論文 9-2-13

2003 전력전자학술대회 우수추천논문

리튬-이온 배터리팩의 전압안정화회로 설계

黃鎬石†, 南鍾夏*, 崔震弘*, 張大慶*, 朴珉基**

Design of Voltage Equalizer of Li-ion Battery Pack

Ho-Seok Hwang, Jong-Ha Nam, Jin-Hong Choi, Dae-Gyeong Jang, and Min-Kee Park

요 약

PDA, 스마트폰, UPS 및 전기자동차와 같은 전기적 장치의 전력공급을 위하여 배터리가 직렬로 연결된 다중 셀을 만들어 일반적으로 사용한다. 이 경우 개별 셀 전압의 편차가 발생되면 배터리의 수명과 용량은 낮아지게 된다. 셀에서 전압의 안정화상태를 유지하기 위한 셀 전압을 안정화시키는 효율적인 방법은 없어서는 안 될 중요한 사항이다. 본 논문에서는 휴대형 가전기기에 적용하기 위해 마이크로컨트롤러를 사용한 다중 셀용 밸런싱 회로의 설계에 대하여 제안한다. 밸런싱 시스템은 충전되는 주기 동안 밸런싱 동작을 이행하며 마이크로컨트롤러로서 제어된다. 제안된 방법은 충전기와 레코드를 사용하여 실험을 통해 증명하였다. 실험결과에서 개별 배터리의 용량, 수명, 성능이 향상됨을 보여준다.

ABSTRACT

For a power source of usual electronic devices such as PDA, smart phone, UPS and electric vehicle, the battery made of serially connected multiple cells is generally used. In this case, if there are some unbalanced among cell voltages, the total lifetime and the total capacity of the battery are limited to a lower value. To maintain a balanced condition in cells, an effective method of regulating the cell voltage in indispensable. In this paper, we propose the design of a balancing circuit for electronic appliances. The balancing system was controlled by a micro-controller which enables to implement the balancing action during charging period. Proposed method has been verified by the experiment using the charger and recorder. The experimental results show that the individual battery equalization can improve battery capacity and battery lifetime and performance through an extended operational time.

Key Words : Balancing circuit, Li-ion battery, Multiple cells, PDA, Smart phone, Voltage equalizer

1. 서 론

충전을 통한 재사용이 가능한 2차 전지는 노트북 PC, 휴대전화, 캠코더 등 거의 대부분의 휴대용 통신기기 및 컴퓨터에 채용되는 핵심부품이다. 과거에는 니켈-카드뮴, 니켈-수소 배터리 등이 사용되었으나 최근 들어 리튬-이온, 리튬-고분자 배터리 등이 사용된다. 2차 전지 가운데 현재 가장 많이 사용되고 있는 리튬-이온 배터리는 양극과 음극 사이에 유기 전해질을 넣어 충전과 방전을 반복하는 구조를 가지며, 무게가 가벼운 데다 고용량의 전지를 만드는 데 유리해 휴대전화기 등에 많이 사용되고 있다. 배터리의 발달로 휴대용 가전기기 시장은 급속한 발전을 거듭하게 되었고, 휴대용 기기의 적용범위가 넓어지면서 배터리도 1

† 교신저자 : 정회원, (주)파워로직스 부설연구소 부장
E-mail : hwang@powerlogics.co.kr
* 정회원, (주)파워로직스 부설연구소 연구원
** 정회원, 서울산업대 전자정보공학과 부교수
접수일자 : 2003. 12. 31 1차 심사 : 2004. 1. 27
심사완료일 : 2004. 3. 16

개가 아닌 다중 셀을 연결하여 사용하게 되었다. 그러나 배터리의 특성상 화학적인 에너지와 전기적인 에너지의 변환에서의 비선형적인 특성으로 인해 모두가 동일한 조건의 용량을 가질 수 없다. 따라서 여러 개의 배터리를 사용할 경우에는 미소한 용량의 차이로 인해 셀 간 전압차가 발생하게 된다. 이러한 셀 간 전압의 언밸런스(Unbalance)는 충전시 전압이 낮은 셀에 무리한 충전(과충전)이 가해져 셀의 용량이 급격히 저하되는 현상과 함께 노화현상을 촉진시키는 원인이 되어 셀의 실제 용량 및 사용 시간이 줄어드는 결과를 가져오게 된다[1-3]. 본 논문에서는 다중 셀 적용시 발생되는 용량 불균형 현상을 해소하기 위해 기존의 방식인 보호 IC와 마이크로컨트롤러를 병행하여 사용함으로서 비용이 상승하는 단점을 보완하여 마이크로컨트롤러를 단독으로 사용하여 각 셀 간의 전압 편차를 줄여 주는 안정화 회로를 구현하였으며, 실험을 통해 배터리의 용량 및 수명이 증대됨을 확인하였다.

