論 文
56-10-10

마일드 하이브리드 차량용 복합형 에너지 저장장치의 성능개선에 관한 연구

A Study on Performance Improvement of Hybrid Energy Storage System for Mild HEV

李 栢 行* · 申 東 賢** · 金 熙 峻†
(Back-Haeng Lee · Dong-Hyun Shin · Hee-Jun Kim)

Abstract - To improve the cycle-life and efficiency of an energy storage system for HEV, a dynamic control system consisted of a switch between a battery and an ultracapacitor module is proposed, which is appropriate for mild hybrid vehicle with 42V power net. The switch can be controlled based on the status of the battery and the ultracapacitor module, and a control algorithm that could largely decrease the number of high charging current peak is also implemented. Therefore the cycle life of the battery can be improved such that it is suitable for a mild hybrid vehicle with frequent engine start-stop and regenerative-braking. Also, by maximizing the use of the ultracapacitor, the system efficiency during high current charging and discharging operation is improved. Finally, this system has the effects that improves the efficiency of energy storage system and reduces the fuel consumption of a vehicle. To verify the validity of the proposed system, this paper presented cycles test results of different energy storage systems: a simple VRLA battery, hybrid energy pack (HEP, a VRLA battery in parallel with Ultracapacitor) and a HEP with a switch that controlled by energy management system (EMS). From the experimental result, it was proved the effectiveness of the algorithm.

Key Words : Mild HEV, Hybrid Energy Package, Ultracapacitor, VRLA Battery, Energy Management System

1. 서 론

자동차에서 조명장치를 사용하기 위해 전기가 사용된 이후 사용되는 전기에너지 양은 지속적으로 증가하고 있으며, 더욱이 최근 자동차의 전장화 비율이 급격히 증가함에 따라 전기에너지의 효율적인 발생, 저장 및 분배에 대한 관심이 고조되고 있다. 특히 차량 내 전원 시스템을 기존 시스템의 3배에 해당하는 42V로 승압하는 방안이 미국, 유럽, 일본 등 선진 자동차 업계를 중심으로 추진되고 있으며, 일본의 도요다, 미국의 GM 등에서 일부 양산차량에 적용하고 있다.

이와 같이 새로운 42V 전원체계를 갖는 차량이 도입되게 되면서 차량의 전장화는 더욱 가속되고 있으며, 최근의 하이브리드 자동차 개발 동향과 더불어 에너지의 효율적 저장 및 관리를 위한 에너지 관리 시스템의 필요성이 크게 대두되고 있다.[1]

일반적으로 42V 마일드 하이브리드 차량에 적용 가능한 에너지 저장장치가 갖추어야 하는 가장 중요한 요건은 충분한 수명과 용량이다. 연비개선을 목적으로 차량이 일정시간 이상 정차하는 경우에 엔진을 정지시키는 Idle Stop- Start 기능은 엔진의 시동횟수를 기존 차량의 최대 10배정도까지 증가시키게 된다. 시동에 필요한 에너지는 차량의 에너지 저장장치로부터 전부 공급되므로, 에너지 저장장치가 축전지로 구성된 경우에는 대전류의 충/방전이 반복됨에 따라 수명이 현저히 감소하게 된다.

게다가 엔진 출력이 상대적으로 낮은 저속구간 혹은 순간적인 가속구간에서도 짧은 시간동안 상당히 높은 출력을 필요로 하므로, 축전지로 구성된 에너지 저장장치의 수명에 악영향을 미치게 된다. 그리고 차량 제동 시에 운동에너지를 전기에너지로 회수하는 회생제동 기능이 적용된 차량의 경우에서는, 평상시 충전 전류량에 비해 매우 큰 전류가 짧은 시간동안 에너지 저장장치에 공급되므로 축전지의 수명 및 성능 저하 현상이 심화되게 된다.[2,3,5]

따라서 기존 시스템에 비해 성능 및 수명 특성이 개선된 새로운 에너지 저장장치가 요구되었으며, 다양한 연구 성과의 일부로서, 그림 1과 같이 기존 시스템을 개선한 이중 전압, 이중 배터리 구조가 제안되기도 하였다.

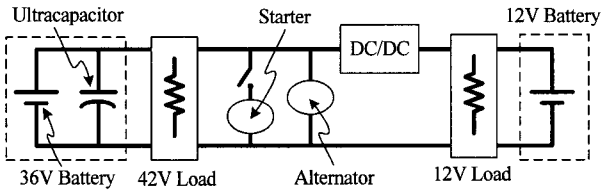


그림 1 기존의 42V 복합형 에너지 저장장치의 구성도
Fig. 1 Configuration of the conventional 42V hybrid energy storage system

* 正 會 員 : 漢陽大學校 電子電氣制御計測工學科 博士課程
** 正 會 員 : 漢陽大學校 電子電氣制御計測工學科 博士課程
† 교신저자, 終身會員 : 漢陽大學校 電子·컴퓨터工學部 敎授·工博
E-mail : hjkim@hanyang.ac.kr
接受日字 : 2007年 8月 8日
最終完了 : 2007年 9月 5日

그림 1의 에너지 저장장치 구성은 기존 축전지로써 요구 출력이 낮으면서도 많은 전기에너지를 필요로 하는 부하에 대응하고, 순간적인 고출력을 요하는 부하는 울트라 커패시터(Ultracapacitor)로 분담하는 형태이다.

