2009년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2009. 7. 14 - 17

Ultra-Capacitor 모듈이 사용된 하이브리드 에너지저장장치의 동적 SOC 보정에 관한 연구

송현식*, 정진범**, 이백행**, 신동현**, 김병훈**, 허훈*
고려대학교*, 자동차부품연구원**

A Study about the adjustment of dynamic SOC determination of an Ultra-Capacitor module on the Hybrid Energy Storage System

Hyun-Sik Song*, Jin-Beom Jung**, Baek-Haeng Lee**, Dong-Hyun Shin**, Byoung-Hoon Kim**, Hoon Heo*

Abstract - 본 논문은 VRLA 배터리와 Ultra-Capacitor 모듈을 이용한 복합형 에너지 저장시스템에서 우수한 출력 특성을 가진 Ultra-Capacitor 모듈의 SOC를 정확하게 산출하고 보정하는 알고리즘을 소개하고, 마일드 하이브리드 자동차(MHEV)의 운행 조건을 모사한 사이클 프로파일과 차량 시뮬레이터 장비를 활용하여, 제안된 알고리즘의 유용성을 확인하였다.

1. 서 론

하이브리드 자동차(HEV-Hybrid Electric Vehicle)용 에너지저장장치는 우수한 출력 및 효율 특성을 가지며, 빈번한 대전류 충·방전 조건하에서도 사이클 수명 및 사용기간을 보장하도록 요구되고 있다. 이러한 요구로 인하여 Ni-MH나 Li-Ion 배터리 등과 같은 고출력, 장수명 특성의 에너지저장장치가 제안되었다. 그러나 Idle-Stop/Start나 Regenerative Braking과 같이 HEV의 제한된 일부 기능을 사용하는 마일드 하이브리드 자동차(MHEV-Mild Hybrid Electric Vehicle)와 같은 차량 시스템의 경우, 상대적으로 가격대 성능비가 우수한 VRLA (Value-Regulated Lead-Acid) 배터리를 사용하는 방안에 대한 다양한 연구가 수행되었다. VRLA 배터리를 활용한 에너지 저장 시스템은 다양한 형태로 구성이 가능하나, 그 중 대전류 충·방전이 가능하고 효율 특성이 우수한 Ultra-Capacitor 모듈과 조합함으로써 효율 개선 및 수명 연장이 가능한 에너지 저장장치에 대한 연구가 최근 진행되었다. [1][2][3]

에너지 저장장치로서 VRLA 배터리와 Ultra-Capacitor 모듈을 효율적으로 사용하기 위해서는 에너지 저장장치를 관리 및 모니터링하는 BMS(Battery Management System)에서 정확한 SOC(State-of-Charge) 추정이 필요하다.

SOC 추정은 배터리를 사용하는 응용 제품에 있어서 가장 중요한 이슈중의 하나로, 특히, 자동차 분야는 다른 분야(모바일)와 달리 개인의 생명과 직결되기 때문에 더욱더 정확한 SOC 추정이 필요하다. 그러나 배터리는 화학적 반응에 의한 전기 에너지를 생성하는 장치로, 주위온도, 배터리 용량, 내부 저항 등에 많은 영향을 받는 비선형적인 특징을 갖기 때문에, 배터리의 SOC를 직접적인 방법으로 측정 할 수는 없다.

따라서 SOC를 간접적인 방법으로 구해야 하며, 크게 화학적 반응을 이용하는 방법, 배터리의 전압을 이용하는 방법, 전류 적산 방법 그리고 내부 임피던스를 이용하는 방법 등이 알려져 있다. [4]

화학적인 방법은 배터리 방전 시 전해액의 비중(Specific Gravity)이 선형적으로 감소하는 것을 수식화하여 SOC를 추정하는 방식이다. 그러나 이 방식은 납산전지와 같이 전해액을 직접 액세스 할 수 있는 경우에만 사용할 수 있고, 주위 온도나 전해액의 양에 따라 달라질 수 있다는 단점을 가지고 있다.

