

바이모달트램용 LPB Management System 개발 및 적용

Development and Application of LPB Management System for Bimodal Tram

이강원[†] · 목재균^{*}

(Kang-Won Lee · Jai-Kyun Mok)

Abstract - Bimodal Tram developed by KRRI is driven by a series Hybrid propulsion system which has both the CNG engine, generator and LPB(Lithium Polymer Battery) pack. It has three driving modes; Hybrid mode, Engine mode and Battery mode. Even in case of Battery mode, LPB pack to get enough power to drive the vehicle only by itself consists of 168 LPB cells(80Ah per lcell), 650V. It is important thing to manage LPB pack in a right way, which will extend the lifetime of LPB cells and operate in the hybrid mode effectively. This paper has shown the development of battery management system(12 BMS, 1 BMS per 14cells) to manage LPB pack which is connected with CAN(Controller Area Network) each other and measure the voltage, current, temperature and also control the cooling fan inside of LPB pack. Using the measured data, BMS can show the SOC(State of Charge), SOH(State of Health) and other status of LPB pack including of the cell balancing.

Key Words : Bimodal tram, LPB, BMS, SOC, SOH, Cell balancing

1. 서 론

온난화의 진행을 늦추고 쾌적한 대기환경을 요구하는 사람들의 욕구를 충족시키기 위하여 세계적으로 화석연료사용을 줄이려는 노력이 계속되고 있고 이와 관련된 연구도 많이 진행되고 있다. 그중에서도 수송수단인 자동차 또는 버스에 대한 배기가스저감 및 연비향상을 위하여 하이브리드 자동차가 개발되어 상용화되었고 좀 더 나아가 연료전지나 배터리만으로 구동되는 전기자동차도 개발이 많이 진행되어 점차로 상용화되고 있는 실정이다[1-3]. 그러나 이러한 진보는 아직까지 개인수송수단인 자동차에 국한되어 있고 대중교통으로서 버스나 트램에 적용된 사례는 전 세계적으로 매우 적고 그나마 시험단계에 머무르고 있다. 국내에서는 한국철도기술연구원이 연구개발을 주도한 직렬형 하이브리드 추진시스템을 채택한 바이모달트램에 대한 상용화가 활발히 진행되고 있다. 바이모달트램은 버스와 철도의 장점을 모두 갖춘 신개념의 새로운 대중교통수단으로서 국가정책에 부응하여 배기가스 저감 및 연비 향상을 꾀하고 사회적 약자가 쾌적한 승차환경을 느낄 수 있도록 설계 제작되었다. 직렬형 하이브리드 추진시스템은 엔진에 직결된 발전기에서 생성된 전기를 이용하여 배터리에 저장하거나 인버터를 통하여 전동기를 구동하는 시스템으로 배터리만으로도 차량주행

이 가능하다. 바이모달트램에 사용된 배터리는 리튬폴리머 배터리로서 168셀로 이루어져 약 650[V]를 만들어 낸다. 본 논문에서는 바이모달트램에 적용된 리튬폴리머배터리팩의 사용 환경을 안정화시켜 성능과 수명을 최대한으로 유지할 수 있도록 관리하는 배터리관리시스템인 BMS의 설계 및 제작 그리고 실제 차량에 적용한 시험결과들을 살펴보고자 한다.

2. 본 론

2.1 BMS 설계 및 제작

배터리 관리시스템(BMS: battery management system)은 배터리의 수명예측에 의한 효율적 사용, 이상 배터리 조기 검출, 이상 상태로부터의 보호, 잔존용량의 표시 등을 위한 기술이며, 하이브리드 전기자동차뿐만 아니라 2차 전지를 사용하는 모든 적용 처에 필수적인 기술이라 할 수 있다. BMS의 역할은 잔존용량(SOC, state of charge)을 계산하여 표시하고 셀들의 밸런싱을 제어하며 배터리의 전압, 전류, 온도등을 실시간으로 모니터링하여 배터리를 최적의 상태로 유지되도록 하는 것이다. 그림 1은 바이모달트램용 BMS에 대한 블록도를 보여준다. 개발된 BMS는 차량에서 24[Vdc]를 인가받아 배터리의 온도, 전압, 전류를 센싱하고 보드에 내장된 제어프로그램에 의해 일련의 제어 및 모니터링을 실시하고 보드간에는 CAN에 의한 통신을 실시하게 된다. 바이모달트램에 사용된 LPB 팩은 14개 셀로 이루어진 모듈 12개로 만들어져 있어 BMS는 1모듈당 한개씩 장착되며 총 12개의 BMS가 설치되어 동작한다. 12개의 BMS 중 1개의 BMS가 마스터가 되어 나머지 11개의 슬레이브인 BMS를 CAN통신에 의해 관리하게 된다. 마스터 또는 슬레이브에 문제가 발생하면 배터리팩의 동작을 차단하게 된다. 1개의 BMS는 14개의 셀전압과 7군데의 온도 그리고 1개소의 전