2. 전압안정화 시스템

리튬-이온 배터리는 일반적으로 원통형과 각형의 두 가지가 있다. 원통형 배터리의 경우 주로 노트북 PC나 캠코더에 사용되고, 각형의 경우는 휴대전화에 사용되고 있다. 리튬-이온 배터리의 적용처별 구성을 살펴보면 표 1과 같으며, 배터리의 구성을 살펴보면 셀이 직병렬로 조합되어 구성됨을 알 수 있다. 다중 셀이 적용되는 일반적인 리튬-이온 배터리팩 시스템은 그림 1과 같으며, 구성을 살펴보면, 배터리팩 보호를 담당하는 보호 IC, 충·방전 제어용 파워 MOSFET, 셀간의 전압차를 해소하기 위한 전압 안정화 회로부 외에도 메모리나 마이크로컨트롤러를 내장하게 된다.

표 1 리튬이온 전지의 적용처별 구성

Table 1 Components in the type of Li-ion battery

용 도	셀 직렬수	셀 병렬수	전지용량[Wh]
노트북 PC	3 또는 4	1~3	10~70
휴대전화	1	1	0.5~1.5
비디오 카메라	1 또는 2	1~3	4~39
디지털 카메라	1	1~3	7
PDA	1	1~3	2~3
MP3 플레이어	1	1~3	2~3

2.1 리튬-이온 배터리의 보호회로

1992년 일본의 Sony사에서 개발되어 소형 2차 전지 시장에 진입하기 시작한 리튬-이온 배터리는 안전성에 대한 논의가 일부 제기되었으나, 전압이 3.6~3.7[V]로 니켈-카드뮴이나 니켈-수소 배터리의 3배나 되며, 높은 에너지 밀도와 메모리효과(Memory Effect)가 없다는 여러 가지 장점과 미국 UL 안전규격 등의 제도적 보완을 거치면서 가장 널리 사용되고 있는 2차 전지중 하나이다. 하지만, 리튬-이온 배터리의 사용 시에는 다음의 사항에 주의해야 하며, 충전시 제조사가 설정한 충전전압을 넘어서면 수명이 단축될 뿐만 아니라 위험성이 높아지게 되어 기존의 2차전지의 충전방식에 주로 채택되는 정전류(CC, Constant Current) 충전방식과 달리 정전류-정전압(CC-CV, Constant Current -Constant Voltage) 충전방식을 채택하고 있다. 하지만 충전기가 정상적으로 작동하지 않을 것을 대비해서 배터리팩 내부에 보호회로를 장착한 상태로 제조되고 있다.

- 과충전, 과방전시 열화의 발생이 쉽고, 간혹 발열에서 발화에 이르는 경우가 있기 때문에 과충전 및 과방전 방지회로가 필요
- 충전 회로측의 정확한 충전전압 제어 필요
- 만충전 상태에서 고온 방치시 용량의 열화
- 2개 이상의 셀 직렬연결 사용시 주위온도가 균일하지 않으면 셀 사이의 용량 언밸런스가 발생, 방전용량이 저하됨.

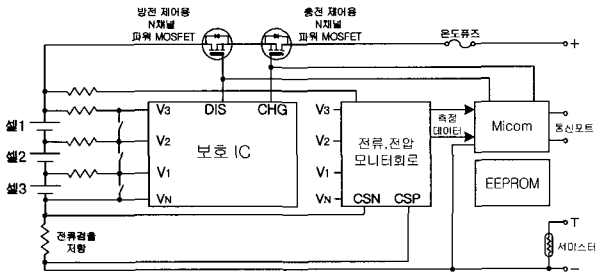


그림 1 리튬-이온 배터리의 전압안정화회로

Fig. 1 Cell voltage balancing circuit of Li-ion

2.1.1 과충전 보호(Over-charging Protection)