축전지와 울트라커패시터의 병렬 구조는 순간적인 고출력과 지속적인 에너지 공급이 가능한 반응성과 용량의 확보가 가능하며, 기존의 축전지만 단독으로 존재하는 에너지 저장 시스템에 비해 수명이 증가하는 장점이 있다. 또한 축전지와 함께 울트라커패시터가 사용되면서 일반적으로 충/방전 효율이 개선되는 특성을 보이게 된다.

이는 축전지가 낮은 충/방전 효율 특성을 나타내게 되는 주요 원인인, 순간적인 고율 충/방전시의 대전류 변화를 울트라커패시터가 분담하게 됨으로써, 기존의 축전지 단독 시스템에 비해 효율이 높게 나타나는 것이다. 그러나 여전히 축전지의 수명저하 현상에 큰 영향을 미치는 대전류 충전상황에 축전지가 노출되어 있어 지속적인 수명저하가 발생하며, 축전지의 낮은 효율 특성에 기인한 효율저하 등의 문제는 개선의 여지가 있다.

본 논문에서는 축전지와 울트라커패시터를 조합한 기본 형태의 복합형 에너지 저장장치 시스템에 그림 2와 같이 스위치를 삽입하여 축전지가 전원선과 완전하게 분리 가능한 형태의 개선된 복합형 에너지 저장장치를 구성하였다. 그리고 축전지와 울트라커패시터의 상태를 모니터링하고, 이 상태정보를 기반으로 에너지 흐름을 제어하는 에너지 관리 시스템 (EMS, Energy Management System)을 개발하였다.

그림 2의 개선된 복합형 에너지 저장장치에서는 축전지와 울트라커패시터의 상태에 따라 스위치 ON/OFF 상태를 제어한다. 스위치가 OFF 되는 경우에는 축전지가 전원선으로부터 분리되고 충/방전 효율특성이 우수한 울트라커패시터만 단독으로 전원선에 연결되어 있다.

따라서 차량에서 발전된 전기에너지를 기존 에너지 저장장치에 비해 보다 효율적으로 저장할 수 있으며, 축전지로의 전류 흐름이 없으므로 축전지 충/방전 횟수를 줄여 수명저하 현상을 개선하는 장점이 있다. 즉, 그림 1의 단순한 병렬 구조인 복합형 에너지 저장장치에 스위치만 추가되더라도, 이를 적절히 제어함으로써 시스템 전체의 효율과 수명을 개선할 수 있는 것이다.

본 논문에서는 동일한 시험 조건하에서 '축전지만 단독으로 존재하는 에너지 저장 시스템', '축전지와 울트라커패시터의 단순 병렬구조인 복합형 에너지 저장 시스템', '스위치가 추가된 복합형 에너지 저장 시스템'을 각각 시험하여, 각각에서의 수명과 효율 특성을 비교하였다. 그리고 실험 결과로부터 개선된 복합형 에너지 저장 시스템의 효용성을 확인하였다.

2. 개선된 복합형 에너지 저장장치

2.1 복합형 에너지 저장장치의 구성

일반적으로 자동차에 사용되는 에너지 저장장치인 축전지는 상대적으로 높은 에너지 밀도를 지니며 큰 전기 에너지를 저장할 수 있다.[5] 그러나 출력밀도가 낮아 대전류 충/방전을 필요로 하는 운전조건하에서는 축전지의 수명이 단축될 가능성이 높다.

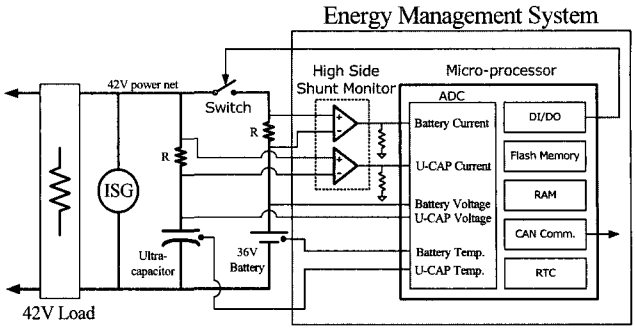


그림 2 개선된 42V 마일드 HEV용 HEP의 구성
Fig. 2 Configuration of the Improved HEP 42V Mild HEV

특히 42V 전원 시스템을 갖는 마이들 하이브리드 차량에 에너지 저장장치로 축전지를 사용하는 경우, Idle Stop-Start나 회생제동 기능이 빈번하게 사용되면 에너지 저장장치의 수명을 보증하는데 어려움이 있는 것으로 알려져 있다.[6]

이런 단점을 보완하기 위한 방안의 하나로써 축전지에 비해 출력밀도가 매우 높은 울트라커패시터를 활용하는 방법이 있다.[4] 이는 에너지 저장능력이 큰 축전지와 높은 출력밀도 특성을 갖는 울트라커패시터를 조합하여 대전류 충/방전 상황에 대처 가능한 복합형 에너지 저장장치를 구성하는 방법이다. 복합형 에너지 저장장치는 울트라커패시터의 우수한 출력 특성을 효과적으로 이용하여 에너지 저장장치의 성능 및 수명을 개선하고 운용 효율을 높이는 것이 가능하다. 그러나 복합형 에너지 저장장치를 구성하는 축전지로의 대전류 충전상황이 여전히 존재하여 축전지의 수명이 저하될 여지가 존재한다. 따라서 본 논문에서는 이를 개선한 복합형 에너지 저장장치를 제안하였다.

