

저항 열화 기반의 배터리 팩 편차 파라미터 추출 방안 및 검출 알고리즘

송정용, 허창수^a

인하대학교 전기공학과

Detection Algorithm and Extract of Deviation Parameters for Battery Pack Based on Internal Resistance Aging

Jung-Yong Song and Chang-Su Huh^a

Department of Electrical Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

(Received August 21, 2018; Revised August 31, 2018; Accepted September 9, 2018)

Abstract: A large number of lithium-ion batteries are arranged in series and parallel in battery packs, such as those in electric vehicles or energy storage systems. As battery packs age, their output power and energy density drop because of voltage deviation, constant and non-uniform exposure to abnormal environments, and increased contact resistance between batteries; this reduces application system efficiency. Despite the balancing circuit and logic of the battery management system, the output of the battery pack is concentrated in the most severely aged unit cell and the output is frequently limited by power derating. In this study, we implemented a cell imbalance detection algorithm and selected parameters to detect a sudden decrease in battery pack output. In addition, we propose a method to increase efficiency by applying the measured testing values considering the operating conditions and abnormal conditions of the battery pack.

Keywords: Electric vehicle, Energy storage system, Battery management system

1. 서론

리튬 배터리는 IT 기기에서부터 전기자동차, 에너지 저장 시스템 등으로 용도가 확대 적용되면서, 다가오는 4차 산업혁명의 스마트 시대를 도래하는 데 매우 중요한 역할을 차지하고 있다. 이러한 수요 확대에 부흥하기 위해서는 리튬 배터리의 신뢰성과 안전성 그리고 가격이 매우 중요하다. 특히, 높은 에너지 밀도를 요구하는 전기자동차용 배터리 팩이나 에너지 저장 시스템은 다수의 리튬 배터리가 직/병렬 연결을 통하여 각

응용 분야에서 요구하는 다양한 사양을 만족하도록 제작하고 오랜 기간 사용에도 문제가 발생하지 않아야 한다.

그러나 지속적인 불균일한 환경에서 노출되어 사용된 배터리 팩은 출력 및 에너지 특성이 떨어진다. 여기에는 다양한 원인이 있을 수 있는데 크게 3가지 정도로 요약할 수 있다. 첫째, 단위 셀의 태생적 혹은 사용된 이력에 따른 용량 및 저항 편차 발생이다. 둘째, 배터리 팩 내부 직/병렬로 연결된 단위 셀들의 불균일한 환경 상태에 따른 열화이다. 셋째, 직/병렬 연결된 접점부의 불량이나 와이어 하네스 및 커넥터 접촉부 불량이다. 이러한 문제점들은 단위 셀의 배터리 노화 상태(state of health, SOH)를 열화시키고, 지속적으로 편차가 집중되면서 용량 혹은 저항 편차가 유발됨으로써, 구성하고 있는 단위 모듈이나 팩 출력 특성을

a. Corresponding author; cshuh@inha.ac.kr

저하시킨다 [1].

대부분의 리튬 배터리를 사용하는 응용 제품은 배터리 관리 장치(battery management system, BMS)를 가지고 있으며 단위 셀별 전압 편차가 설계된 사양을 벗어난다면, 밸런싱 알고리즘이 동작하여 직/병렬로 연결된 단위 셀들의 전압 산포를 균일하게 만들 것이다. 밸런싱 회로는 단위 셀들의 전압을 하향 평준화하여 균등하게 만드는 passive balancing과 에너지 밀도가 높은 단위 셀의 에너지를 낮은 쪽으로 전달하는 active balancing으로 나뉜다 [2,3].

그럼에도 불구하고 다수의 배터리 팩에 적용된 BMS의 밸런싱 동작에는 편차를 줄이는 데 부족함이 있다. Passive balancing은 배터리 팩에 적용된 대용량 단위 셀의 에너지 및 출력 대비 상대적으로 밸런싱 전류가 1~3 A 정도로 매우 낮아 효율성이 떨어진다. 또한 active balancing의 경우에는 다수의 변압기 소자 및 스위칭 제어 소자를 BMS 하드웨어에 추가해야 하는데 이는 가격 상승에 대한 부담감으로 현재까지는 각 배터리 팩 제조사에서 적용하기에는 한계점이 존재한다.