[†] Corresponding Author : Dept. of Railroad Safety and Certification Institute, Korea Railroad Research Institute, Korea

E-mail : wklee@krii.re.kr

^{*} Dept. of Small & Medium Enterprises Cooperation Division, Korea Railroad Research Institute, Korea

접수일자 : 2015년 9월 8일

수정일자 : 2015년 11월 12일

최종완료 : 2015년 11월 17일

류측정이 가능하고 한개의 냉각팬을 돌릴 수 있다. 또한 14개 셀의 밸런싱을 위한 회로가 각 보드내에 설치되어 있다. 그림 2는 13개의 모듈을 관리하기 위한 BMS 설치블럭도를 보여준다. Module형태의 BMS는 고유 ID를 가짐으로써 Master 또는 Slave로써 동작하게 된다. Master와 Slave 모두 CAN (controller area network)통신으로 연결되어 주기적으로 정보를 차량의 주 제어장치에 전송한다. BMS에 사용된 마이크로프로세서는 ATMEL社의 AT90CAN128을 사용하였다.

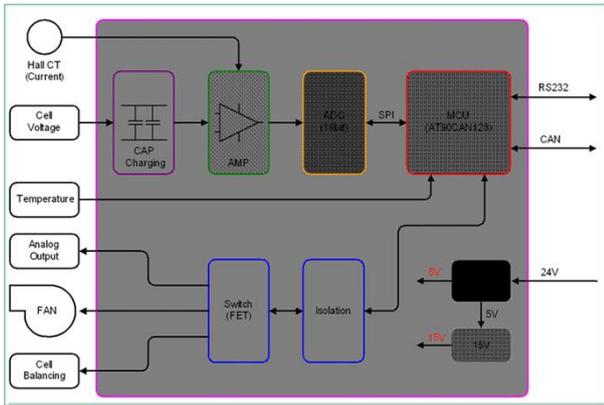


그림 1 BMS 블록도
Fig. 1 Block diagram of BMS

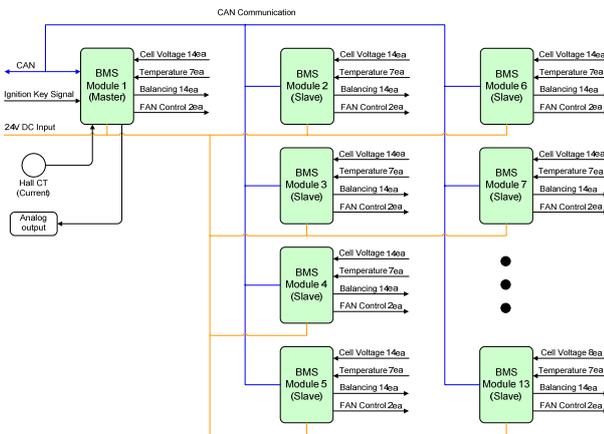


그림 2 배터리팩에 대한 BMS 설치블럭도
Fig. 2 Configuration of BMS on battery pack

Master의 동작을 보면 14Cell 전압과 7개 온도, 2개의 Fan을 제어하며 전원은 외부 보조배터리 24V를 이용한다. Ignition Key에 의해 전원이 "ON/OFF"되며 시스템 초기화 후 전압과 전류, 온도 등을 측정하게 된다. 그리고 Slave로부터 받은 정보를 근거로 배터리의 잔존용량(SOC: state of charge)과 배터리의 노화상태(SOH: state of health)등을 연산하여 CAN을 통하여 차량의 주 제어장치에 전송한다. 또한 충방전으로 인한 배터리의 온도 상승을 막기 위하여 FAN을 각 온도에 맞게 구동시켜 온도 상승을 미연에 방지할 수 있다. BMS가 Slave로 동작하는 경우 기본적인 동작 특성은 Master와 동일하지만 전류의 측정과 SOC, SOH의 계산과 전송을 하지 않는다. 전류를 측정하는 방법에는 Hall