본 논문에서 제안된 복합형 에너지 저장장치는 그림 2와 같이 구성하였다. 제안된 저장장치는 에너지의 입/출력 시 화학반응이 동반되지 않아 대전류 충/방전이 가능한 울트라커패시터는 항상 전원선과 연결된 상태이며, 상대적으로 많은 에너지를 저장할 수 있으나 반응이 느리고 효율이 낮은 축전지는 스위치를 사용하여 전원선과 연결 상태 조절이 가능한 구조이다. 스위치는 울트라커패시터를 최대한 활용하여 축전지의 충/방전 빈도를 줄이고 에너지 저장장치의 효율을 개선하기위해 사용되었다. 개선된 복합형 에너지 저장장치를 구성하는 축전지와 울트라커패시터의 사양은 표 1, 표 2와 같다. 사용된 축전지는 36V VRLA(Valve Regulated Lead Acid) 이며 울트라커패시터는 1700F 용량을 갖는 셀 18개를 직렬로 연결한 모듈형태이다.

표 1 사용된 36V VRLA 축전지 사양
Table 1 Specification of 36V VRLA battery

정격 전압	정격 용량	에너지 밀도	출력 밀도
36 [V]	20 [AH]	29.3 [Wh/kg]	381.5 [W/kg]

표 2 사용된 울트라커패시터 모듈 사양
Table 2 Specification of Ultracapacitor Module

정격 전압	정격 용량	DC ESR	최대 저장 에너지
36 [V]	94.5 [F]	7 [mΩ]	25.4 [Wh]

2.2 에너지 관리 장치 (EMS)

개선된 복합형 에너지 저장장치를 효과적으로 운용하기 위해서는 축전지와 울트라커패시터 각각의 전압 및 입/출력 전류를 측정하여 축전지와 울트라커패시터의 에너지 충전상태 (SOC, State of Charge)를 정확히 파악하고, 이를 바탕으로 제안한 스위치를 적절히 제어하여야만 한다.

따라서 에너지 관리 장치는 빠른 연산 처리 능력과 더불어 정확한 전압, 전류 측정 기능이 필수적이다. 또한 복합형 에너지 저장장치가 적당한 온도 범위 내에서 동작하도록 온도를 검출하고 냉각 팬을 제어하는 복합적 기능을 수행하여야 한다. 그림 3은 제안된 복합형 에너지 저장장치에 적용한 에너지 관리 장치 제어기 사진이다.

개발된 에너지 관리 장치는 시동, 가속 상태와 같이 상대적으로 큰 에너지가 소요되거나 회생제동과 같이 짧은 시간에 많은 에너지를 회수 하는 경우에는 대전류 운전에 유리한 울트라커패시터를 주로 사용하고, Idle Stop 상태에서 각종 편의장치나 전장부하들이 사용되는 대전력 소비 상황에서는 축전지와 울트라커패시터가 동시에 에너지를 공급하도록 제어한다. 이를 위해 축전지와 울트라커패시터의 SOC 값을 정확히 산출하고 각각의 SOC 값에 따라 스위치를 제어할 필요가 있다.

본 논문에서는 복합형 에너지 저장장치의 SOC 값 산출 방법으로 개방전압 (OCV, Open Circuit Voltage) 측정법과 AH 적산(Ampere Hour Counting) 방법을 함께 사용 하였다. 일반적으로 개방전압 측정법을 사용하는 경우, 충분한 휴지시간 이후에는 비교적 정확하게 SOC 값을 파악할 수 있다.

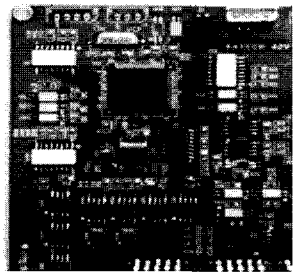


그림 3 개발된 에너지 관리 장치 제어기
Fig. 3 The developed controller of EMS

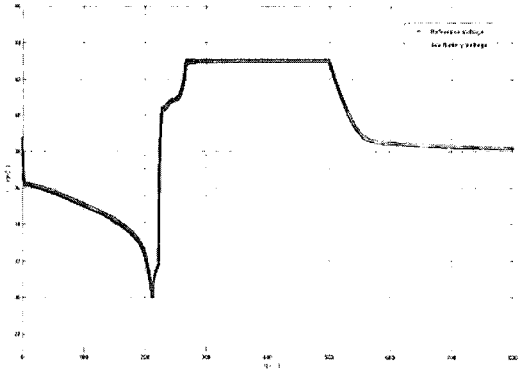


그림 4 에너지 관리 장치의 전압 측정 성능
Fig. 4 performance of EMS for measuring Voltage

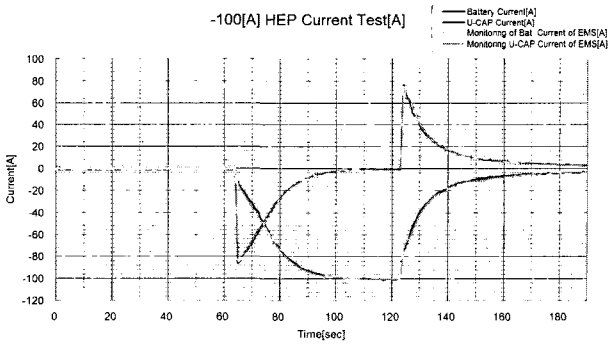


그림 5 에너지 관리 장치의 전류 측정 성능
Fig. 5 performance of EMS for measuring Current

그러나 충/방전 상태이거나 축전지나 울트라커패시터가 안정화 될 정도의 충분한 휴지시간을 갖지 못한 상태에서는 큰 오차를 갖는다. AH 적산 방법은 복합형 에너지 저장장치로의 입/출력 전류를 적산하여 SOC 값을 산출하는 방법으로, 실시간 SOC 값 산출이 가능하나 전류나 전압 측정 시 발생하는 오차로 인하여 SOC 값의 오차가 누적되는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 이를 병행 사용하여, AH 적산 방법을 기본으로 하고 일정시간 이상의 휴지기간이 발생하면 개방전압에 해당하는 SOC 값과 비교하여 오차를 보정하도록 하였다.

