Regular Paper
J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.
Vol. 32, No. 1, pp. 58-63 January 2019
DOI: https://doi.org/10.4313/JKEM.2019.32.1.58
ISSN 1226-7945(Print), 2288-3258(Online)

리튬 배터리 퓨즈 온도 보상에 따른 과전류 시퀀스 제어 알고리즘 설계

송정용, 허창수
인하대학교 전기공학과

Design of Over Current Sequence Control Algorithm According to Lithium Battery Fuse Temperature Compensation

Jung-Yong Song and Chang-Su Huh
Department of Electrical Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

(Received August 21, 2018; Revised September 5, 2018; Accepted September 9, 2018)

Abstract: Lithium-ion batteries used for IT, automobiles, and industrial energy-storage devices have battery management systems (BMS) to protect the battery from abnormal voltage, current, and temperature environments, as well as safety devices like, current interruption device (CID), fuse, and vent to obtain positive temperature coefficient (PTC). Nonetheless, there are harmful to human health and property and damage the brand image of the manufacturer because of smoke, fire, and explosion of lithium battery packs. In this paper, we propose a systematic protection algorithm combining battery temperature, over-current, and interconnection between protection elements to prevent copper deposition, internal short circuit, and separator shrinkage due to frequent and instantaneous over-current discharges. The parameters of the proposed algorithm are suggested to utilize the experimental data in consideration of battery pack operating conditions and malicious conditions.

Keywords: Battery management system, Positive temperature coefficient, Current interrupt device, Copper deposition

1. 서 론

리튬 배터리는 높은 에너지 밀도, 낮은 자가 방전율, 긴 수명 등의 장점 때문에 현재 휴대용 제품은 물론 친환경 자동차, 신재생에너지 전력망에 적용되는 에너지 저장 장치(energy storage system, ESS) 등 각 응용 분야에 적용되고 있다. 응용 분야별 배터리 팩은 과충전, 과방전, 고온 환경 등의 안전성을 고려하여 여러 가지 보호 기능이 기본적으로 구현되어 있는 배터리 관리 장치(battery management system, BMS)를 적용한다 [1,2].

리튬 배터리 팩은 응용 분야에 적용되는 원통형, 각형, 파우치형 등과 같이 배터리 타입에 따라, 첫째, 외부 온도 및 충/방전 전류, 접점부 발열량에 따라 동작하는 정특성 써미스터(positive temperature coefficient, PTC), 둘째, 과충전과 같은 비정상적인 동작 상태에서 배터리 내부 압력에 의하여 개방 동작하는 과전류 보호 소자(current interrupt device, CID), 셋째, 충/방전 과전류에 따라 동작하는 퓨즈, 넷째, 배터리 내부 압력으로 인한 폭발을 사전에 차단하기 위한 벤팅 등의 자체 보호 소자를 보유하고 있다.

반면에 이러한 셀의 보호 소자 및 BMS를 가지고 있음에도 불구하고 2006년 Dell 노트북에 사용되었던 배

✉ **Chang-Su Huh; cshuh@inha.ac.kr**

Copyright ©2019 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

터리 화재, 2010년 UPS Cargo Airline 화물칸에 있었던 배터리 화재, 2013년 Boeing Dreamliners 배터리 화재, 2016년 삼성 갤럭시 노트 7 배터리 화재 등과 같이 인명 피해나 천문학적인 재산 피해, 제조사 브랜드 이미지에 큰 손상을 초래하는 사례들이 지속적으로 나오고 있다 [3].