C•T를 이용하여 측정하는 방법과 션트 저항(Shunt Resistor)을 이용하여 측정하는 방법이 있다. 각 방식은 장단점이 있으나 하이브리드 전기자동차(HEV)와 같이 대전류의 적용 처에는 Hall C•T를 적용하는 것이 적합하다. 이유는 전류가 커지게 되면 전류의 제곱에 비례하여 션트 저항(shunt resistor)의 용량이 커지게 되어야 하는 단점이 있기 때문이다. 또한 Hall C•T는 개방 루프형태(open loop: 전압 출력 형)와 폐쇄 루프형태(close loop: 전류 출력 형)로 분류할 수 있으며, 자성체의 특성에 의존되는 개방 루프형태(open loop)와 달리 제로 플럭스(zero flux)의 개념이 도입된 폐쇄 루프(close loop)형은 자성체의 특성에 의존하지 않아 보다 높은 주파수 대역폭과 응답도 및 자성체의 온도변화특성을 개선한 방식이다.

개발된 BMS는 차량의 제어장치와 정보교환을 위하여 CAN통신을 사용하였고 500kbps의 전송속도를 지원하는 Philips社의 TJA1040을 사용하여 구현하였다. 대기 온도 및 셀 온도를 측정하기 위하여 정밀저항과 서미스터에 분배된 전압을 유추하여 온도를 추정할 수 있도록 구성하였다. 일반적으로 서미스터는 온도가 상승하면 저항성분이 작아지고 온도가 하강하면 저항성분이 높아지는 특성을 가지고 있으나 온도에 비례하여 선형적으로 변화하지는 않는다. 또한 구성된 회로는 -40도에서 100도까지 측정할 수 있도록 구성하였다. Cell 전압측정을 위해 사용된 방법은 Cell과의 절연을 위해 Cap Charging방법을 이용하여 측정된다. 커패시터 및 포토모스 릴레이(photo-MOS relay)를 사용한 Cap Charging 방식은 셀 전압이 포토모스 릴레이(photo-Mos relay)를 통해 절연되는 방식으로 누설전류가 존재하지 않는다는 장점이 있는 반면 회로의 구성비용이 높아진다는 단점을 가진다. 그림 3은 Cap Charging회로를 보여준다.

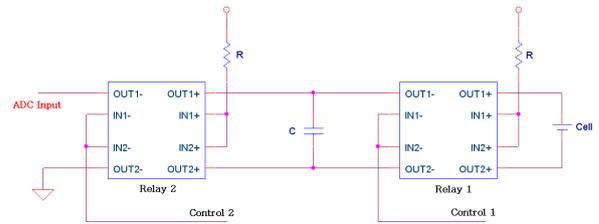


그림 3 Cap charging 회로
Fig. 3 Cap charging circuit diagram

2.2 리튬폴리머배터리 특성구현

2.2.1 배터리 잔존용량(SOC: state of charge)

하이브리드 전기자동차(HEV)에서 잔존용량은 차량의 하이브리드 제어장치(HCU)와 운전자에게 현재의 배터리 충전 및 방전 정도를 알려 주는 기능을 담당하는 것으로서 차량의 효율적 운행 및 안전성 면에서 매우 중요한 기술이다. 본 개발에서 사용된 배터리의 잔존용량의 산출방법은 전류를 기본으로 한 전류적산(AH)법을 적용하였으며, 전류적산에 의한 오차를 보정하기 방법으로 온도특성을 포함하는 전압을 적용하는 방식을 사용하였다[5]. 따라서 초기 SOC는 전압에 의해 산출하고 이후의 잔존용량은 산출된 용량에서

충전 혹은 방전되는 전하를 측정하고 측정된 전하를 가/감산하여 적용하고 보정 전압에 도달했을 잔존용량을 보정하는 방법을 취한다[6].