그림 4와 그림 5는 개발된 에너지 관리 장치의 전압, 전류 측정 성능을 나타내는 실험 결과이다. 그림 4는 구성된 복합형 에너지 저장장치의 운용전압 범위 내에서 실시한 전압 측정실험 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 전체 전압 범위에 걸쳐 실제 전압과 약 2%이내의 오차범위에서 정확히 측정됨을 확인하였다. 그림 5는 모사된 차량운행조건을 기반으로 실시한 전류 측정실험 결과이다. 전류 측정도 작은 오차 범위 내에서 측정되고 있음을 확인하였다.

개발된 에너지 관리 장치는 축전지와 울트라커패시터의 SOC 값에 따라 스위치를 제어한다. 스위치는 울트라커패시터의 SOC가 60%이상 그리고 축전지의 SOC가 80%이상이 되면 스위치를 OFF 시켜 축전지를 전원선에서 분리시킨다. 반면에 울트라커패시터의 SOC가 40% 미만이거나 축전지의 SOC가 60% 미만인 상황에서는 스위치를 ON 시켜 울트라커패시터와 축전지가 병렬 연결된 구조가 되도록 제어된다.

이러한 SOC에 따른 스위치 제어법은 기존의 복합형 에너지 저장장치와는 달리 울트라커패시터가 단독으로 운용되는 상황을 임의로 발생시켜 에너지 운용 효율을 개선하고, 축전지의 충/방전 빈도를 저감시켜 수명을 개선하기 위한 방법이다. 따라서 실제 차량 운용조건에서 시동 후 발전 동작에 의해 축전지의 SOC가 80%, 울트라커패시터의 SOC가 60%이상으로 충전되게 되면, 스위치가 OFF 되어 울트라커패시터만 단독으로 존재하는 상황이 발생하게 된다. 이 때, 상대적으로 효율이 좋고 용량이 작은 울트라커패시터는 짧은 시간 안에 충전이 완료되고, 결국 울트라커패시터의 충전 완료시점부터는 에너지 저장장치의 충전을 위한 발전량은 생략될 수 있으므로 이에 해당하는 연료 소비량만큼이 절감된다.

다시 말하면, 기존의 복합형 에너지 저장장치는 축전지가·

지니는 낮은 충/방전 효율 특성으로 인하여, 에너지 저장장치 전체의 충/방전 효율이 울트라커패시터만 단독으로 존재하는 경우에서보다 낮을 수밖에 없으므로, 동일한 전기에너지를 충전하기 위해 소요되는 연료가 울트라커패시터만 단독으로 존재하는 경우에서 상대적으로 적게 사용되는 것이다.

게다가 울트라커패시터가 시동 시 요구되는 에너지를 충분히 공급할 수 있다면, Idle-Stop 이후 재시동을 위한 에너지 공급을 울트라커패시터가 전부 부담하게 되어, 에너지 저장장치의 효율과 축전지의 수명 저하에 악영향을 미치는 축전지의 대전류 방전 상황을 최소화 할 수 있게 된다. 그러나 시동에 요구되는 에너지는 매우 크고 Idle Stop 상태에서 전장 부하에 공급하여야 하는 에너지량을 함께 고려한다면, 이를 충족시킬 정도의 전기 에너지를 보유할 수 있는 울트라커패시터 용량은 매우 커지게 된다. 따라서 마일드 하이브리드 차량의 운행 조건을 고려할 때, 재시동시 울트라커패시터만을 이용하는 것은 경제성 측면에서 어려움이 있으므로 축전지가 함께 분담할 수 있도록 스위치를 ON 시켜주어야 한다.

본 논문에서는 이와 같이 에너지 관리 장치를 이용하여 축전지와 울트라커패시터의 SOC 값을 정확히 산출한 후, 이를 바탕으로 42V 마일드 하이브리드 차량의 운행상황에 적합한 스위치 제어를 함으로써 빈번한 재시동 및 회생제동으로 인해 기존의 복합형 에너지 저장장치가 지녔던 효율과 수명 저하 문제를 개선하였다.

3. 사이클 시험 결과

본 논문에서는 축전지로만 구성된 에너지 저장장치와 울트라커패시터가 병렬 연결된 복합형 에너지 저장장치의 수명 및 효율 비교를 위해 동일한 조건하에서 사이클 실험을 진행하였다. 적용된 사이클 프로파일은 마일드 하이브리드 차량의 운행 상황을 모사하여 그림 6과 같이 구성하였다.