리튬-이온 배터리의 전압이 충전에 의해 만충전 전압 이상으로 되면 충전제어용 MOSFET을 OFF하여 충전전류를 차단한다. 수백 [mV]의 히스테리시스를 가지고 셀 전압이 저하되었다는 것을 검출하고 충전제어용 MOSFET를 ON하여 충전할 수 있게 한다. 그림 2는 과충전 보호동작을 나타내고 있으며, 보는 바와 같

이 과충전 전압(V_{OV})을 초과하여 약 1초(t_{OV}) 정도 경과를 하게 되면 보호회로가 동작하여 충전을 방지하고 회복전압(V_{OVR})에 도달하게 되면 정상 동작모드로 동작하게 된다. 일반적으로 과충전 전압은 4.2~4.35[V]를 적용한다.

2.1.2 과방전 보호(Over-discharging Protection)

배터리 전압이 방전에 의해 방전금지 전압(V_{UV}) 이하로 되면 방전제어용 MOSFET를 OFF하여 방전전류를 차단한다. 차단상태를 유지하는 도중 충전이 되어 배터리 전압이 히스테리시스를 가지고 상승하여 과방전 회복전압(V_{UVR})에 도달하게 되면 방전제어용 MOSFET를 ON하여 방전할 수 있게 한다. 그림 3은 과방전 보호회로의 동작을 나타내고 있다.

2.1.3 과전류(Over-current Protection)

배터리팩의 양극과 음극이 단락 되었을 경우 대전류가 흘러 배터리의 열화나 보호회로가 파괴되는 것을 방지하기 위해서 방전전류를 검출하고 규격 외의 전류가 흘렀을 경우에 방전 및 충전제어용 MOSFET를 동시에 OFF한다. 리튬-이온 배터리팩은 앞에서 말한 보호기능을 가지고 있지만 안전성을 확보하기 위해 보호회로 등이 배터리의 사용금지영역으로 빠지지 않도록 해야 한다. 그림 4는 과전류 보호회로의 동작을 나타내고 있으며, 전류의 측정은 배터리의 B(-)단자와 충전기의 P(-)단자 사이에 저항을 연결하고 여기서 전압을 측정하여 전류로 변환하게 된다.

2.1.4 열보호(Thermal Protection)

리튬-이온 배터리팩에는 서미스터(Thermistor)가 내장되어 있어 충전 중인 배터리팩 내부의 온도상태를 본체측에서 모니터하는 기능을 지니고 있으며, 고온시에 회로를 차단하기 위한 온도퓨즈나 PTC(Positive Temperature Coefficient)를 내장하고 있으며, PTC의 경우는 외부 단락으로 인해 과전류가 흐를 경우 급격하게 저항이 증가하게 되고 이를 통해 전류를 차단하는 기능도 가진다.

2.1.5 기 타

최근에는 해외 등에서 제 3자에 의해 배터리팩이 무단으로 사용되거나 복제되어 사용되는 경우도 발생되고 있으며, 이는 보호회로의 기능 이상시 리튬-이온 배터리의 특성상 매우 위험하다. 따라서 이들의 무단 사용이나 복제를 방지하기 위해 배터리팩 내부의 메모리에 고유의 정보를 기억시켜 본체가 그 정보를 배터리팩에 액세스하는 키로 이용하는 예도 있다. 이들 복제방지용 시큐리티 메모리 IC는 일반적으로 용량, 제조년월일, ID 등을 기억할 수 있는 EEPROM을 내장하고 있다.