$$RC(n) = RC(n - 1) \pm I_{batt} \times \Delta t \times E_f \times Life - I_{self} \quad (1)$$

여기서, RC(n)은 현재의 잔존용량, RC(n-1)은 이전에 계산된 잔존용량, I_{batt} 는 전류의 평균값, Δt 는 시간, E_f 는 충방전 전류(C rate), 온도에 의한 충방전 효율, Life는 Life Cycle에 의한 충방전 효율, I_{self} 는 Self Discharge 보정계수를 나타낸다. 식 (1)은 전류측산에 의한 AH법을 나타내고 있다. 이 방식은 전류가 급변하더라도 SOC의 정밀도가 비교적 정확히 구현될 수 있는 방식이다. 하지만 이러한 정밀도는 전류측정오차가 극히 작은 경우에 해당되며, 전류측정의 오차를 최소화하는 방법이 필요하다. 하지만 아무리 측정오차를 줄인다 하더라도 미소한 오차가 발생되고 별도의 보정이 없으면 장시간 사용 시 오차의 누적으로 인해 정밀도가 떨어진다는 단점이 있다. 따라서 반드시 이 방식을 사용할 경우에는 오차를 보정할 수 있는 방법을 병행하여 사용하여야 한다.

2.2.2 배터리 열화정도 (SOH: state of health)

배터리는 충방전을 거듭하거나 과충전이나 과방전 또는 온도에 따라 사용할 수 있는 수명이 달라진다. 이로 인하여 시간이 지남에 따라 사용할 수 있는 용량은 계속적으로 줄어들어 최종적으로는 사용할 수 없을 정도로 줄어들 것이다. 이에 따른 배터리의 노화정도를 예측하여 사용자에게 교체시기를 제공하는 것은 유지보수관점에서 중요한 사항이다. 배터리의 노화정도 (SOH: state of health)를 판정하는 방법으로 현재 사용되고 있는 방식은 내부저항 측정을 통한 방식과 용량을 계측하는 방법이 있다[5].

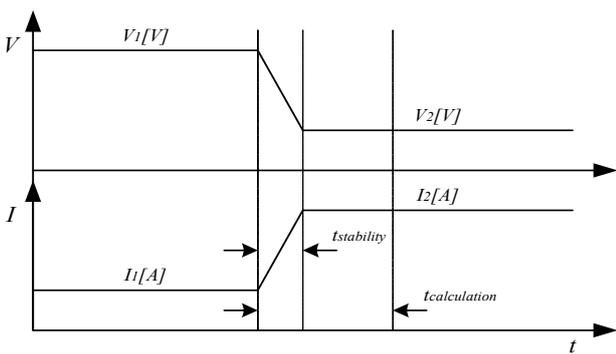


그림 4 DC 저항 측정 개념도
Fig. 4 DC resistance calculation concept

각 방식은 장단점을 가지나 용량을 계측하는 방식의 경우 별도의 계측기가 필요하게 되므로 실제 차량에는 적용하기 어렵다. 또한 내부저항의 측정에 의한 방식의 경우 다시 직류(DC) 측정법과 교류(AC) 측정법으로 구분되며, 본 과제에서는 별도의 시스템이 필요하지 않는 DC 측정법을 사용하

여 내부저항을 측정하고 이를 통해 최대 방전전류(I_{out_max}), 최대 충전전류(I_{in_max}), 최대 방전 전력(P_{out_max}), 최대 충전전력(P_{in_max})등을 계산하여 이를 통해 최종적으로 배터리의 셀 별 노화정도(SOHi)를 판정하게 된다. 그림 4는 직류(DC) 내부저항의 측정 개념 도를 나타내고 있으며, 식 (2)는 직류(DC) 내부저항에 대한 계산식을 보여주고 있다[6].

$$\text{Internal Resistance}[\Omega h] = (V_1 - V_2) / (I_2 - I_1) \quad (2)$$

여기서, V_1 는 방전전의 셀 전압, OCV[V], V_2 는 방전후의 셀 전압[V], I_1 은 방전전의 전류[A](0[A]로 가정함.), I_2 는 방전시의 전류[A]를 나타낸다.