본 연구에서는 전기자동차나 에너지 저장 시스템과 같이 고가 배터리 팩 운용에 있어 특정 단위 셀의 열화 현상으로 전체 팩 출력을 떨어뜨리는 것을 사전에 예측하고 다수 직/병렬 연결된 리튬 배터리의 편차를 초기에 검출할 수 있도록 알고리즘을 제안하고 파라미터 변수를 선정하는 방법을 제안하였다. 나아가서 자체 밸런싱 기능을 통한 편차 조정, 팩이나 모듈 단위 분해 후 편차 재조정 혹은 사전 교체 시점 제안을 통한 경제적인 운용성을 높이고자 한다 [4].

2. 실험 방법

다수의 직/병렬 연결된 배터리 팩을 구성하기 위하여 18650 원통형 리튬 배터리를 이용하였으며, 병렬 연결을 모사하기 위하여 4개의 셀을 직렬로 연결 후, 각 직렬 구성에 1개 배터리를 병렬로 추가 용접하여 표 1의 사양으로 샘플 제작하였다. BMS는 2P4S 구성의 배터리 팩에서 4개 직렬로 연결된 각 bank의 전압, 팩 전류, 온도를 실시간 측정하고 배터리의 잔존 용량(state of charge, SOC) 및 비정상적인 상태를 검출하여 리튬 배터리 보호기능, 통신, 제어할 수 있도록 그림 1과 같이 구성하였다 [5,6].

또한 본 연구의 목적을 위하여 실험에 사용한 배터리 팩에서 특정 bank의 한 개 셀은 기존 셀 대비 DC

Table 1. Specification of the battery pack.

Classification	Unit	Value
Cell	Type	Cylindrical, 18650
Array	Series and parallel	2P4S
Nominal voltage	V	14.4
Pack capacity	Wh	36
Charge (CC/CV)	A, V	1.25, 16.8
Operating temperature	℃	0 to 50 (Charge)
		-20 to 75 (Discharge)
Internal impedance	mΩ	18 (Unit cell)
Voltage sensing	ch	4
Current sensing	ch	1
Temperature sensing	ch	1

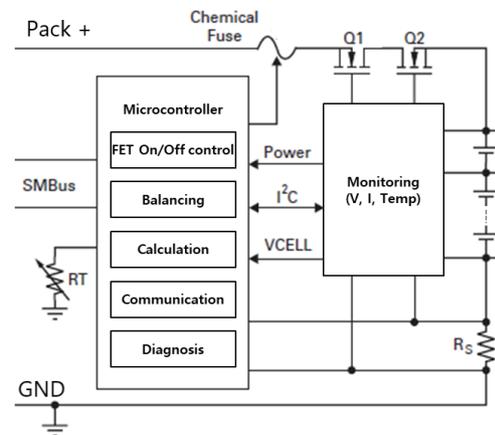


Fig. 1. Block diagram of the battery management system.

임피던스 값이 두 배인 셀을 모사하기 위하여 전원 라인 외부에 저항을 연결하였다. 그리하여 정상적인 방전 진행 중에 파워 라인이 끊기는 순간 저항 쪽으로 전류가 흐를 수 있도록 구성하여 수명이 종료된 셀을 연결했을 경우를 가정함으로써 가장 편차가 많이 날 수 있는 상황을 고려하여 실험하였다 [7,8].

2.1 검출 알고리즘

현재 리튬 배터리를 사용하는 BMS는 직렬로 연결된 모든 bank의 전압을 실시간으로 측정하여 과충전 상태나 과방전 상태를 모니터링한다. 또한 다수의 직렬 연결된 단위 셀들의 전압 편차가 일정 부분 벌어진다면 밸런싱 동작을 할 수 있도록 구현되어 있다. 그러

나 장시간 사용 환경이나 배터리 내부 마이크로 쇼트로 인한 진행성 저전압 현상과 같은 환경에서는 운용 중 사전 검출이 어렵다. 따라서 적용하는 응용 분야의 시스템 특성에 맞는 충/방전 전류 및 수명 특성을 고려한 각 단위 셀 간의 불균형을 사전에 검출할 수 있으며, 최악의 상황을 고려하여 파라미터를 선정할 수 있도록 그림 2와 같이 알고리즘을 구현하였다.