전압을 이용한 방법은 배터리의 전압을 SOC로 변환하는 것으로 배터리의 전압과 SOC의 방전 커버를 이용한 방식이다. 그러나 이 방식은 충분한 안정화 시간 이후에서의 OCV(Open Circuit Voltage)에 의한 SOC는 정확하나, 주위 온도, 방전율(C-Rate), 사용기간, 배터리 내부 저항 특성 변화 등에 따라 달라진다.

전류를 이용한 방법은 "Coulomb Counting" 혹은 "Ampere-Hour Counting"이라 불리며, 배터리의 입출력 전류를 적산함으로 SOC를 계산할 수 있다. 그러나 이 방식은 시간이 지남에 따라 누설 전류와 전류 센싱의 오차에 의해 SOC가 정확하지가 못하게 된다.

내부 임피던스를 이용한 방법은 배터리의 충·방전에 따른 내부 임피던스 변화를 측정하여 SOC를 추정한다. 이 방식은 셀이 반응하고 있는 상태의 임피던스 측정이 어렵고 온도에 민감한 단점이 있다.

현재 위에서 나열한 것과 같이 한 가지 방식으로는 정확한 SOC 추정이 힘들기 때문에 새로운 방식 또는 몇 개의 조합을 이용한 연구가 진행되고 있다.

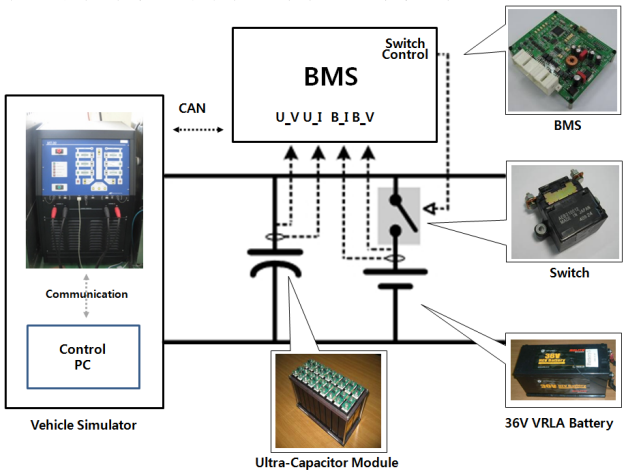
2. Ultra-Capacitor 모듈 모듈의 동적 SOC 보정

2.1 시스템 및 BMS 구성

본 논문에 사용된 복합형 에너지저장장치는 Ultra-Capacitor 모듈, 36V VRLA 배터리, 스위치 그리고 BMS로 구성된다.

Ultra-Capacitor 모듈 모듈은 42V용 시스템으로 NESSCAP에서 개발된 2.7V 1700F 셀 18개를 직렬로 연결한 모듈을 사용하였다.[5] VRLA 배터리는 에너셀 제품으로 36V 12Ah 이다. [6]

본 시스템에서 Ultra-Capacitor 모듈은 항상 42V 파워넷에 연결되어 있고, VRLA 배터리는 큰 에너지를 필요로 할 때 BMS의 로직에 의해 스위치가 선택적으로 제어된다.



<그림 1> 복합형 에너지저장장치의 구성

BMS 제어기의 주 역할은 Ultra-Capacitor 모듈과 VRLA 배터리의 SOC를 각각 모니터링하여 복합형 에너지저장장치의 SOC를 추정하여, 차량의 Idle Stop/Start에 필요한 에너지를 ISG (Integrated Starter Generator)에 공급하고, 회생제동(Regenerative Braking)의 에너지를 회수하는 것이다. 이를 위하여 BMS 제어기는 SOC 산출에 필요한 전류와 전압 그리고 온도를 측정하여 SOC를 추정한다.