2.2.3 Cell Balancing

배터리는 단셀 혹은 적은 수량의 다중셀에서는 크게 문제가 되지 않으나 많은 수의 셀이 직렬로 연결되는 배터리팩의 경우 셀간의 온도차, 초기 셀의 성분의 미소한 오차, 셀의 노화상태(SOH) 등 다양한 요소에 의해 개별 셀간의 용량편차가 발생되고 이는 전압의 편차 형태로 나타나게 된다. 이러한 셀들간의 전압편차가 발생되면 충전시 용량이 작은 셀의 전압에 의해 충전이 차단되고 이때 완전히 충전되지 않은 셀은 방전시 가장 먼저 과방전 전압에 도달하여 방전을 차단하게 되어 팩의 용량의 충분히 사용하지 못하게 된다. 또한 과충전 및 과방전에 빈번히 도달하는 셀은 그렇지 않은 셀에 비해 수명이 단축되는 요인으로 작용하게 된다. 따라서 배터리간의 전압차를 해소하여 전압을 일정하게 유지할 수 있도록 BMS는 Cell Balancing 동작을 수행하여 수명 및 동작에 문제가 없도록 해야 한다. 일반적으로 Cell Balancing 방식은 크게 전압이 낮은 셀을 충전하는 Active 방식과 전압이 높은 셀을 방전하는 Passive 방식으로 구분되며[5],

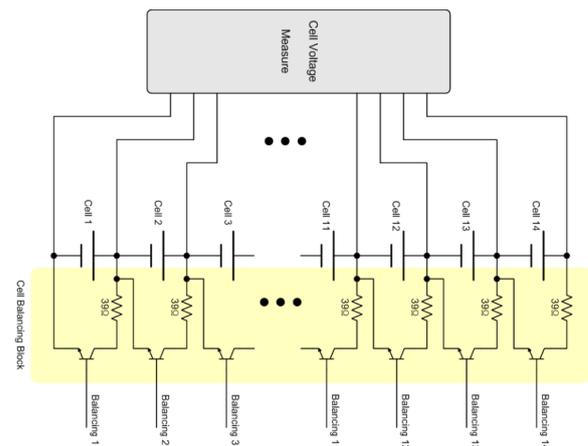


그림 5 Cell balancing 회로(Passive 회로)
Fig. 5 Cell balancing circuit diagram(Passive)

본 개발에서는 저가형이면서 성능이 검증된 Passive 방식을 채택하였으며, 그림 5는 배터리 전압이 4.2[V]일때 107[mA]를 방전 시킬 수 있는 Passive 방식의 회로를 설계

하여 적용하였다.

2.3 BMS 성능평가

2.3.1 시험실 사전평가

실제 차량용 배터리팩에 적용하기 전, 개발된 제작품의 사전검증을 위하여 시험실내에서 간이 팩 시스템을 자체 제작하여 BMS의 기본 성능을 검증하였다. 그림 6은 구현된 간이용 팩시스템(18650 원통형 176Cell 시스템)을 적용하여 BMS와 연동하도록 조합해서 시험하였으며, 이를 통해 셀전압의 정밀도, 온도, 팬의 구동 등 기본적인 BMS의 동작 상태를 평가하였다.

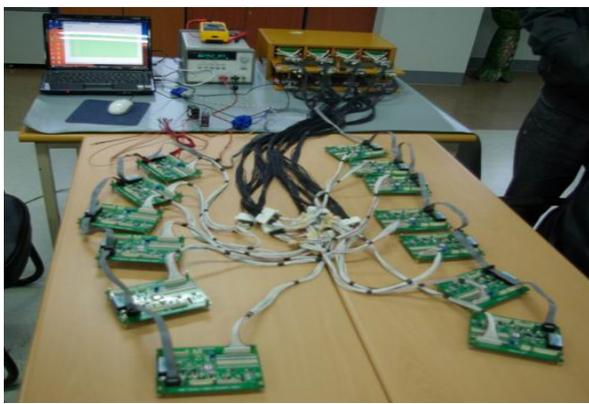


그림 6 간이 평가 시스템 구성도
Fig. 6 Simple test configuration

그림 7과 8은 BMS의 셀 전압 및 온도 정밀도를 측정된 결과를 보여주고 있다. 이러한 결과를 통해 셀 전압의 최대 오차가 13mV로 제한한 F.S $\pm 0.5\%$, $\pm 25[mV]$ 의 정밀도를 만족하며, 온도의 경우 상온에서 측정된 결과로 각 측정치의 범위가 1[$^{\circ}C$] 내외에서 안정적으로 측정됨을 확인하였다. 다음 절과 같이 외기온도의 변화에 따른 BMS의 동작은 실차에 탑재하여 하절기와 동절기간 차량운행시 확인하였다.