Mode 1은 사이클 초기 100초간으로 Idle Stop 상태에서 부하에 에너지를 공급하고 있는 상태를 나타낸다. Mode 2는 Idle Stop 이후 재시동에 요구되는 에너지를 의미하며 이때, 에너지 저장장치는 6.5kw 에너지를 2초간 공급할 수 있어야 한다. Mode 3은 시동 후 차량의 발전 동작에 의해 에너지 저장장치로 충전이 이루어지는 구간이다. 그리고 Mode 4는 차량의 회생제동에 의한 유입되는 회생 에너지를 의미한다. 따라서 Mode 1과 Mode 2는 에너지 저장장치의 방전 에너지를, Mode 3과 Mode 4는 에너지 저장장치로 유입되는 충전 에너지를 의미한다.

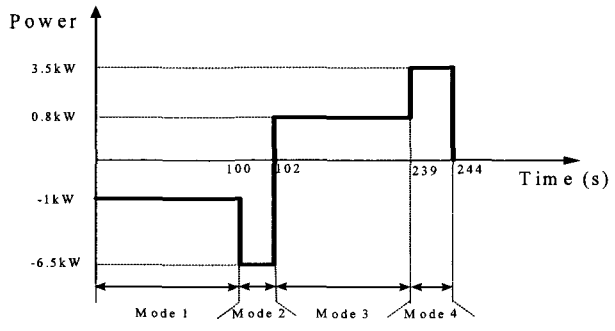


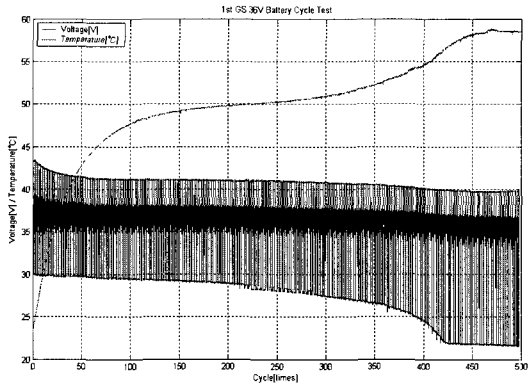
그림 6 충/방전 사이클 프로파일

Fig. 6 The profile for charging/discharging cycle test

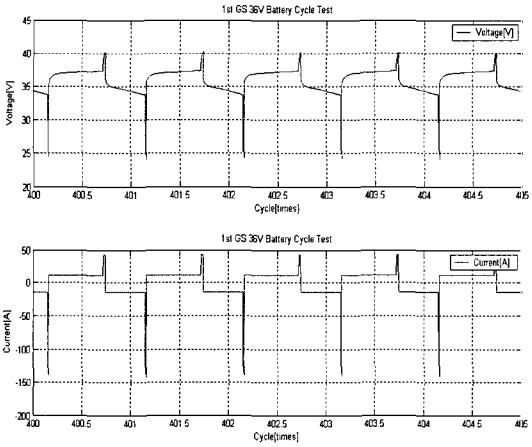
일반적으로 에너지 저장장치의 충/방전 효율은 1이 아니므로 이를 고려하여 방전 에너지보다 큰 충전 에너지를 공급하여야 에너지 저장장치는 일정한 전기 에너지를 보유하고 있게 된다. 따라서 본 실험에서도 축전지의 충/방전 효율 측정 시험결과로부터 얻은 효율을 고려하여, 방전에너지의 112.5%에 해당하는 에너지를 충전 에너지로 공급한다. 그리고 이 사이클 프로파일을 적용하여 '축전지만으로 구성된 에너지 저장장치', '복합형 에너지 저장장치', '스위치를 포함한 개선된 복합형 에너지 저장장치' 각각의 사이클 시험을 수행하고 전압, 전류 파형을 관찰함으로써 각 에너지 저장장치의 효율 및 수명을 비교하였다.

그림 7은 축전지로만 구성된 에너지 저장장치에 그림 6의 프로파일을 적용하여 실험한 결과이다. 실험은 그림 6의 사이클 프로파일을 500회 반복 수행하였으며 100ms 마다 전압, 전류를 측정하였다, 사용된 축전지는 20AH 용량을 갖는 GS 36V VRLA 형태의 축전지로서 SOC 60% 상태에서 실험을 시작하였다.

그림 7(a)에 의하면 그림 6의 프로파일에 의해 초기 50사이클까지는 전압이 일정 폭을 유지하지만 이후로는 점차 전압이 낮아지는 방전 모드로 진행되고 있음을 알 수 있다.



(a) 전체 사이클에서의 전압, 온도 변화



(b) 전압(상), 전류(하) 상세 파형

그림 7 축전지만 사용된 에너지 저장장치의 사이클 시험

Fig. 7 Test result of the energy storage system using only the VRLA battery

즉, 측정된 축전지 충/방전 효율에 기인하여 방전 에너지보다 큰 충전 에너지를 공급함으로써 50 사이클 수행 전/후의 축전지 저장 에너지는 거의 유지되었으나 점차 축전지의 성능이 저하되어 효율이 감소함에 따라 저장된 에너지가 유지 되지 못하고 점차 방전모드로 진행하고 있는 것이다.

그리고 재시동 상태와 회생제동 상태를 나타내는 Mode 2와 Mode 4에서, 순간적인 에너지의 입/출력으로 인하여 대전류 충/방전이 축전지에서 일어나고 있음을 7(b)에서 알 수 있다. 이러한 대전류 충/방전은 축전지의 충/방전 효율을 저하시키고 수명에 악영향을 미치는 큰 요인이 된다. 따라서 사이클이 반복될수록 점차 축전지의 성능이 저하되어 그림 7(a)에서와 같이 370사이클 이상에서는 순간적인 축전지 전압이 최저 전압 운용범위인 27V 이하까지 내려간다.