전류 측정은 단가 및 인터페이스 측면을 고려하여 Nikkohm사의 Shut Resistor 0.1mΩ을 사용하여 Shunt 양단의 전압을 증폭하여 사용하였다. 전압은 저항분배를 통한 5V 레벨로 다운하여 사용하였다. 온도는 NTC 타입의 대기온도 25℃일때 10KΩ인 Thermistor를 사용하였다. 전류와 전압은 정확한 SOC 추정과 깊이 관계가 되므로 정확도를 높이기 위하여 16bit ADC를 사용하였다.

2.2 Ultra-Capacitor 모듈의 SOC 보정

복합형 에너지저장시스템은 Ultra-Capacitor 모듈의 SOC값을 기준으로 스위치를 제어하는 것이 기본적인 알고리즘 형태이므로, Ultra-Capacitor 모듈의 SOC값을 정확하게 산출하는 것이 무엇보다 중요하다.

기존의 Ultra-Capacitor 모듈의 SOC를 산출하는 방법은 입·출력 전류를 적산하는 AH Counting법과 전류가 흐르지 않는 상태에서의 Ultra-Capacitor 모듈 전압을 검출하여 검출전압에 해당하는 SOC값을 유추하는 OCV 검출법이 주로 사용되었다. 그러나 Ultra -Capacitor 모듈의 경우, 용량이 배터리에 비해 매우 작기 때문에 AH Counting법 적용 시 미소한 전류 오차만 발생해

도 SOC값의 오차는 지속적으로 누적되게 된다. 또한 OCV 검출법은 Ultra -Capacitor가 안정화된 상태에서 측정하는 것을 기본으로 하므로 충·방전 상태에서 실시간으로 사용을 할 수 없는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 AH Counting법을 사용하되 AH Counting법의 첫 번째 단점인 초기 SOC를 OCV에 의해 보정하고, 두 번째 단점인 전류 적산 에러를 전류가 흐리지 않거나 혹은 저 전류 영역에서 전압 검출을 통한 SOC를 AH Counting에 의한 SOC와의 차이가 설정치 이상으로 발생할 시 일정 시간에 따라 소량씩 지속적으로 보정하는 알고리즘을 제안하고자 한다. 본 논문에서는 위의 SOC 보정을 동적 SOC 보정이라고 칭하고자 한다.

2.2.1 Ultra-Capacitor 모듈의 초기 SOC 보정

자동차에 있어서 OCV에 의한 SOC 추정은 배터리 사용 후 충분한 안정화 시간이 지나고 모든 부하가 Open 되었을 때에만 정확한 SOC 추정이 가능하다. 이를 위하여 온도별, 충·방전별에 따른 OCV-SOC 관계를 시험을 통하여 선 진행하여 데이터화해야 한다.

BMS에서 Ignition(IG)이 Off되면 BMS는 AH Counting에 의한 SOC(SOC_{AH})를 Flash에 저장하고 절전을 위하여 Sleep Mode로 들어간다. 이 모드에서는 RTC(Real Time Clock)가 동작 할 수 있으며 IG Off 후 Rest Time을 카운터하게 된다. Sleep Mode에서 IG가 On되거나 RTC의 설정 시간이 지나면 BMS는 Wake-Up 된다. 본 BMS에서는 RTC 설정을 30분 단위로 Wake-Up 했다가 설정된 Rest Time이 되지 않으면 재 Sleep Mode로 들어가고, 설정된 Rest Time이 지나면 BMS는 Flash에 Rest Time Count를 저장하고 Power-Down한다.