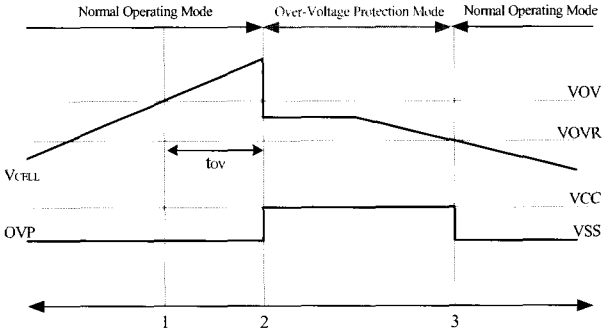


그림 2 과충전 보호 동작 모드
Fig. 2 Over-charging protection mode

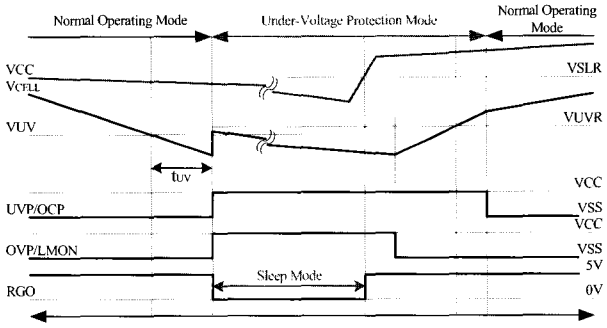


그림 3 과방전 보호 동작 모드
Fig. 3 Over-discharging protection mode

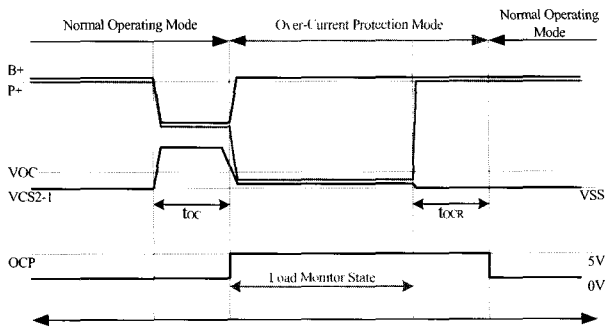


그림 4 과전류 보호 동작 모드
Fig. 4 Over-current protection mode

2.2 전압안정화회로

전기자동차를 비롯한 2차 전지를 직·병렬 모듈로

사용하는 모든 시스템은 배터리 자체의 미소한 특성차이 등으로 인해 셀 상호간의 전압불균형 현상이 발생하게 된다. 만일 직렬로 연결된 모든 셀이 동일한 조건이라면 식 1과 같으며, 이를 용량 및 전압으로 나타내게 되면, 식 2와 같이 나타낼 수 있다. 하지만, 각 셀은 개별특성차이로 인해 동일한 조건이 될 수 없고, 이러한 미소한 특성차이로 인해 식 3과 같이 각 셀의 용량 및 전압이 다르게 나타나게 된다.

$$Q_{cell1} = Q_{cell2} = \cdots = Q_{celln} \quad (1)$$

$$Q = = CV$$

$$C_{cell1} V_{cell1} = C_{cell2} V_{cell2} = \cdots = C_{celln} V_{celln} \quad (2)$$

$$C_{cell1} V_{cell1} \neq C_{cell2} V_{cell2} \neq \cdots \neq C_{celln} V_{celln} \quad (3)$$

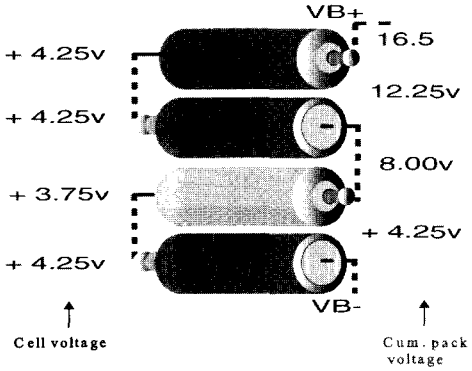


그림 5 셀 전압의 불균형 현상
Fig. 5 Unbalanced battery pack

2.2.1 전압불균형현상의 원인

그림 5를 예를 들어 살펴보면 셀 전압이 4.25[V]인 전지에서 전압불균형이 발생되어 특정 셀이 3.75[V]로 전압이 낮게 나타나는 현상이 발생되는 것을 볼 수 있으며, 이러한 현상을 전압불균형현상이라고 한다. 셀간 전압의 편차가 발생하게 되면, 그림 6의 전압별 방전용량곡선에서와 같이 다양한 전압의 셀들로 배터리 팩이 구성시 전압이 가장 높은 셀 전압에서 보호회로가 충전을 금지함으로써 다른 셀은 만충전이 되지 않은 상태에서 충전이 중지되고, 완전히 충전되지 않았던 셀은 다음 회에 방전되었을 때 가장 빨리 방전 금지전압에 도달하여 보호회로가 방전을 금지해버리고, 다른 셀은 완전히 방전되지 않게 된다. 따라서 셀간 전압편차가 발생하게 되면 전체셀의 용량은 전압이 낮은 셀의 용량으로 국한되어 사용되므로 효율성이 떨어지며, 이 사이클이 반복됨으로써 셀 자체의 수명보다 빠르게 용량이 저하된다. 이러한 전압불균형 현상이 일어나는 원인은 다음과 같다.[2]