게다가 사이클이 반복될수록 점차 제한 최저전압인 21V에 도달하게 되는데, 이때부터는 시동시 요구되는 에너지를 충분히 공급하지 못하는 상태로 축전지의 수명이 종료되었음을 의미한다. 결과적으로 42V 마일드 하이브리드 차량의 에너지 저장장치로 축전지만을 사용하는 경우, 충분한 수명과 성능이 보장되지 못함을 알 수 있다.

그림 8은 GS사의 20AH 축전지와 94.5F 용량의 울트라커패시터 모듈이 병렬로 연결된 복합형 에너지 저장장치에 대한 사이클 실험 결과이다.

그림 7에서와는 달리 500사이클이 될 때까지 에너지 저장장치의 전압변동은 거의 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 이는 500사이클의 실험 상황에서는 복합형 에너지 저장장치의 성능이 거의 저하되지 않고 유지되며, 축전지만 존재하는 경우보다 에너지 운용 효율이 개선되었음을 의미한다. 또한 복합형 에너지 저장장치의 사이클 시험시 측정된 그림 9(b)와 같은 울트라커패시터 전압, 전류 파형을 보면 대전류 충/방전이 발생하는 시동 및 회생 제동시 울트라커패시터가 전류를 분담하여 공급함을 알 수 있다.

따라서 축전지만 존재하는 에너지 저장장치에 비하여 축전지의 수명에 미치는 악영향이 경감된다고 할 수 있다.

그러나 그림 9(a)에서와 같이 축전지와 울트라커패시터가 병렬 연결된 복합형 에너지 저장장치라 하더라도 축전지의 대전류 충/방전이 반복되고 있으며, 특히 축전지의 수명 및 효율에 가장 큰 악영향을 미치는 대전류 충전상황이 여전히 존재하는 문제가 있다.

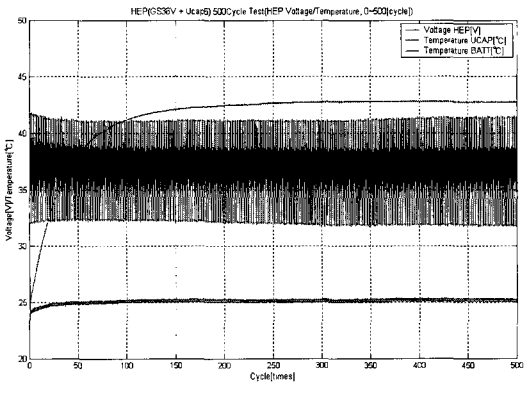
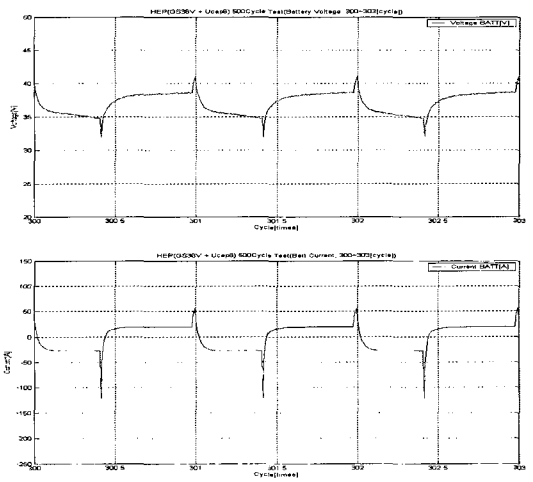
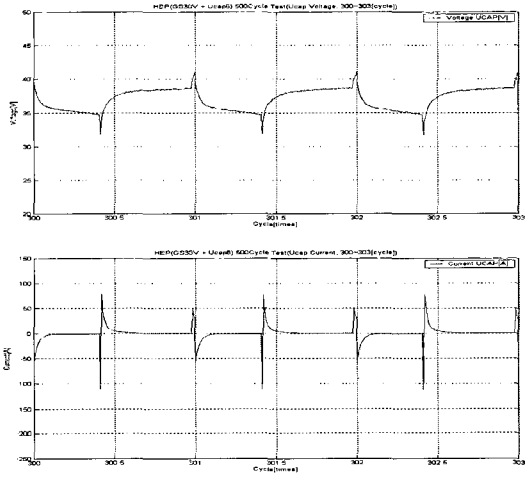


그림 8 복합형 에너지 저장장치의 사이클 시험결과
Fig. 8 Cycle test result of hybrid energy storage system



(a) 배터리의 전압, 전류



(b) 울트라커패시터의 전압, 전류

그림 9 복합형 에너지 저장장치의 전압 및 전류 파형
Fig. 9 Voltage and current waveform of HEP

축전지의 대전류 충전은 마일드 하이브리드 차량의 주요 기능인 회생제동 시에는 필수적으로 발생하게 되는 것으로, 축전지와 울트라커패시터의 병렬 구조로 인하여 축전지에 흐르는 전류 크기를 어느 정도 낮추었다고 하더라도 반복적인 대전류 충전은 점차 복합형 에너지 저장장치의 성능과 수명을 저하시킬 것이다.