본 연구에서 제안하는 리튬 배터리 불균형 검출(cell imbalance detection, CID)을 위하여 알고리즘 동작 진입을 위한 방전 전류의 임계값을 설정하도록 구현하였다. 이는 응용하는 제품에 따라 정상 동작 조건 이하의 낮은 율별 방전에서는 각 셀들의 전압 편차는 미비하기 때문이다. 나아가서 CID 최소 동작 전압을 설정함으로써, LCO/LMO/NCM/LFP 등과 같이 적용하는 리튬계 배터리의 종류에 따라 사용자가 구분 응용할 수 있도록 파라미터를 설정하였다.

또한 BMS의 센싱 측정 오류를 보완하고자 센싱 값을 시간에 따라 이중으로 변동 비교하여 지속적인 셀 간 편차가 유지되는지 확인할 수 있도록 구현하였다. 나아가서 배터리 팩 내부의 최대 전압 편차와 최소 전압 편차를 비교하여 특정 상수배 이상의 경우와 특정 임계값을 넘어설 경우, 이는 수명이 다한 배터리의 특성을 보이므로 사용자가 상황에 따라 조치를 취할 수 있도록 알고리즘 설계 및 구현하였다. 따라서 설정한 파라미터 값을 어떻게 지정하느냐에 따라 자체 밸런싱 기능을 이용하여 편차를 줄일 것인지, 분해를 통한 외부 균등 충전 행위를 할 것인지, 아니면 최종적으로 단위 셀 혹은 모듈, 팩 자체를 교환할 것인지 판단할 수 있도록 실험적 데이터를 사용할 수 있게 구현하였다.

2.2 파라미터 설정 및 추출

제안된 알고리즘 파라미터를 설정할 때는 BMS의 밸런싱 기능을 동작하지 않은 상태로 하였으며, 단위 셀의 공칭 전압시점부터 만충전 상태까지 방전 C-rate별 전압 편차 상태를 확인하였고, 알고리즘 편차 확인을 위하여 BMS 전압 모니터링과 별도의 데이터 취득 장치(data acquisition, DAQ)를 연결하여 전압 변동을 측정하였다.

본 알고리즘을 적용하기 위하여 실제 정상적인 배터리 팩 운용 조건에서, 임의의 한 bank에 두 배의 저항을 연결한 전압 편차가 순간 어느 정도인지 확인이 필요하기 때문에, CID 최소 검출 전압부터 최대 충전 전압까지 정상 상태에서의 편차 조건을 확인 후 파라미

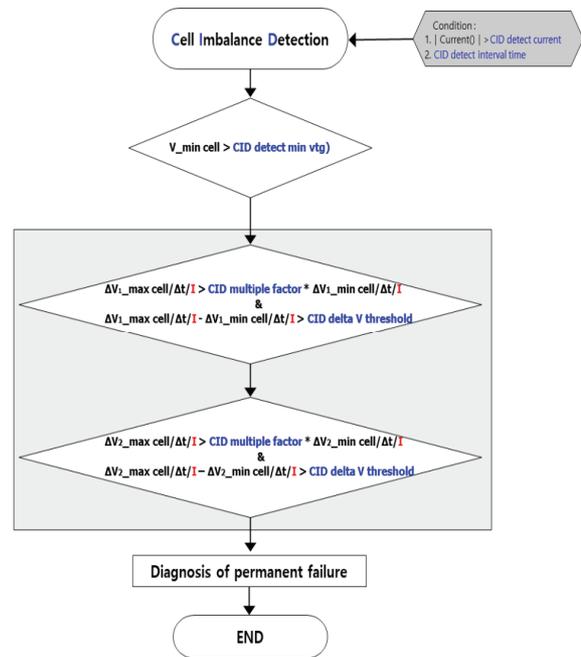


Fig. 2. Flow chart of cell imbalance detection.