IG가 On되면 BMS는 Ultra-Capacitor 모듈의 전압과 현재 주위 온도를 측정하여 현재 온도 상태의 전압(OCV)에 따른 SOC (SOC_V)를 Look-Up 테이블에서 가져온다. 그리고 Flash에 저장된 Rest Time을 읽어온다. Ultra-Capacitor 모듈의 설정된 Rest Time 보다 Flash에 저장된 Rest Time이 작은 경우는 Ultra-Capacitor 모듈이 아직 안정화 되지 않았다고 판단을 하고 초기 SOC($SOC_{initial}$)를 Flash에 저장된 SOC(SOC_{flash})를 사용한다. 반대의 경우는 충분히 안정화 되었다고 판단을 하고 SOC_{OCV}와 SOC_{flash}의 차이($SOC_{\triangle}$)가 설정된 범위를 초과한 경우에 최종적으로 초기 SOC($SOC_{initial}$)를 OCV에 의한 SOC(SOC_{OCV})를 사용한다. 본 논문에서는 $SOC_{\triangle}$를 10%로 설정하였다. 최종적으로 결정된 $AH_{initial}$는 AH Counting에 사용될 초기 용량으로 식(1)에 의해 %를 Ah로 변경된다.

$$AH_{initial} = \frac{SOC_{initial} \times C_a}{100} \quad \text{---------- (1)}$$

여기서 C_a는 Ultra-capacitor 모듈의 가용 용량이다.

2.2.2 Ultra-Capacitor 모듈의 동적 SOC 보정

Ultra-Capacitor 모듈의 동적 SOC 보정은 입·출력 전류가 0인 상태로 일정시간 유지된 안정화 상태이거나, 입·출력 전류가 0이 아닌 순시 충·방전 상황이지만 전류의 크기가 일정 값 이하로 작은 경우에는 전압에 따른 SOC(SOC_V) 값을 산출하고, 이를 토대로 AH Counting법에 의해 연산된 SOC(SOC_{AH}) 값과 비교하여 보정이 이루어지도록 한다.

따라서 Ultra-Capacitor 모듈에 어느 정도 크기의 전류가 입·출력 되어야 작은 전압 오차를 지니는지, 그리고 그 전압오차에 해당하는 SOC 값의 차이는 얼마인지를 확인하기 위한 전류별 충·방전 실험을 수행할 필요가 있다. 또한 설정 전류 이하의 충·방전으로 전환되는 상황에서 과연 어느 시점부터 보정을 들어가야 하는지 확인할 필요가 있다.

이를 위해, 첫 번째 실험은 어느 정도의 전류가 흘렀을 때 안정화 이후(30분)의 전압차가 작은지 확인하였다. 시험 결과 전류가 작을수록 전압 오차가 작음을 알 수 있었다. 그러나 MHEV의 운행구간에서의 Ultra-Capacitor 모듈의 전류를 확인해보면 너무 낮은 전류대역은 많이 나타나지 않기 때문에 적정 전류를 찾을 필요가 있다. 따라서 시험 결과에 의하면 5A 충·방전시 SOC 오차는 평균 1% 이내임을 알 수 있었다.

실제 차량 운행에서는 5A 충·방전 이전 상태에 따라 허전위가 나타날 수 있고, SOC 에러의 최대를 확인하기위하여 충·방전 전류를 최대로 하고, 안정화 전류 후 전압을 모니터링하여 최적의 시간을 찾고자 했다. 표1은 초기 전류를 최대 전류로 충·방전 하다가 ±5A 이내의 안정화 전류로 했을 때 전압차에 대한 SOC 오차를 나타내었다. 실험결과 초기전류와 같은 방향으로 안정화 전류가 흐르면 반대방향의 경우보다 전압오차가 커짐을 알 수 있었다. 그리고 최대의 오차가 발생할 수 있는 경우는 초기전류와 같은 방향의 전류로 크기는 5A임을 유추 할 수 있었고 SOC 오차는 3% 이내임을 확인 하였다.