- 개별 셀 화합물의 미소 변동
- 초기 충전량의 차
- 방전율 및 방전 사이클의 차
- 시스템에서의 전력손실
- 시스템에서 배터리의 위치에 따른 온도의 영향

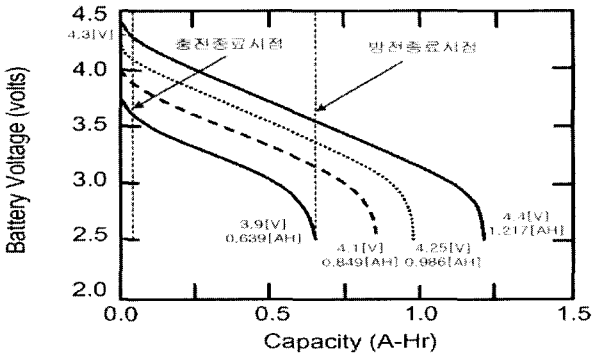


그림 6 리튬-이온 배터리의 방전용량(0.5[A], 25[℃])
Fig. 6 Discharge capacity of Li-ion battery

2.2.2 전압안정화회로의 설계

그림 7은 본 논문에서 제안하는 전압안정화 시스템의 블록도를 보여주고 있으며, 기존 시스템에서 보호 IC와 마이크로컨트롤러를 병행하여 사용하던 단점을 보완하여 마이크로컨트롤러만으로 보호회로와 셀밸런싱 동작을 모두 만족하도록 구현되었다. 또한 기존의 방식의 경우 보호 IC의 사양에 따라 적용할 수 있는 셀의 수가 한정되었으나 제안된 시스템에서는 마이크로컨트롤러의 사양에 따라 다양한 셀 구성이 가능하다는 장점을 가진다. 시스템에 적용된 리튬-이온 배터리 및 설계사양은 표 2와 3에 나타내었었다.

- 전류측정용 저항: 과전류차단은 약 3.75[A](약 4[C])에서 동작하게 되며, 20[mΩ]을 선정하고 전압이 75[mV] 이상시 과전류차단영역으로 동작 설정.
- 과충/방전 방지용 파워 MOSFET: 과전류차단동작은 4[C]의 전류에서 동작하게 되고 이를 위해서 3.75[A] 이상에서 동작하도록 소자를 선정.
- 바이패스부 저항: 그림 8에서와 같이 바이패스회로를 통해 밸런싱하는 전류와 셀 전압과의 관계식 4를 통해 바이패스저항의 값을 구하게 되고 여기서 R_I: 바이패스 저항, R_{TI}: 바이패스부 MOSFET의 Drain-Source간 ON 저항을 나타냄.

$$(R_1 + R_{T1}) = \frac{V_{cell1}}{I_1} \quad (4)$$

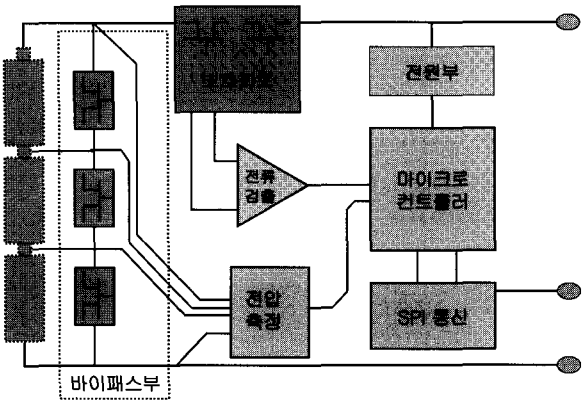


그림 7 제안된 전압안정화 시스템
Fig. 7 The proposed voltage equalizer system

표 2 리튬-이온 배터리의 사양
Table 2 Specification of Li-ion battery

항 목	규 격
제 조 사	Toshiba
형 식	Prismatic Cell
정격용량	950[mAh]
치 수	8.6×34.0×48.0[mm]
무 게	40[g]