터를 설정할 수 검증 방안을 제안하였다. 또한 수명 종료(end of life, EOL)된 모사 배터리 bank는 두 배의 저항 차이로 인하여 충전이 충분히 이루어지지 않기 때문에 용량 편차에 의한 전압 편차를 없애고자 충전 시에는 정상 파워 라인을 통하여 충전하였다. 또한 본 실험에 사용한 배터리 팩은 특정 시스템을 고려하여 용량 설계한 제품이 아니기 때문에 다양한 C-rate 조건별 전압 편차를 확인하였고, 초기 개방 전압 상태는 표준 충전조건으로 충전하고, 30분 이상의 충분한 휴지 후 시험 진행하였으며, 모든 충/방전 환경 온도는 상온/상습 조건으로 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 배터리 팩 전압 편차

실험용 배터리 팩은 알고리즘에서 제안한 CID 최소 검출 전압 레벨인 3.6 V에서 200 mV 간격으로 만충전 전압인 4.2 V까지 4개의 구간을 정하고 0.2 C, 0.5 C, 1.2 C, 1.5 C로 정상 방전하다가 EOL 배터리 모사 조건의 전압 편차를 보기 위하여 저항이 연결된 패턴으로 방전 전류가 흐르는 순간 전압 편차를 측정하였

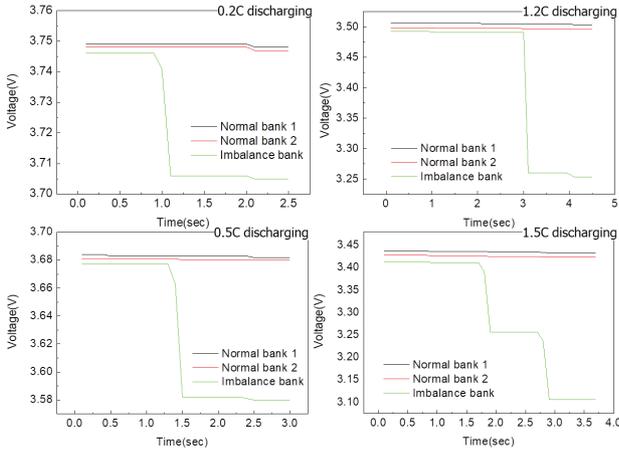


Fig. 3. Voltage deviation of different C-rate at 3.8 V.

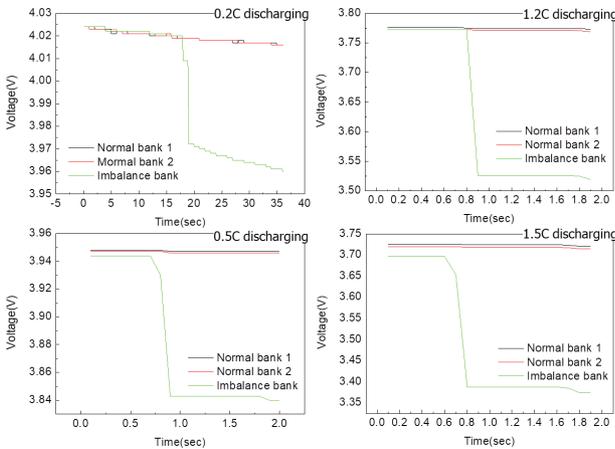


Fig. 4. Voltage deviation of different C-rate at 4.2 V.

다. 그림 3은 단위 셀 개방 전압이 3.8 V로 구성된 배터리 팩을 4가지 방전 조건으로 시험 진행하여 EOL 모사 배터리가 구성된 방전 상태의 전압 편차를 측정 한 결과이다. 0.2 C에서는 시간당 최대 전압 편차는 46 mV, 1.5 C에서는 276 mV까지 편차가 벌어졌으며, 시간당 최소 편차는 1~3 mV로 거의 변화가 없었다. 그림 4는 단위 셀 개방 전압이 만충전 조건에 가까운 4.2 V로 구성된 배터리 팩을 동일한 방법을 통하여 진행한 결과이며, 시간당 최대 전압 편차는 48~312 mV로 측정되었다. 단위 셀 개방 전압이 3.8 V와 유사하게 최소 전압 편차는 1~4 mV로 역시 변화가 거의 없었다.