표 2는 SOC 보정을 위해 5A이하인 전류 상황이 어느 정도 유지되어야 하는지를 가늠하기 위한 것이다. 표 2에 의하면 5A 이하로 전류가 유지되는 상황에서 발생할 수 있는 최대 전압 및 그에 해당하는 SOC 오차는, 5A 이하의 전류가 유지되는 시간이 5초에서 7초로 증가하면 0.7 ~ 1.2% 정도로 오차가 감소함을 알 수 있다. 그러나 5A 이하인 시간이 7초 이상 유지되는 상황에서만 SOC 보정이 발생하도록 알고리즘을 설계하는 것은, 오히려 SOC 보정 상황 발생을 어렵게 만들게 되므로, 보정을 위한 전류 유지 시간은 5초 정도로 설정하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

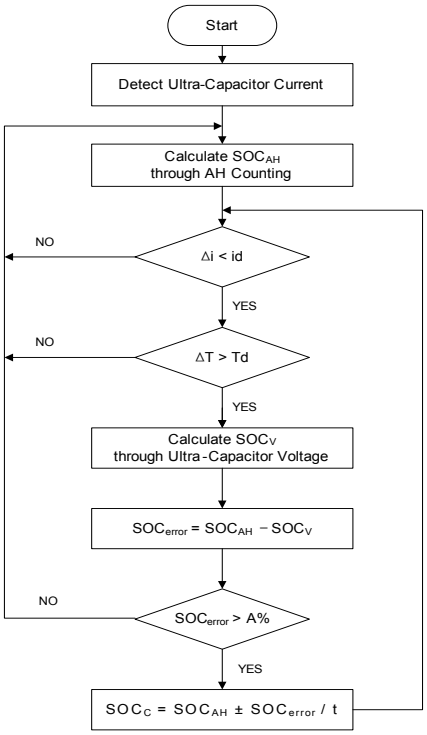
따라서 본 논문에서는 5A 이하인 상황이 5초 이상 유지되면, 현재의 Ultra-Capacitor 모듈 전압을 측정하여 전압에 따른 SOC 값을 구하고, 이에 따라 SOC 보정을 수행하게 되는데, AH Counting법에 의한 현재값(SOC_{AH})과 보정 목표치(SOC_V)의 값

<표 1> 안정화 전류에 따른 전압차 및 SOC 오차(7초 후 전압 측정)

초기 전류[A]	안정화 전류[A]	전압차 [V]	SOC [%]
150	+5	0.424	2.38
	+2	0.334	1.88
	0	0.273	1.54
	-2	0.100	0.56
-250	+2	-0.330	-1.86
	0	-0.337	-1.89
	-2	-0.388	-2.18
	-5	-0.452	-2.54

<표 2> 유지시간에 따른 최대 전압차 및 SOC 오차

시험 조건		전압차[V]	SOC [%]
150A 충전 → 5A 충전	5초 유지 시	0.547	3.07
	7초 유지 시	0.424	2.38
250A 방전 → 5A 방전	5초 유지 시	-0.671	-3.77
	7초 유지 시	-0.452	-2.54



<그림 4> Ultra-Capacitor 모듈의 동적 SOC 보정 알고리즘

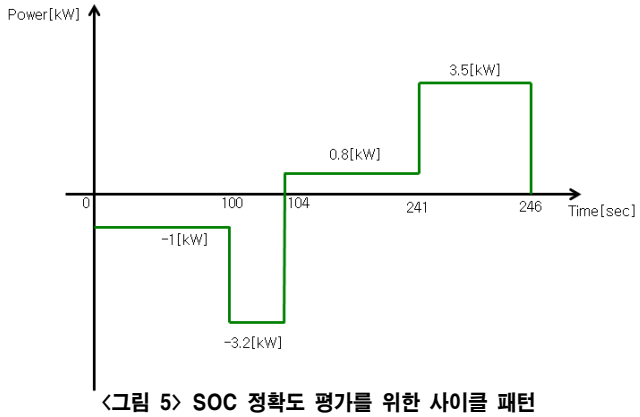
이 5% 이상 차이를 갖는 경우만 보정 동작을 수행하게 했다. 이는 순시 전압을 사용하여 보정하는 방식 자체가 지니는 오차(최대 3.77%)를 고려한 것이다. 다만 전압에 의한 SOC를 보정 SOC값으로 설정함에 있어 순간적인 SOC 변동이 발생하게 되는데, 이는 에너지관리장치와 차량이 다른 제어 알고리즘에 영향을 미쳐 순간적인 SOC변동에 따른 불안정성을 야기할 수 있으므로, 일정 시간 t에 걸쳐 소량씩 지속적으로 보정하는 것이 타당하다. 그림 4는 Ultra-Capacitor 모듈의 동적 SOC 보정 알고리즘의 Flow Chart를 나타내었다.