2.3.2 차량적용에 따른 성능평가

그림 9는 개발된 BMS를 적용하기 위한 바이모달 트램용

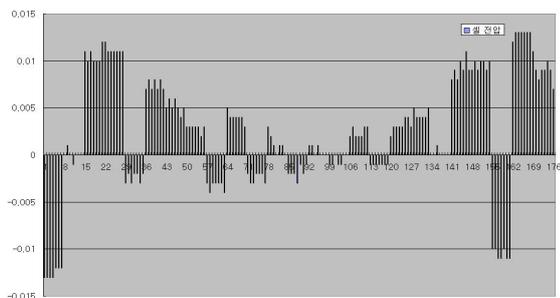


그림 7 셀 전압 정밀도 시험 결과
Fig. 7 Test results of cell voltage precision

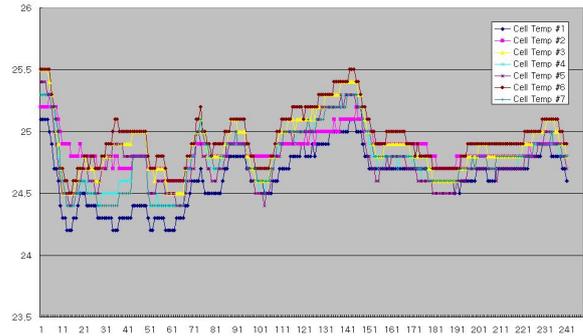


그림 8 셀 온도 정밀도 시험 결과
Fig. 8 Test results of cell temperature precision



그림 9 배터리팩
Fig. 9 Battery pack

배터리팩(80AH 650[V], 12모듈)을 보여주고 있다. BMS는 배터리모듈별 1개씩 설치되어 운용되고 배터리팩의 차단기는 마스터에 의해 제어된다. 그림 10은 차량의 주행시 BMS로부터 측정된 전압과 전류 그리고 계산된 출력 및 추정된 SOC값을 측정결과로서 나타내고 있음을 알 수 있다. 온도는 2개의 셀당 하나의 온도값을 측정하도록 구성되었고 그 측정결과는 그림 11에서 나타내고 있다. 온도값은 배터리셀의 수가 168개이므로 이에 따라 84개의 값으로 표시되고 이를 평균값, 최대/최소값으로 표시할 수 있다.

바이모달 트램의 주행에 사용된 배터리팩의 충방전에 따른 BMS의 동작은 정상적으로 이루어졌으며 BMS 모니터링 프로그램에 의해 배터리의 상태가 실시간으로 모니터링 되었고 필요시 데이터가 저장되어 분석되었다. 그림은 차량이 주행함에 따라 충방전이 이루어지고 이에 따라 SOC가 추정되며 지속적인 충방전 전류의 흐름에 따른 셀온도가 상승되고 있음을 측정된 데이터를 통하여 확인할 수 있었다. 이러한 BMS로부터의 측정은 바이모달 트램의 개발이 이루어진 동안 계속해서 수행되었고 다양한 주행환경에 따른 배터리팩에 대한 성능을 확인할 수 있도록 함에 따라 바이모달 트램의 효율적 운영을 위한 계획수립에 중요한 요소로 작용하였다.