또한 단위 셀 개방 전압 3.6 V, 4.0 V로 구성된 배터리 팩을 동일한 방법으로 측정하여 시간당 최대, 최

Open circuit voltage	Discharge C-rate	Max-Min ($\Delta V/\Delta t$)	Max-Min ($\Delta V/\Delta t/I$)
3600mV	0.2C	45 mV	43.269 mV
	0.5C	84 mV	31.731 mV
	1.2C	219 mV	33.494 mV
	1.5C	273 mV	32.500 mV
3800mV	0.2C	40 mV	38.462 mV
	0.5C	94 mV	35.577 mV
	1.2C	230 mV	35.256 mV
	1.5C	305 mV	39.893 mV
4000mV	0.2C	39 mV	37.500 mV
	0.5C	105 mV	39.231 mV
	1.2C	245 mV	36.859 mV
	1.5C	306 mV	39.209 mV
4200mV	0.2C	47 mV	45.192 mV
	0.5C	101 mV	38.269 mV
	1.2C	240 mV	37.660 mV
	1.5C	308 mV	39.487 mV

Fig. 5. Voltage deviation of imbalanced cell.

소 편차를 확인해 보니 그림 5와 같았다. 시간당 측정 한 최대, 최소 편차의 차를 확인해 보니 방전율에 따라 전압 편차의 차이가 있었으며, 이를 균등하게 확인하고자 실제 흘렸던 방전 전류 값으로 나누어 환산하였다. 결과적으로 CID 최소 검출 전압에서 만충전 전압까지의 EOL 모사 배터리 구성된 배터리 팩에서는 각 측정조건에서 최대 전압과 최소 전압의 편차는 대략 31~45 mV로 측정되었다.

따라서 상기와 같은 방법을 고려하여 실제 응용하는 배터리 팩에서는 정격 전류 및 파워, 최대 전류 및 파워를 고려하여 운용상에 나올 수 있는 최대 편차 조건을 사전에 검증함으로써, 다수의 직/병렬 연결된 배터리 팩의 가능성 있는 최대 편차를 사전 확인하고 그 이상의 값을 검출할 수 있도록 설계하여야 한다.

3.2 알고리즘 동작 개선

그림 6과 같이 단위 셀이 불균일할 경우 시간에 따른 전압 편차는 특정 임계값 이상으로 유지된다. 즉, 시간에 따른 V2-V1, V3-V1, V4-V1의 전압 변동률은 대략 40 mV 이상으로 편차를 유지한다. 그러나 일시적인 전압 센싱 오류는 V2-V1 단계에서만 40 mV로 편차를 가지고 있었으나, 시간이 지남에 따라 V3-V1, V4-V1에서는 편차가 없었다. 이러한 사유로 초기 알고리즘 구현 후 실험을 통하여 파라미터를 선정하던 중, 전압 센싱 오류가 발생하여 배터리 불균형이 검출되었고 제어기에서 영구 알람이 동작되었다.

이와 같이 실제 단위 셀의 불균형이 문제가 아닌 소프트웨어, BMS 하드웨어, 진동에 의한 센싱 접합부 흔들림 등과 같은 외부적인 이유로 검출되는 오류를 막

고자 수정 제안한 알고리즘은 그림 2의 회색 음영 부분과 같이 불균형 검출 진입 조건에서 단위 셀 전압 편차로 인한 변화율이 시간에 따라 지속성이 있는지 다중으로 검출하여 편차를 확인할 수 있도록 알고리즘 및 소프트웨어를 수정하여 적용하였다.

또한 제안된 알고리즘은 배터리 팩의 방전 조건에서만 동작하도록 구현하였다. 왜냐하면 실제 배터리 팩의 충전 상태에서는 충전 방법에 따라 불균형 전압 편차가 시간에 따라 달라진다. 이는 배터리가 충전되면서

충전 전압이 변동되는 것으로 방전 상태에서 고려하였던 전류를 나누더라도 항상 균일한 값을 적용할 수가 없었다. 다만 그림 7과 같이 250초 지점에서 EOL 모사 배터리로 충전이 인입되는 순간 단위 셀 충전 전압이 튀어 올랐으나, 시간이 지남에 따라 리튬 배터리 팩 표준 충전 조건인 정전압(constant voltage), 정전류(constant current, CC) 조건과 BMS 밸런싱 동작이 동시에 이루어진다면 수십 mV 편차는 줄일 수 있을 것으로 판단된다 [9].