소형 LCO 리튬 배터리는 고온 환경이나 과충전, 과전류 등에 의해 전지 온도가 상승하게 되면 만충전상태에 있는 양극활물질 $Li_{0.5}CoO_2$와 CoO_2가 열역학적으로 안정한 상태를 가지고자 분해 산소를 급격하게 방출하고 온도 상승된 전지는 내부 전해액 용매를 기화시켜 전지 내부에 채워지게 되는데, 이는 양극에서 발생된 산소와 전해액에서 발생된 유기용매 가스가 반응하여 전지의 발화를 유발한다. 또한 대형 리튬 배터리에서는 고온 사이클 특성 및 저온 출력 향상, 용량, 스웰링 특성 등을 개선하기 위하여 음극의 표면에 형성되는 고체 전해질 피막(solid electrolyte interphase, SEI)을 견고하게 형성하고 프로필렌 카보네이트에 다양한 첨가제를 넣어 전해질을 선택하는데, 장기간 사용 환경에 따라 노화된 전극층의 내부 저항이 높아져 국부적 반응으로 이어지고 나아가서 리튬 금속의 석출, 용해 과정이 반복되면서 덴드라이트까지 발생하여 내부 단락까지 일어날 수 있다. 따라서 사용하는 리튬계 배터리의 소재 및 안전소자 특성, 적용되는 배터리 팩 응용 분야 사양에 맞도록 충/방전 전류의 보호 및 알람 임계값을 구분하여, 전기화학적 안전 특성에 위배되지 않도록 마진을 고려하여 알고리즘 설계 및 제품 적용이 필요하다.

본 논문에서는 충/방전 과전류로 인하여 셀의 내부 온도 상승 및 압력 상승으로 발연 및 발화를 야기하고 나아가서 배터리 팩의 열 폭주 상태, 최악의 경우 연쇄 폭발로 이어지는 비정상적인 상황을 보호하고자 각형 배터리 보호 소자인 퓨즈 동작 특성과 셀 온도, BMS의 보호 기능을 복합적으로 고려하여 순차적으로 동작하는 과전류 보호 알고리즘을 제안하여 응용 분야별 신뢰성과 안전성을 확보하고자 한다 [4,5].

2. 실험 방법

리튬 각형 배터리는 퓨즈가 내장되어 있으며 BMS가 정상 차단 동작이 불가능할 경우, 퓨즈가 동작하여 방전 전류를 차단함으로써 응용하는 배터리 팩의 파워라인을 강제로 끊고 리튬 배터리를 보호한다. 휴대용 배터리 팩 응용 제품 중 대중적으로 사용하는 1P4S 팩을 구성하여 리튬 각형 배터리와 BMS를 연결하여 실험 샘플을 제작하였고 사양은 표 1과 같다.

Table 1. Specification of the battery pack.

Classification	Unit	Value
Cell	Type	Prismatic, 103450
Array	Series and parallel	1P4S
Nominal voltage	V	14.8
Pack capacity	Wh	29.6
Charge (CC/CV)	A, V	2, 16.8
Max discharge	A	4
Operating temperature	℃	0 to 45 (charge)
		-20 to 60 (discharge)
Voltage sensing	ch	4
Current sensing	ch	1
Temperature sensing	ch	1

2.1 배터리 팩 사양 및 구성

실험 샘플 제작은 103450 리튬 각형 배터리 4개를 스팟 용접을 통하여 직렬로 연결하고 각 단위 셀들의 전압, 팩 전류, 배터리 표면 온도를 실시간 모니터링할 수 있도록 BMS를 구성하였고 블록다이어그램은 그림 1과 같다.

제조사 사양서에서 제공하는 배터리 동작 온도 범위 및 표준 충/방전 조건을 기반으로 실험을 진행하였으나, 각형 배터리에 내장되어 있는 퓨즈의 동작 조건을 확인하기 위하여 온도 및 최대 방전 전류 값을 제공,

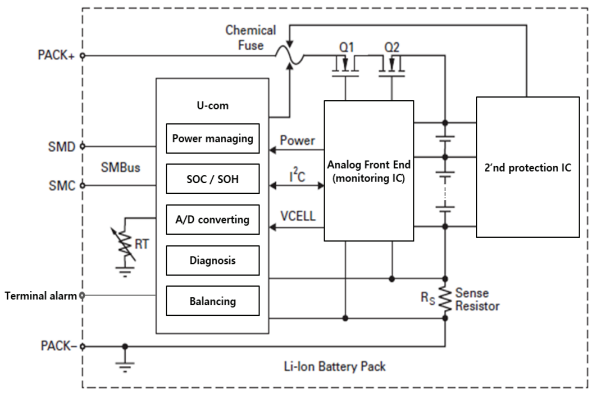

Fig. 1. Block diagram of the battery management system.

사양서보다 조금씩 높여 가며 내부 퓨즈의 동작 영역을 확인하였다.