3. 시험 결과

에너지 저장장치의 SOC를 정확하게 산출하지 못하면 효율적으로 에너지를 관리하지 못하게 되며, 차량의 주행 여부에도 큰 영향을 미치기 때문에 정확한 SOC 산출은 매우 중요하다. 따라서 BMS에서 측정된 전류, 전압 그리고 온도의 정확도도 중요하다. 전류의 경우 -250A ~ 150A 사이에서 대체로 1%이내의 오차를 보이며, 저전류 대역(-10A ~ 10A)은 2% 이내의 오차가 확인되었다. 전압의 경우는 27V ~ 44V 전 구간에서 0.5% 이내의 오차가 나타났다. 그리고 온도는 -40℃ ~ 90℃ 구간에서 3% 미만의 오차가 나타났다.

외부 환경요인에 의한 에러를 최대한 줄이기 위하여 모든 시험은 25℃ 환경 챔버에서 진행하였고, 아래에 서술할 알고리즘 정확도 판별을 위한 레퍼런스를 위해 전류는 0.5% 이내의 에러를 갖는 ABB의 ES300C와 전압은 0.01%로 측정 가능한 NetDAQ 2640을 이용하였다.

제시한 알고리즘이 하이브리드 에너지저장장치(Hybrid Energy Pack)의 SOC 정확도에 어느 정도 기여하는지를 확인하기 위하여, MHEV에서 주행 중 빈번하게 사용되는 Idle Stop/Start 및 Regenerative Braking시의 전력 Profile을 그림 5와 같이 구성하여 50 사이클 시험 후 에너지저장장치의 잔존용량을 비교 확인하였다. 한 사이클 당 246초이며, 방전 -112.8kW, 충전 127.1kW로 충·방전비율은 88.75%이다.



〈그림 5〉 SOC 정확도 평가를 위한 사이클 패턴

시험에 사용된 HEP의 용량은 14.56Ah로 시험되었으며, BMS에서 정확한 SOC 계산을 하기 위하여 AH Counting 시 충·방전효율을 고려하였고, AH Counting에 동적 SOC 보정 알고리즘을 적용하였다.

50 Cycle 시험은 만충 후 1/5C로 2시간 방전하여 SOC 60%로 설정된 상태에서 시작하였고, 사이클 이후 남은 용량을 알아보기 위하여 1/5C로 종지전압(cut-off voltage)까지 방전하였다. 그 결과 Reference로 계산된 사이클 전후의 용량차이를 SOC로 환산한 값과 BMS에서 계산된 SOC와의 차이가 표 3과 같이 2.25%로 나타났다. 이 수치는 일반적인 설계치인 ±10% 이내에 들어오는 것을 알 수 있다. 그림 6은 50 사이클 동안 BMS에서의 SOC 변화 그래프를 나타내었고, 그림 7은 5A 이하가 5초 이상 지속되는 구간에서의 동적 SOC 보정을 보여준다.