3.3 파라미터 선정 및 추출 적용

직/병렬로 연결된 다수의 배터리 팩 내부의 전압이나, 용량, 저항, 연결부 접점 등과 같은 불균형 배터리를 검출하기 위하여 알고리즘을 제안하였다. 표 2는 알고리즘 정상 검출 동작을 위한 설정 파라미터이며 이는 사용자가 적용하고자 하는 다양한 응용 분야에 따라 사전 실험을 통하여 임계값을 설정하고 응용할 수 있도록 파라미터 변수를 선정하였다.

CID 검출 전류는 배터리 팩 환경에서 정격 및 최대 출력 사양을 기준으로 실제 운용되는 전류 값을 설정하여 직/병렬 연결 단위 셀들의 전압 편차를 비교 확인한다. 또한 검출 시간은 100 ms 단위로 설정하여 전압 편차를 실시간 비교할 수 있도록 구현하였다. CID 검출 최소 전압의 경우는 배터리 팩의 SOC 운용 범위에 따라 최대, 최소 전압을 고려하여 설정할 수 있으며 본 연구에서는 SOC 50% 전압을 기준으로 만충전 조건까지 고려하였다. 즉, 응용시스템이나 적용 리튬계 배터리 종류에 따라 설정할 수 있도록 구현하였다. CID 상수는 최대, 최소 전압 편차의 비정상적인 차이의 비교 값을 설정하기 위하여 선정하였으며, 병렬연결의 경우 용접이나 탭의 접촉 상황까지 고려하여 적용하였다.

CID 검출 편차 임계값은 실제 그림 5와 같이 2개 병렬 구조의 팩에서 한 bank의 셀 저항 특성이 두 배

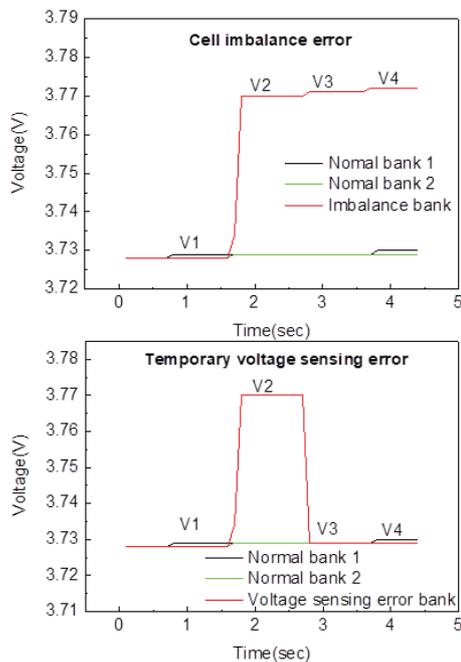


Fig. 6. Consideration of voltage sensing error.

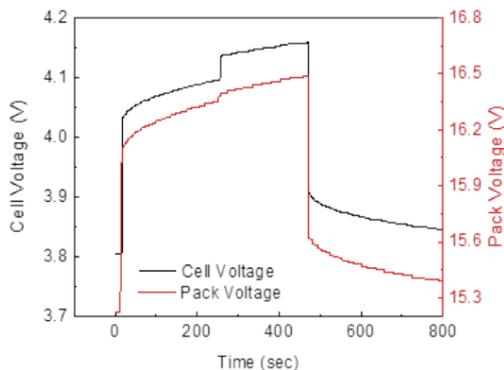


Fig. 7. Imbalanced cell profile at charge status.

Table 2. Parameters of cell imbalance detection.