2.2 배터리 관리 장치 설계

BMS의 과전류 보호 기능은 적용된 리튬 배터리 팩 사양서의 정상 동작 범위를 벗어날 경우를 고려하여, 배터리 팩의 방전 출력 파워를 상위제어기와 연계하여 제어한다. 이를 위하여 실시간 전류 센싱 값을 모니터링하고 제한 임계값을 초과할 경우 시간에 따른 알람, 차단 기능을 할 수 있도록 구현하였다.

각형 배터리 팩에 내장된 퓨즈는 온도 및 방전 전류의 비선형적인 동작 특성을 고려하여 운영할 수 있도록 BMS 하드웨어와 실시간 측정되는 모니터링 값을 연산하고 이에 따라 출력 제어가 가능하도록 소프트웨어 및 알고리즘으로 구현하였다.

2.3 과전류 시퀀스 제어 알고리즘 설계

리튬 배터리 팩 응용 분야에서 사용하는 각형 셀의 퓨즈나, 원통형 셀의 CID는 온도와 흐르는 방전 전류에 따라 비선형적인 특성을 가지고 있으며, cut-off time이 다르다. 특히 각형 배터리 팩에서 사양을 벗어나는 과전류나 단락 전류는 전지 내압의 상승보다는 가열 속도가 급격하여 자기발열반응이 일어나며 동시에 고온 상태에 이르러 열폭주 현상이 일어난다. 즉, 전지 내부에서 순차적으로 음극에 의한 전해액의 환원 반응 이후 열분해반응, 양극 표면에서의 전해액의 산화반응으로 진행되고 나아가서 130~150℃ 부근에서 음극의 열분해 및 양극의 열분해반응으로 발연, 발화가 이루어지며 다수의 배터리 팩에서는 연쇄 폭발까지 나타날 수 있다. 이러한 과전류 특성은 사용한 리튬계 배터리의 활물질과 전해질, 분리막 특성 및 제조 특성에 따라 다르며 배터리 내부의 안전 소자 동작 영역을 최대 마진으로 고려하여 차단하고 보호하여야 한다. 따라서 그림 2와 같이 전류 레벨에 따라 hardware wiring alarm 및 셀 퓨즈 보호(cell fuse proteciton, CFP) 알람 임계값, 스위칭 기능이 동작하는 CFP 임계값으로 구분하였다. 온도의 경우 사용하는 배터리의 동작 온도 특성에 따라 보호하는데, 본 연구에서는 60℃에서 알람을, 73℃에서 스위칭 기능으로 차단 동작하는 임계값을 두고 동작하도록 보호 레벨을 구분하였다. 또한 배터리 팩의 온도 환경 및 방전 전류 레벨에 따라 구분하여 상위제어기와 협조 제어할 수 있도록 구현하였다. 즉,

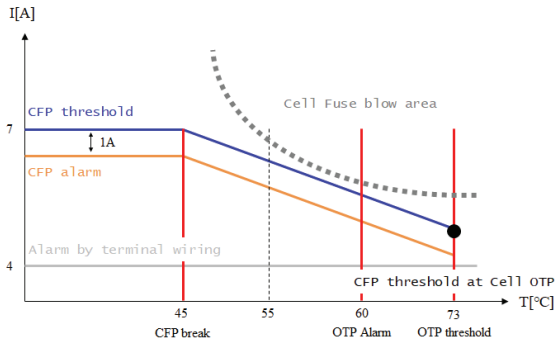

Fig. 2. Advanced over current protection and alarm region.

Table 2. Parameters of advanced over current protection algorithm.

Parameter	Unit	Value
Alarm by terminal	mA	4,000
CFP threshold alarm delta I	mA	1,000
CFP threshold	mA	7,000
Alarm hold time for CFP	sec	5
CFP delay time	msec	250
CFP recovery time	sec	16
CFP break temperature	℃	45
CFP threshold at cell OTP	mA	5,000
OTP alarm	℃	60
OTP threshold	℃	73

CFP break 지점과 셀 과온 보호 동작 임계값의 CFP 임계값 지점의 기울기를 기준으로 배터리 팩 방전 전류에 따라 알람 및 보호 기능을 제어하고, 동시에 온도에 따라 상위제어기와 연계하여 배터리 팩의 출력을 제어할 수 있도록 알고리즘을 구현하였다 [6].