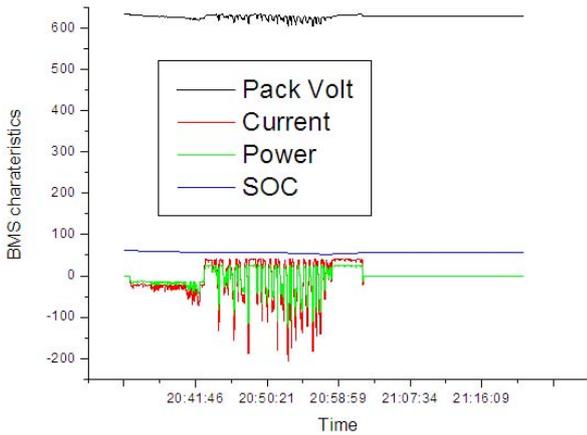


그림 10 BMS 측정결과에
Fig. 10 Example of BMS test results on battery pack

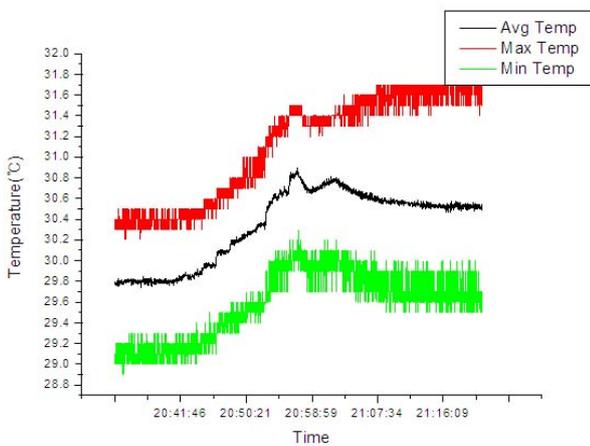


그림 11 BMS 온도측정결과
Fig. 11 Temperature measured results of BMS

3. 결 론

본 논문에서 살펴본 하이모달 트램용 배터리팩에 장착된 BMS는 배터리모듈별 한 개의 보드가 장착되어 마스터 1개 보드와 슬레이브 13개보드간 CAN방식으로 통신하고 BMS로부터 측정된 전압, 전류, SOC, SOH 및 온도등의 값들은 실시간으로 모니터링프로그램에서 확인하고 저장할 수 있도록 설계 및 제작되었고 이에 대한 시험평가는 시험실에서 사전검증을 거쳐 차량에 탑재된 배터리팩에 장착되어 주행시 BMS 기능의 정상동작이 확인되었다. 개발된 BMS에 사용된 SOC 및 SOH 그리고 셀밸런싱은 별도의 새로운 방식이 아닌 기존의 안정된 방법을 적용하여 구현하였고 그 성능의 평가가 이루어 졌으며 하이모달 트램용 배터리팩에 사용하는데 있어 적합함이 검증되었다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 자체사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] L. Bertoni, H. Gualous, D. Bouquain, D. Hissel, C. Pera, J.M. Kauffmann, "Hybrid auxiliary power unit (APU) for automotive applications", Proc. IEEE 5gh Vehicular Technology Conference, 2002, pp. 1840-1845.
- [2] FreedomCAR Electric Energy Storage System Abuse Test Manual for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications, SAND 2005-3123, Released June 2005.
- [3] J. Shen, A. Masrur, V. K. Garg, and J. Monroe, "Automotive electric power and energy management - a system approach," in Proc. Bus. Briefing: Global Autom. Manufact. Technol., Apr. 2003, pp. 1 - 5.
- [4] C.M. Jefferson, R.H. Barnard, "Hybrid Vehicle Propulsion", WIT Press, 2002.
- [5] Davide Andrea, "Battery Management Systems for large Lithium-Ion Battery Packs", ARTECH HOUSE, 2010
- [6] J. H. Nam, J. H. Choi, S. J. Kim, H. S. Hwang, J. W. Kim, "A Study on SOC Algorithm and Design of Battery ECU for Hybrid Electric Vehicle", KIPE, Volumn 9, No. 4, Aug. 2004.

저 자 소 개



이 강 원 (李 剛 遠)

1970년 2월 21일생 1995년 충북대학교 전기공학과 졸업, 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 한국철도기술연구원 철도안전인증연구소 선임연구원
E-mail : wklee@krii.re.kr



목 재 군 (睦 載 均)

1962년 7월 12일생. 1986년 아주대학교 기계공학과 졸업. 1988년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 기계공학과 졸업(박사). 현재 한국철도기술연구원 미래전략센터 수석연구원
E-mail : jkmok@krii.re.kr