그러므로 이를 개선하기 위하여 본 논문에서는 에너지 관리 장치에 의해 제어되는 스위치가 포함된 복합형 에너지 저장장치를 제안하였다. 그림 10은 스위치를 갖는 개선된 복합형 에너지 저장장치의 사이클 실험 결과이다. 그림에서와 같이 초기 120사이클 정도까지는 축전지와 울트라커패시터의 단순 병렬구조와 동일한 형태의 전압 파형을 나타낸다. 이는 복합형 에너지 저장장치의 SOC가 60%인 상태에서부터 시작하기 때문에, 축전지의 SOC가 70% 이상 될 때까지는 스위치가 OFF 상태이기 때문이다.

그러나 앞선 그림 8에서와 같이 병렬 구조로 인한 효율 개선효과로 인하여 사이클이 진행됨에 따라 점차 축전지의

SOC가 증가하게 된다. 축전지 SOC가 70%이상인 120사이클 이후부터는 울트라커패시터의 SOC가 40%미만이 되는 순간에는 스위치가 ON, SOC 60% 이 되면 스위치가 OFF 되는 상황을 반복하게 된다.

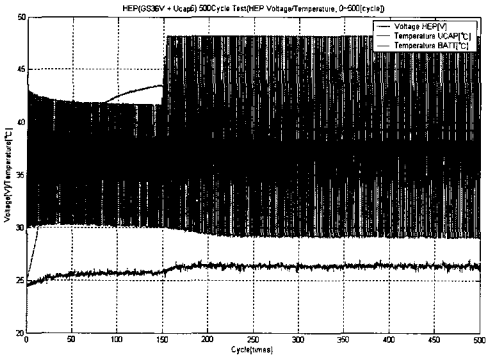
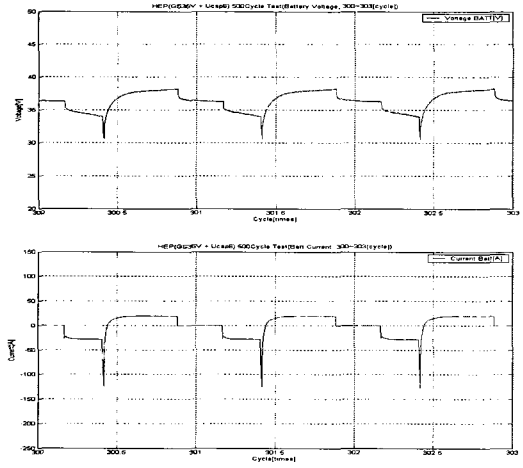
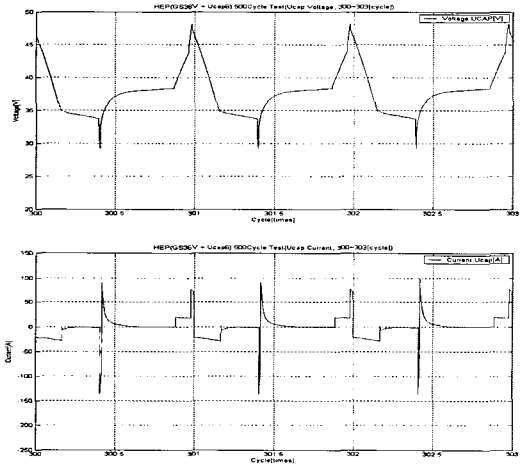


그림 10 개선된 복합형 에너지 저장장치에서의 사이클 시험
Fig. 10 Cycle test result of the improved HEP



(a) 배터리의 전압, 전류



(b) 울트라커패시터의 전압, 전류

그림 11 스위치 제어에 의한 전압, 전류 변화
Fig. 11 Waveform of voltage and current caused by the switch control

그림 11은 제안한 스위치 제어가 적용되는 구간에서의 축전지와 울트라커패시터에서의 전압, 전류 파형을 나타낸다. 그림 11(a)에서 알 수 있듯이 사이클의 시작지점에서는 스위치가 OFF 되어 있는 상태이다. 이는 Mode 1인 Idle Stop 상태로, 전장부하에 의한 에너지 소모는 모두 울트라커패시터가 담당하게 된다. 그러나 울트라커패시터의 절대 에너지 보유량은 작기 때문에 일정시간 이후에는 울트라커패시터의 SOC가 40% 미만으로 낮아지게 되어 스위치가 ON된다. 그리고 이 순간부터의 에너지 공급은 축전지와 울트라커패시터가 병행하게 되는데, 절대 에너지 보유량이 높은 축전지가 대부분의 에너지를 공급하게 된다.

사이클 시작 후 Mode 2에 해당하는 시동 상황이 발생하면, 시동에 요구되는 대전류 축전지와 울트라커패시터가 분담하게 된다. 이 때 반응성이 뛰어난 울트라커패시터가 초기에 다소 높은 전류를 공급하다가 점차 축전지의 공급 전류가 커짐에 따라 감소하는 형태를 지닌다. 시동이 완료된 Mode 3 상황에서는 발전 동작에 의해 에너지가 복합형 에너지 저장장치로 공급되고, 반응성이 뛰어난 울트라커패시터가 먼저 충전 모드로 전환된다. 그러나 축전지는 서서히 방전 전류가 감소하여 점차 충전모드에 진입하고 이에 따라 울트라커패시터로 유입되는 에너지는 점차 감소하게 된다. 축전지가 상대적으로 효율이 좋은 낮은 전류대역에서 충전되게 되며, Mode 1과 Mode 2에서 방전된 에너지만큼 다시 충전되어 축전지의 SOC가 70%를 넘게 되면 스위치는 다시 OFF 된다.