표 3 밸런싱 시스템의 설계사양
Table 3 Design specification of balancing system

항 목	적용수치	허용오차
과충전전압	4.3[V]	±25[mV]
과충전회복전압	4.1[V]	±30[mV]
과방전전압	2.4[V]	±35[mV]
과방전회복전압	2.9[V]	±70[mV]
과전류차단전류	3.75[A]	±50[mA]
밸런싱시점	4.2[V]	±30[mV]

3. 실 험

전압안정화시스템은 일반적으로 수동적인 방식과 능동적인 방식으로 분류되며 본 논문에서는 그림 9와 같이 완전 충전된 셀을 저항을 통해 방전하는 수동적인 방식을 채택하여 2셀과 3셀을 대상으로 시스템을 제작 및 실험하였다. 2셀의 경우는 저가의 시스템을 구현하기 위해 별도의 마이크로컨트롤러를 사용하지 않고, 보호 IC를 단독으로 사용하여 전압을 안정화하였으며, 3셀의 경우에는 Atmel사의 8-Bit 마이크로컨트롤러인 ATmega 128을 사용하여 시스템을 제어하였다.

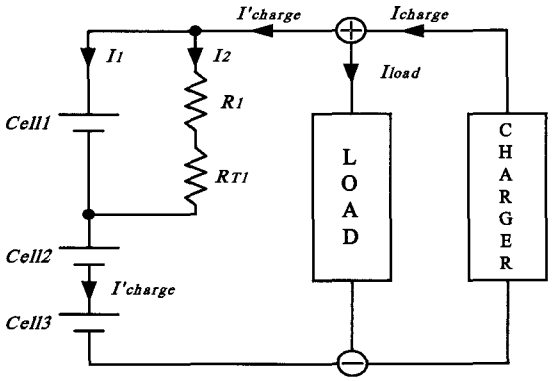


그림 8 밸런싱 모드
Fig. 8 Balancing mode

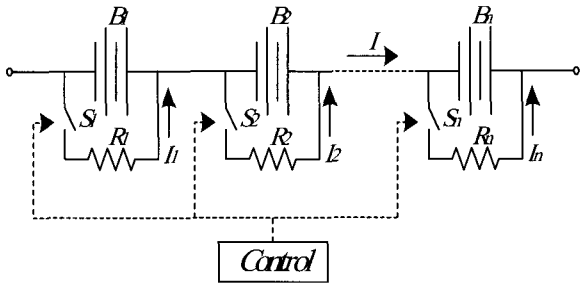
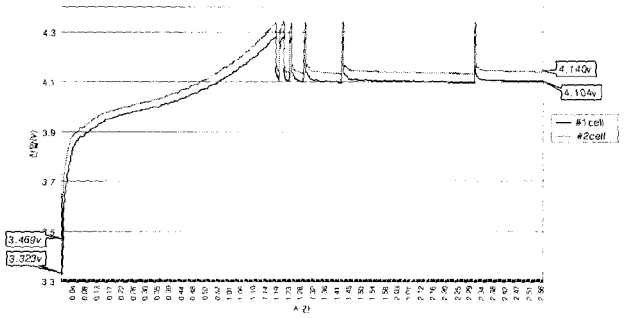
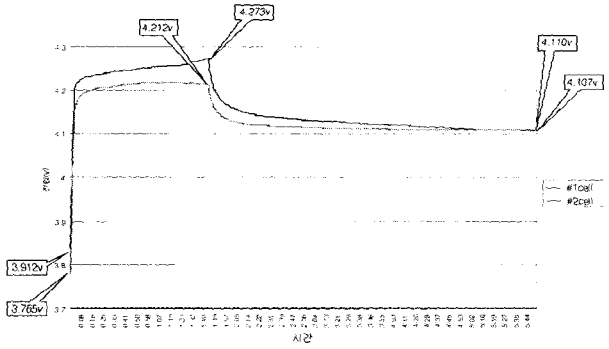