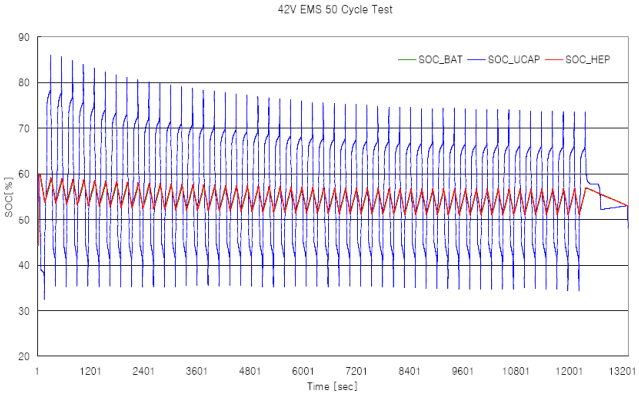
4. 결 론

종래 복합형 에너지 저장시스템에 적용되는 울터라커패시터의 SOC 추정을 정확하게 하기 위하여 IG On시 OCV에 의한 일차 보정과 운행중에 일정 입·출력 전류 이하에서 Ultra-Capacitor 모듈의 전압을 이용한 보정 알고리즘을 소개하였고, MHV의 운행 조건을 모사한 사이클 프로파일 시험을 통하여 제안된 동적 SOC 알고리즘의 정확성(Reference와 2.25% 이내)을 확인하였다.

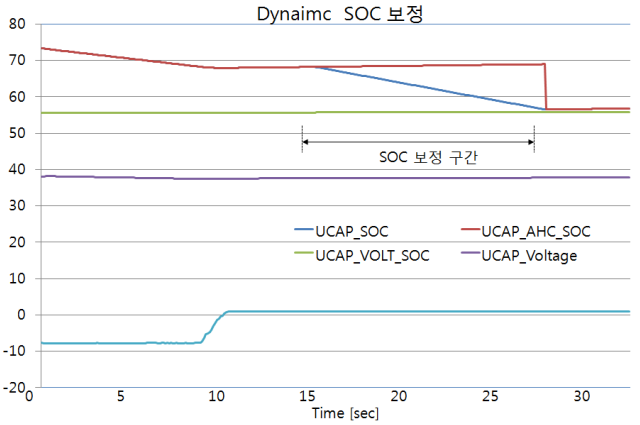
이는 Ultra-Capacitor 모듈이 사용되는 복합형 에너지저장장치에서 배터리와 Ultra-Capacitor 모듈이 변경되더라도 제안된 몇 가지 실험 데이터만 확보하면 간단하면서도 정확하게 동적으로 SOC를 추정 할 수가 있다.

〈표 3〉 SOC 산출 오차

시험 전후의 SOC 변화 [%]		오차
Reference	EMS	SOC [%]
5.48	3.23	2.25



〈그림 6〉 BMS 제어기의 SOC 산출 시험시 SOC 변화 파형



〈그림 7〉 Ultra-Capacitor 모듈의 동적 SOC 보정 구간 그래프

[참 고 문 헌]

[1] Baek-Haeng Lee, Dong-Hyun Shin, Hyun-Sik Song et al, “Development of an Advanced Hybrid Energy Storage System for Hybrid Electric Vehicles”, Journal of Power Electronics, Vol. 9, No. 1, 51-60, January 2009

[2] Paul Bentley, David A. Stone, Nigel Schofield, “The parallel combination of a VRLA cell and supercapacitor for use as a hybrid vehicle peak power buffer”, Journal of Power Sources, Volume 147, Issues 1-2, 9 September 2005, Pages 288-294

[3] Adam W. Stienecker, Thomas Stuart, Cyrus Ashtiani, “An ultracapacitor circuit for reducing sulfation in lead acid batteries for Mild Hybrid Electric Vehicles” J. Power Sources 156 (2006) 755-762

[4] http://www.mpoweruk.com/soc.htm

[5] Do Yang Jung, Young Ho Kim, Sun Wook Kim, Suck-Hyun Lee, “Development of ultracapacitor modules for 42-V automotive electrical systems”, J. Power Sources 114 (2003) 366-373

[6] 이백행 외, “42V 전원체계용 10KW급 에너지저장시스템 및 관리장치개발”, 산업자원부, 2008. 01