알고리즘의 파라미터는 표 2와 같이 첫째로 배터리 팩 커넥터 핀을 통한 사양서의 최대 방전 전류 알람을 바로 감지할 수 있도록 wiring alarm을 구성하였다. 둘째로 온도와 무관하게 CFP가 동작할 수 있는 break 포인트와 과온 보호 동작 영역에서의 CFP 포인트를 임계값으로 지정하여 사용자가 조정할 수 있도록 파라미터를 설정하였다. 셋째로 cell fuse blow area는 온도 조건에 따라 단위 셀 상태에서 과방전 전류 조건으로 실험 후 내부에 장착된 퓨즈가 오픈된 상태의 분포도를 확인하여 현실화하였다. 끝으로 각 보호 동작 임계값의 알람 및 해제, 스위칭 동작 및 해제에 필요한 유지시간을 고려할 수 있도록 파라미터를 설정하여 사용자의 환경에 적합하고 조정 가능하게 구현하였다.

본 연구에서는 실제 배터리 팩 상태로 알고리즘 동작 확인 시 실제 셀 온도 및 방전 전류에 따라 cell fuse가 동작하는지 검출을 위하여, 단위 셀의 과온 보호 동작

(73℃) 및 알람(60℃)은 비동작 상태로 진행하였고 과방전 보호 동작(2.5 V)은 정상 동작 상태로 진행하였다. 또한 배터리 제조사 사양서의 최대 충전 전류는 3 A, 온도는 최대 45℃로 한정되어 있어 본 알고리즘에서는 방전 전류에 한하여 보호 알고리즘을 구현하여 확인하였다.

결론적으로 선택한 각형 배터리의 퓨즈 보호 영역을 기준으로 온도 및 방전 전류에 따른 알람, 스위칭 제어를 할 수 있도록 파라미터를 구성하였으며 이는 사용하는 배터리의 동작 특성과 시스템의 동작 특성을 상호 고려하여 협조 제어를 할 수 있도록 알고리즘을 구현하였으며, 실험을 통한 알고리즘 동작 상태를 확인하였다 [7].