그림 9 병렬 저항 방식
Fig. 9 Bypass with resistance

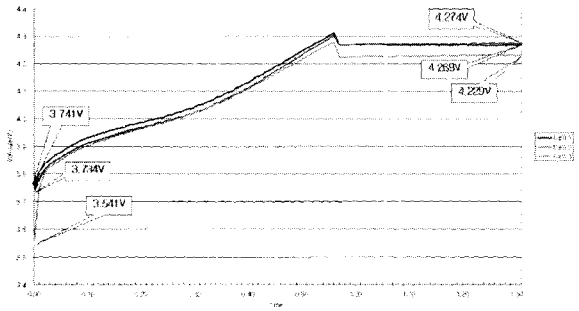
그림 9의 (a)는 2셀의 배터리팩에서 보호회로 기능만 수행하였을 때의 실험결과를 보여주고 있다. 충전 초기 각 셀간의 전압편차는 약 0.146[V]의 차이를 보이고 있으며, 충전이 진행되면서 전압편차의 폭이 다소 감소되기는 하였지만 0.036[V]의 편차를 가지며 유지되는 것을 볼 수 있다. 반면에 (b)의 경우와 같이 보호회로와 전압안정화회로를 모두 적용하였을 때에는 충전 초기시점에서 0.147[V], 충전 종료시점에서 0.003[V]로 전압이 안정화됨을 볼 수 있다. 또한 (c)에서의 보호회로 기능만 수행시 3셀의 경우의 실험결과



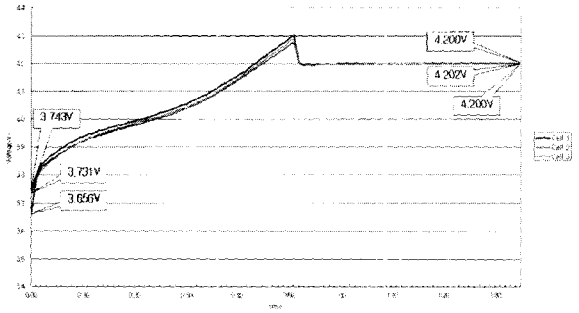
(a) 보호회로(2 Cell)



(b) 보호회로 + 전압안정화회로(2 Cell)



(c) 보호회로(3 Cell)



(d) 보호회로 + 전압안정화회로(3 Cell)

그림 9 실험결과
Fig. 9 Experimental results

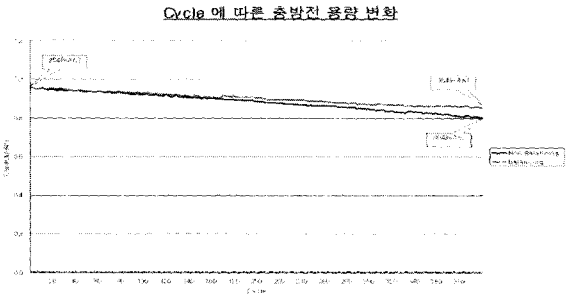


그림 10 셀 밸런싱의 효과
Fig. 10 Effect of balanced cells

를 나타내고 있으며, 셀간 최대편차가 약 0.2[V]에서 충전종료시점에서는 최대편차가 0.045[V]가 발생되었으며, 반면 (d)의 보호회로 및 전압안정화회로를 모두 적용한 경우에는 0.087[V]에서 0.002[V]로 충전종료시점에서 셀간의 전압편차가 거의 존재하지 않음을 알 수 있다. 그림 10에서는 전압안정화회로를 채택한 경우와 채택하지 않은 경우 배터리의 충·방전 횟수별 용량의 변화를 나타내고 있으며, 초기에는 동일한 용량에서 충방전을 시작하였으나 400사이클 시점에서는 용량이 약 50[mAh] 차이가 발생함을 볼 수 있다. 또한 전압안정화회로를 적용하지 않은 셀의 경우 400사이클 시점에서 정격용량의 약 80[%]에 도달함으로써 수명이 종료하였으나 전압안정화회로를 적용한 경우에는 약 500사이클에서 수명이 종료됨을 알 수 있었다. 따라서 전압안정화회로의 적용을 통해 3셀 리튬-이온 배터리 팩의 경우 수명은 약 25[%] 증대됨을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 노트북 PC, 휴대전화, PDA, 디지털 카메라 등 최근 모바일 기기의 급속한 발전에 큰 역할을 담당하고 있는 2차 전지 중 리튬-이온 배터리를 대상으로 보호회로의 구성 및 역할과 함께 다중 셀의 적용시 나타나는 전압 불균형 현상에 대해 살펴보았다. 전압불균형 현상은 다중 셀의 구성시 항상 발생되는 현상이며, 이로 인해 셀의 용량감소 및 수명단축 등이 발생된다. 제안된 전압안정화회로는 이러한 전압불균형 현상을 배터리 충전시 저항을 통해 방전하는 방식으로 전압을 동일하게 유지시키는 방식으로 적용되었으며, 2셀과 3셀을 대상으로 적용하였다. 2셀의 경우에는 저가의 시스템을 구현하고자하는 목적으로 보호 IC의 조합을 통해 전압안정화회로를 구현하였으며, 3셀의 경우에는 마이크로컨트롤러를 사용하여 3셀 뿐만 아니라 다

