배터리의 대전류 유입을 제거하고 울트라커패시터가 이를 모두 담당하게 함으로써 운용효율 개선과 더불어 배터리의 수명 저하현상을 둔화시킬 수 있음을 의미한다.

〈표 1〉 단순 병렬 구조에서의 사이클 시험 결과

전체용량	SOC 60%	시험후 용량	변화량
23.6 Ah	16.1 Ah	16.2 Ah	+0.1 Ah

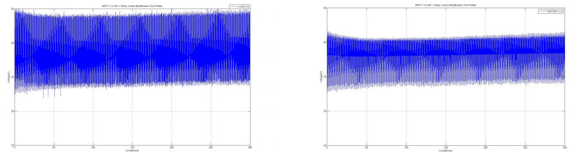
〈표 2〉 스위치 제어 구조에서의 사이클 시험 결과

전체용량	SOC 60%	시험후 용량	변화량
23.6 Ah	16.2 Ah	19.2 Ah	+ 3.0 Ah

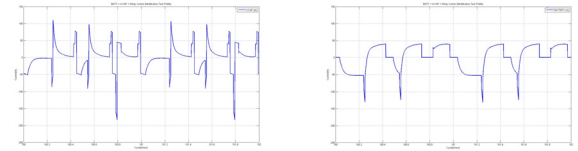


(a) 전압 파형 (b) 배터리 전류 파형(150-152회)

〈그림 5〉 단순 병렬 구조의 복합형 에너지 저장 장치 시험 결과



(a) 전압 파형(좌:울트라커패시터, 우:배터리)



(b) 전류 파형(좌:울트라커패시터, 우:배터리, 150-152회)

〈그림 6〉 스위치 제어 구조의 복합형 에너지 저장장치 시험 결과

3. 결 론

본 논문에서는 마일드 하이브리드 자동차에 적용 가능한 복합형 에너지 저장장치의 구성에 따른 시스템 운용효율 및 수명 특성을 시험을 통해 살펴보았다. 시험 결과 단순 병렬 구조에 비해 적절한 스위치 제어 알고리즘을 갖는 스위치 제어 구조가 동일한 사이클 운용 조건에서 시스템 운용효율이 우수한 것으로 나타났다. 이는 상대적으로 효율이 우수한 울트라커패시터의 운용을 최대화 시킬 수 있는 적절한 스위치 알고리즘을 적용함으로써 회생제동시 발생하는 에너지의 흡수율을 증대시키기 때문이다. 또한 배터리의 수명저하의 주요 요인 중 하나인 대전류 충전상황을 억제할 수 있어 에너지 저장장치의 수명 저하현상을 둔화시킬 수 있음을 확인하였으며, 향후 개선된 수명 특성을 확인할 수 있는 수명 내구시험등의 산술적인 비교 연구가 수행될 필요가 있다.

【참 고 문 헌】

- [1] T. Ohmae, T. Hayashi, N. Inoue, "Development of 36-V value-regulated lead-acid battery," J. Power Sources 116(2003) 105-109
- [2] T. Ohmae, Ken Sawai, Masaaki Shiomi, Shigeharu Osumi, "Advanced technologies in VRLA batteries for automotive applications," J.Power Sources 154(2006) 523-529
- [3] Cyrus Ashtiani, Randy Wright, Gary Hunt, "Ultracapacitors for automotive applications," J. Power Sources 154(2006) 561-566
- [4] Adam W. Stienecker, T. Stuart, C. Ashiani, "A Combined Ultracapacitor - Lead Acid Battery Energy Storage System for Mild Hybrid Electric Vehicles," Vehicle Power and Propulsion, 2005 IEEE Conference, Sept. 2005.