Parameter	Unit	Value
CID detect current	A	1
CID detect interval time	sec	0.1
CID detect minimum voltage	mV	3,600
CID multiple factor	-	10
CID delta voltage threshold	mV/sec/A	70

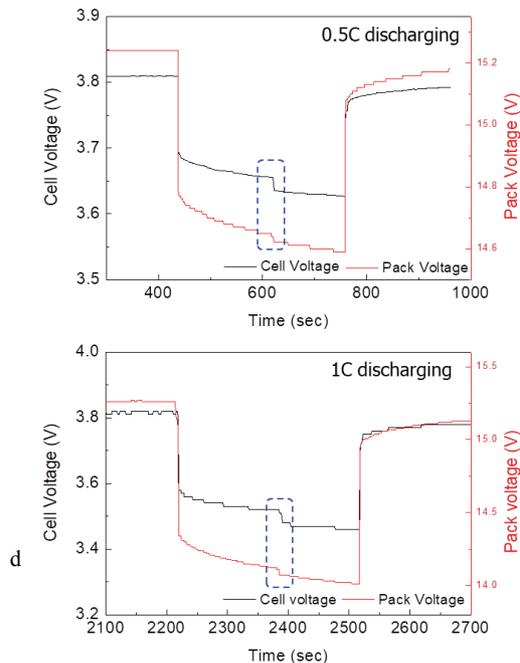


Fig. 8. Voltage profile of cell imbalance detection.

가 될 경우를 고려하고, 50% 정도의 여유분을 두고 70 mV 편차를 임계값으로 설정하였고 실험을 통한 배터리 팩의 불균형 검출 동작을 그림 8과 같이 검증하였다. 0.5 C 방전의 경우 CID 검출 편차 임계값은 100 mV이었으며, 1C 방전의 경우 75 mV로 실제 제안 알고리즘이 정상적으로 동작하는 것을 확인하였다. 이때 검출한 CID 검출 시간은 200 ms 정도였다. 이러한 임계값은 실제 사용하는 배터리 팩의 출력 특성을 고려하고 그에 따른 비정상적인 동작 조건을 가지고 설정하는 것이 다수의 직/병렬로 연결된 단위 셀들의 불균형 전압 편차를 검출할 수 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 2P4S의 원통형 배터리 팩에서 불균형 배터리로 인한 팩 출력 저하를 사전에 검출하고자

불균형 검출 알고리즘을 제안하였고 선정된 파라미터를 적용하여 구현 동작을 확인하였다. 그리고 CID 검출 진입 조건을 위하여 방전 상태의 전류 임계값 및 검출 시간을 설정함으로써 상시 동작 및 지속적인 모니터링을 할 수 있도록 구현하였다. 또한 CID 검출 전압 임계값은 배터리 팩의 C-rate별 방전에 따라 EOL 셀을 모사한 bank의 전압 특성 변화를 실험 데이터로 확인하였으며, 이는 적용하는 리튬계 배터리의 충/방전 출력 특성도 고려되어 BMS EEPROM에 저장함으로써 알고리즘이 정상적으로 동작함을 검증하였다.

REFERENCES

- [1] R. Ahmed, M. E. Sayed, I. Arasaratnam, J. Tjong, and S. Habibi, *IEEE J. Emerging Sel. Top. Power Electron.*, **2**, 678, (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2014.2331062>]
- [2] S. H. Bae, J. W. Park, and S. H. LEE, *J. Electr. Eng. Technol.*, **12**, 29 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.5370/JEET.2017.12.1.029>]
- [3] C. Duan, C. Wang, Z. Li, J. Chen, S. Wang, A. Snyder, and C. Jiang, *IEEE Trans. Transp. Electrif.*, **4**, 432 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TTE.2018.2817123>]
- [4] M. Bahramipناه, D. Torregrossa, R. Cherkaoui, and M. Paolone, *IEEE Trans. Transp. Electrif.*, **3**, 589 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TTE.2017.2739344>]
- [5] X. Zhang, W. Zhang, H. Li, and M. Zhang, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **18**, 136 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.4313/TEEM.2017.18.3.136>]
- [6] X. Hu, S. E. Li, and Y. Yang, *IEEE Trans. Transp. Electrif.*, **2**, 140 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TTE.2015.2512237>]
- [7] A. Guha and A. Patra, *IEEE Trans. Transp. Electrif.*, **4**, 135 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TTE.2017.2776558>]
- [8] Y. Cao, R. C. Kroeze, and P. T. Krein, *IEEE Trans. Transp. Electrif.*, **2**, 432 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TTE.2016.2569069>]
- [9] K. Chung, S. K. Hong, and O. K. Kwon, *IEEE Trans. Circuits Syst. II*, **64**, 161 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSII.2016.2554839>]