3. 결과 및 고찰

3.1 온도별 배터리 팩 방전

실험에 사용한 배터리 팩은 셀 제조사에서 제안하는

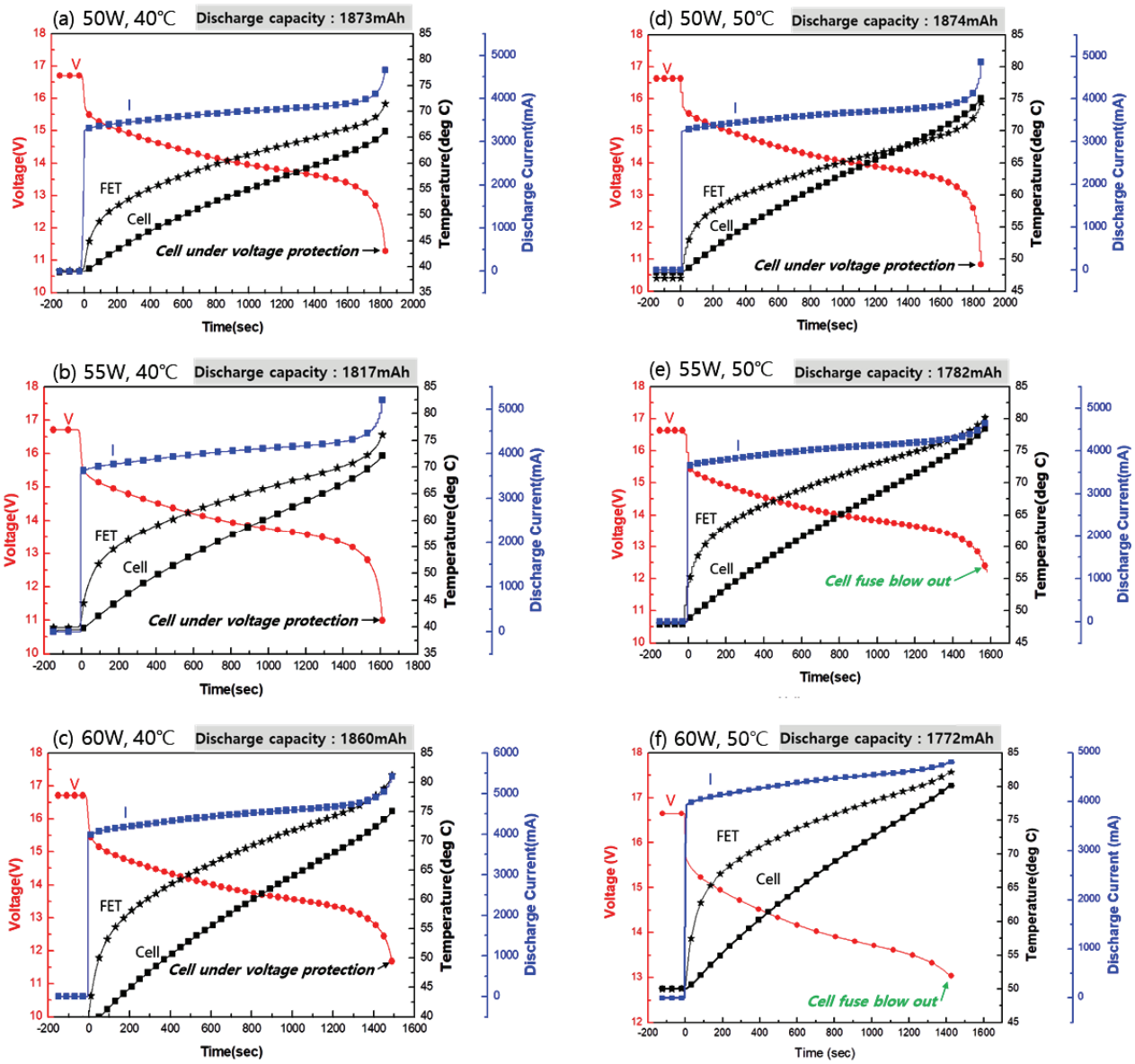

Fig. 3. Discharge voltage and current profile at each condition with FET and cell temperature.

표준 충전 조건인 정전류(constant current, CC), 정전압(constant voltage, CV)으로 상온/상습 조건에서 충전하였고 종료 조건은 1 C/20인 100 mA로 하였다. 셀 퓨즈가 동작하는 조건을 확인할 수 있도록 40℃와 50℃ 환경에서 50 W, 55 W, 60 W 조건으로 방전을 실시하였고 이에 따른 방전 프로파일 및 FET, 셀 온도 상태를 그림 3에 표현하였다.

실제 제조사의 사양서에 있는 방전 동작 최대 온도는 60℃이었지만 셀 내부 퓨즈 동작까지의 최대 방전을 고려한다면 에이징이 없는 상태일 경우, 그림 3(c)와 그림 3(d)와 같이 최대 75℃까지는 안전상에 무리가 없이 배터리 팩 출력을 낼 수 있었다. 이는 초기 배터리 상태(state of charge, SOH)가 100%일 때의 출력 가능성을 의미한다. 팩 방전 용량은 93~94% 정도로 고온 환경에서 일부 용량이 높은 이유는 배터리 내부의 이온 이동성이 증가되어 일시적인 용량 증가 현상 때문이다. 본 실험 결과를 가지고 설계한 배터리 팩은 방전 전류 및 온도 조건에 따라 가용할 수 있는 최대 용량 및 파워 리미트 값을 추정할 수 있었고 나아가서는 배터리 팩의 상위제어기와 연계하여 출력을 제어할 수 있었다.

3.2 과전류 시퀀스 제어 알고리즘 검증

일반적인 BMS의 경우, 과전류 보호 동작은 설정한 임계값을 초과하는 방전 전류가 감지될 때 알람 및 스위칭 소자를 차단하여 배터리 팩의 출력을 차단한다. 또한 특정 임계값 이하로 방전 전류가 감지될 때 알람을 해제하거나 및 스위칭 소자를 동작시켜 배터리 팩의 출력을 낼 수 있도록 제어한다 [8].