이와 같이 스위치가 OFF되면 울트라커패시터만 전원선에 연결되어 있는 상태가 되므로 용량이 작은 울트라커패시터는 빠르게 전압이 상승한다, 특히 회생제동이 시작되는 Mode 4에 진입하면 회생 에너지는 모두 울트라커패시터에 유입되고, 효율과 반응성이 좋은 울트라커패시터가 순간적인 발전량 대부분을 흡수할 수 있는 장점이 있다.

또한 축전지가 분리되어 있으므로 순간적인 대전류 충전으로 인한 축전지 수명 저하가 발생하지 않는 이점도 갖게 된다. 즉, 그림 9의 상황에서보다 축전지의 충전 빈도가 감소하는 효과가 있으며, 특히 대전류 충전이 발생하지 않게 되므로 축전지의 수명은 마일드 하이브리드 차량의 빈번한 재시동 및 회생제동을 만족시킬 만큼 증가하게 된다.

게다가 회생제동으로 인한 에너지 공급시 반응성과 효율이 뛰어난 울트라커패시터만 단독으로 존재하므로 단순한 병렬구조시보다 에너지 운용 효율은 증가하게 된다.

결론적으로 실험 결과에 의하면, 축전지를 단독으로 사용하는 경우보다 울트라 커패시터와 병렬구조를 이루는 복합형 에너지 저장장치가 효율과 수명 특성이 우수하지만 여전히 빈번한 대전류 충전으로 인한 악영향이 존재하는 반면 개선된 복합형 에너지 저장장치는 복합형의 기본적인 장점과 더불어 적절한 스위치 제어를 통해 축전지의 대전류 충전 상황을 생략시킴으로써 보다 우수한 효율 및 수명 특성을 가질 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 42V 전원체계를 갖는 마일드 하이브리드 자동차에 적합한 개선된 복합형 에너지 저장장치를 제안하

였다. 제안된 복합형 에너지 저장장치의 구조는 울트라커패시터와 축전지의 병렬 구조를 바탕으로, 스위치를 이용하여 임의적으로 축전지를 전원선과 분리 가능한 구조이다. 울트라커패시터와 축전지로 구성된 복합형 에너지 저장장치에 스위치만 추가하고 에너지 관리 장치로 적절히 제어함으로써, 단순한 병렬 구조시보다 축전지의 수명 및 에너지 효율을 개선할 수 있음을 실험을 통해 증명하였다. 본 논문에서 개발된 에너지 관리 장치는 울트라커패시터와 축전지 각각의 전압, 전류를 모니터링하고 이를 바탕으로 각각의 SOC 값을 연산한다. 그리고 SOC값에 따라 스위치를 제어함으로써 축전지의 수명에 큰 영향을 미치는 대전류 충전상황이 발생할 빈도를 현격히 줄일 수 있다. 그러나 적절한 스위치 제어를 위해서는 에너지 관리 장치의 축전지와 울트라커패시터의 SOC 측정이 매우 정확해야 한다는 전제조건이 있으며, 향후 개선된 효율 및 수명증가에 따른 연비개선 효과, 절감 비용 등에 대한 정량적인 분석 연구가 추가적으로 진행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] Mehrdad Ehsani, Ali Emadi and Hongwei Gao, "42V Automotive Power Systems," 42V Technology and Advanced Vehicle Electrical Systems, SAE, pp.1-5, 2001.

[2] Andrew Burke and Marshall Miller, " Comparisons of Ultracapacitors and Advanced Batteries for Pulse Power in Vehicle Applications : Performance, Life, and Cost", 19th Electric Vehicle Symposium, 2002.

[3] Kousuke Suzui, Shuichi and Takeshi Tachibana, "A Battery System for the Crown Mild Hybrid," 19thElectricVehicleSymposium,2002.

[4] C. Jehoulet, L. Moreau and B. Pichon, "Ultracapacitors : Power Buffer for Automotive Applications" 17th Electric Vehicle Symposium , 2000.

[5] Dell A. Crouch, Gary L. Ballard, "Batteries for 42/14 Volt Automotive Electrical Systems," Transitioning to 42V Electrical Systems, SAE, pp.71-76, 2000.

[6] Paul Nicastri and Henry Huang, "42V PowerNet : Providing the Vehicle Electrical Power for the 21st Century," Transitioning to 42V Electrical Systems, SAE, pp.1-7, 2000.

저 자 소 개

이 백 행 (李 栢 行)

1969년생. 1992년 중앙대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년~현재 한양대학교 전자전기제어계측공학과 박사과정. 현재 자동차부품연구원(KATECH) 전장기술연구센터 센터장

TEL : 041-559-3166

E-mail : leebh@katech.re.kr

신 동 현 (申 東 賢)

1973년생. 1999년 성균관대학교 기계공학과 졸업. 2001년 광주과학기술원 기전공학과 졸업(석사). 2006년~현재 한양대학교 전자전기제어계측공학과 박사과정. 현재 자동차부품연구원 전임연구원

TEL : 041-559-3170

E-mail : dhshin@katech.re.kr

김 희 준 (金 熙 峻)

1954년. 1976년 한양대학교 전자공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1986년 일본 큐슈대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 1987년~현재 한양대학교 전자·컴퓨터 공학부 교수.

TEL : 031-400-5164

E-mail : hjkim@hanyang.ac.kr