양한 구성의 셀 조합에 대응이 가능하도록 전압안정화 회로를 설계하였다. 설계된 시스템은 실험을 통해 기존 보호회로만 채용한 방식과 비교하여 용량의 경우 400 사이클을 기준으로 약 50[mA]의 증대효과를 가졌으며, 수명의 경우 약 25[%]가 증대됨을 확인하였고, 이를 통해 전압안정화회로의 필요성 및 타당성을 입증하였으며, 기존의 전압안정화회로에서의 마이크로컨트롤러와 보호 IC를 모두 사용한 방식에 비해 저가의 시스템이라는 장점을 가진다.

이 논문은 (주)파워로직스 선행개발연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] Yao C. Hsieh, Chin S. Moo, I S. Tsai, "Balance Charging Circuit for Charge Equalization", *IEEE PCC-Osaka,* 2002, pp. 1138~1143.

[2] Stephen W. Moore, Peter J. Schneider, "A Review of Cell Equalization Methods for Lithium Ion and Lithium Polymer Battery Systems", *2001 Society of Automotive Engineers*, 2001.

[3] J.Calvente, L. Martinez-Salamero, P. Garces, R. Leyva, "Dynamic Optimization of Bidirectional Topologies for Battery Charge/Discharge in Satellites", *IEEE*, pp. 1994~1999.

[4] Philip T. Krein, Robert Balog, "Life Extension Through Charge Equalization of Lead-Acid Batteries", *2002 INTELEC*, 2002.

[5] Nasser H. Kutkut, "Life Cycle Testing of Series Battery Strings with Individual Battery Equalizers".

[6] Philip T. Krein, Sean West, Cory Papenfuss, "Equalization Requirements for Series VRLA Batteries", *IEEE,* 2001, pp. 125~130.

[7] N.H. Kutkut, D.M. Divan, D.W. Novotny, "Charge Equalization for Series Connected Battery Strings," *IEEE IAS Annual Meeting,* Oct. 1994, pp. 1008~1015.

[8] 황호석, 남종하, 장대경, 최진홍, 신익수, "다중셀에 적용된 전압안정화회로 설계", *전력전자추계학술대회 논문집*, pp. 193~196. 2003. 11.

[9] 황호석, "다중셀에서의 안정화 회로 설계", 서울산업대 석사학위논문, pp. 1~39. 2004. 2.

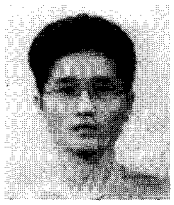
저 자 소 개

황호석(黃鎬石)

1968년 12월 27일생. 1996년 원광대 공대 전자공학과 졸업. 2004년 서울산업대 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1985년~1988년 영원통신. 1995년~1997년 동양트랜스공업. 1999년~현재 파워로직스 기술연구소 부장.

남종하(南鍾夏)

1974년 4월 24일생. 2000년 호서대 공대 전기공학과 졸업. 2004년 건국대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년~현재 파워로직스 기술연구소 연구원.

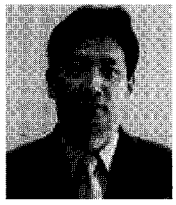


최진홍(崔震弘)

1972년 3월 8일생. 1999년 건국대 공대 공업화학과 졸업. 1999년~2002년 성남전자공업 부설연구소 연구원. 2002년~현재 파워로직스 기술연구소 연구원.

장대경(張大慶)

1972년 3월 26일생. 1998년 충주대 제어계측공학과 졸업. 2003년~현재 서울산업대 대학원 전자공학과 석사과정. 1999년~현재 파워로직스 기술연구소 연구원.



박민기(朴珉基)

1985년 연세대 공대 전자공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전자공학과 졸업(공박). 1985년~1990년 LG전자 연구소 주임연구원. 2000년~2001년 동경대 생산기술연구소 연구원. 1996년~현재 서울산업대 전자정보공학과 부교수. 1998년~현재 한국퍼지 및 지능시스템학회 이사 및 편집위원.