제안한 과전류 보호 알고리즘은 이를 개선시켜 셀의 온도를 감지하고 적용된 배터리 내부의 과전류 보호 소자 동작 특성을 고려하여, 배터리 팩이 실제 과전류 방전 시 각각의 임계값을 구분하여 알람 및 보호를 할 수 있도록 구현하였다. 즉 그림 3(a)~(d)의 경우, 각 온도 환경에서 출력 조건에 따라 방전을 하다가 단위 셀의 과방전 보호 조건인 2.5 V에 도달하면서 방전 FET가 차단되었다. 정상적인 동작인 경우에는 셀 온도가 60℃에 도달하면서 과온 차단 보호 동작이 먼저 이루어지겠지만, 본 실험에서는 개선된 과전류 보호 동작의 임계값을 구하기 위하여 과온 차단 보호 기능은 미동작 상태로 실험하였다.

그림 3(e)~(f)의 경우, 50℃ 환경에서 55 W 및 60 W 부하 조건에서 방전하고 있었으며 종료 시점은 단위 셀 전압이 3.0~3.2 V 부근이었다. 그러나 BMS에서는 단위 셀 전압이 0 V로 모니터링되었으며 이는 각형 배터리 내부 퓨즈가 동작되어 실제 셀 전압을 감지할 수 없었고 배터리 팩 출력도 더 이상 낼 수 없는 불능 상태가 되었다. 즉, 그림 2에서 설정한 대로 45℃ 이하에서는 과전류 보호 동작은 7 A 및 알람은 6 A에서 동작하지만 50℃ 환경에서 방전한 결과 단위 셀 온도가 79~80℃가 감지되는 지점에서 팩 전류가 4.6~5 A 사이의 값이 흐르면 자동적으로 CFP 정상 동작함을 확인할 수 있었다.

3.3 배터리 팩 출력 제어 검증

그림 4는 개선된 과전류 보호 알고리즘에서 적용된 각형 셀 사양의 최대 방전 전류를 온도와 무관하게 배터리 잔존 용량(state of charge, SOC) 전 영역에서 4 A 이상의 전류가 감지되었을 때, 최초로 배터리 팩 알람을 확인하기 위하여 커넥터에 핀을 할당하여 하드웨어 와이어링 알람을 직접적으로 감지하고 이에 대한 동작 신호를 확인하였다. 또한 BMS는 최초 알람 이후 전류 값이 임계값에 도달하여 지속하여도 충/방전 FET는 차단되지 않으며 4 A 이하로 떨어지면 알람이 해제됨을 확인하였다.

배터리 팩의 방전 전류가 CFP break point 45℃를 지나서도 상승한다면 CFP alarm 임계값에 도달하게 되며 지속적으로 방전 전류나 셀 온도를 감안하여 방전 스위칭 동작을 16초 동안 제한함으로써 팩 출력 제

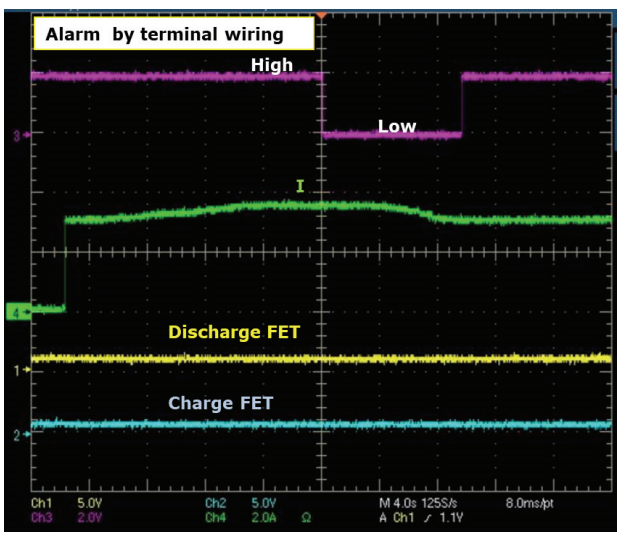

Fig. 4. Over current protection alarm by terminal wiring.

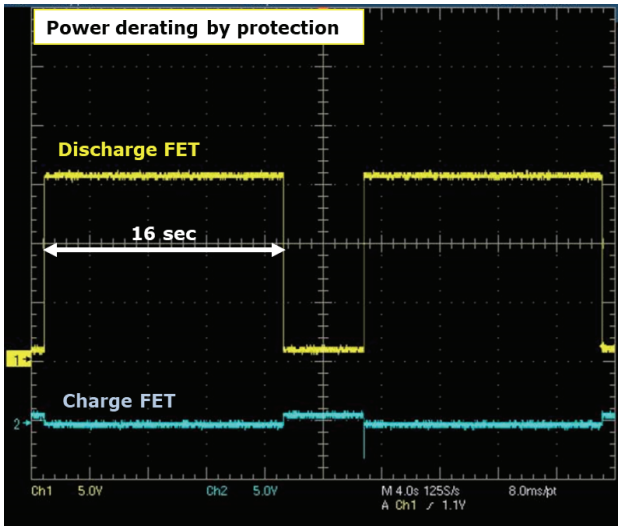

Fig. 5. Power derating by CFP.

어를 하도록 구현하였고 실험을 통하여 그림 5와 같이 확인하였다. 또한 방전 FET는 차단에 따라 모듈 출력이 떨어졌다가 5초 유지 후 재기동하도록 구현되었고, 이는 상위제어기와 연계하여 출력을 디레이팅할 수 있도록 협조 제어 알고리즘을 검증하였다. 이때 충전 FET는 SOC 100% 미만에서는 상시 ON 상태를 유지하여 충전 모드에서 대기할 수 있도록 구현하였고 이를 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 각형 리튬 배터리를 적용한 팩의 과전류 보호 기능을 단위 셀 온도와 병행 고려하여 실제 배터리 팩이 운용되는 환경에서 설정된 전류나 온도 임계값을 감지하고 알람, 스위칭 제어, 퓨즈 동작까지 순차적으로 제어할 수 있도록 알고리즘 설계 및 파라미터를 선정하였고 실험을 통하여 정상 동작을 확인함으로써 유효성을 검증하였다.

즉 각형 배터리를 사용하는 배터리 팩의 경우, 사용하는 리튬 배터리의 전기화학적 동작 특성을 이해하고 출력 사양의 신뢰성 및 내부 장착된 안전소자의 안전성을 고려하여 과전류 시퀀스 제어 알고리즘을 구현함으로써 응용시스템의 출력 신뢰성 및 안전성을 확보할 수 있었다. 또한 복합적인 시퀀스 제어 동작을 위하여 선정된 파라미터는 각형 배터리 4대 구성 재료의 특성이 그대로 반영된 최대 실험 마진 값을 고려함으로 발연이나 발화, 폭발과 같은 비정상적인 동작 안전성을 검증할 수 있었다.

이처럼 배터리 팩을 사용하는 응용 분야의 특성, 리튬 배터리 자체 특성 간의 신뢰성, 안전성 동작을 고려하여 알고리즘을 구현하고 파라미터를 선정하여 적용함으로써 사용자에게 보다 안전한 배터리 팩 설계를 제안할 수 있을 것으로 기대한다.

ORCID

Chang-Su Huh https://orcid.org/0000-0002-4566-3823

REFERENCES

[1] A. T. Elsayed, C. R. Lashway, and O. A. Mohammed, *IEEE Trans. Smart Grid*, **7**, 897 (2016). [DOI: https://doi.org/10.1109/tsg.2015.2418677]

[2] K.W.E. Cheng, B. P. Divakar, H. Wu, K. Ding, and H. F. Ho, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, **60**, 76 (2011). [DOI: https://doi.org/10.1109/TVT.2010.2089647]

[3] I. Ayub, *Making sense of complex global lithium-ion battery regulations*, https://www.edn.com/design/power-management/4458542/Making-sense-of-complex-global-lithium-ion-battery-regulations (2017).

[4] T. H. Dubaniewicz and J. P. DuCarme, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **49**, 2451 (2013). [DOI: https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2263274]

[5] B. G. Carkhuff, P. A. Demirev, and R. Srinivasan, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **65**, 6497 (2018). [DOI: https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2786199]

[6] S. N. Motapon, A. Lupien-Bedard, L. A. Dessaint, H. Fortin-Blanchette, and K. Al-Haddad, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **64**, 998 (2017). [DOI: https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2618363]

[7] W. Guo, L. Xiao, and S. Dai, *IET Gener. Transm. Distrib.*, **10**, 653 (2016). [DOI: https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2014.1158]

[8] Q. Wu and Z. Zhu, *IEEE Trans. Power Electron.*, **32**, 8969 (2017). [DOI: https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2701507]