Regular Paper
J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.
Vol. 31, No. 6, pp. 422-426 September 2018
DOI: https://doi.org/10.4313/JKEM.2018.31.6.422
ISSN 1226-7945(Print), 2288-3258(Online)

재사용 ESS를 위한 리튬 배터리 덴드라이트 보호 알고리즘 제안

송정용, 허창수[a]
인하대학교 전기공학과

Proposal Protection Algorithm of Dendritic Lithium for Battery Second Use ESS

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

(Received April 17, 2018; Revised May 16, 2018; Accepted May 25, 2018)

Abstract: The lithium-ion battery pack of an electric vehicle (EV) deserves to be considered for an alternative use within smart-grid infrastructure. Despite the long automotive service life, EV batteries retain over 70~80% of their initial capacity. These battery packs must be managed for their reliability and safety. Therefore, a battery management system (BMS) should use specific algorithms to measure and estimate the status of the battery. Most importantly, the BMS of a grid-connected energy storage system (ESS) must ensure that the lithium-ion battery does not catch fire or explode due to an internal short from uncontrolled dendrite growth. In other words, the BMS of a lithium-ion battery pack should be capable of detecting the battery's status based on the electrochemical reaction continuously until the end of the battery's lifespan. In this paper, we propose a new protection algorithm for a dendritic lithium battery. The proposed algorithm has applied a parameter from battery pack aging results and has control power managing.

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

1. 서 론

환경 변화에 따른 전력 생태계 변화로 스마트그리드 구현을 위한 에너지 저장 장치(energy storage system, ESS)를 수명이 감소한 전기자동차 배터리로 재사용하고자 국제적 실증 사업 및 표준화가 진행 중이다 [1].

일반적으로 전기자동차 배터리는 초기 용량(beginning of life, BOL)의 20~30% 정도 용량 감소가 이루어지면 차량 구동을 위한 에너지원으로 수명이 다 된 것으로 판단한다. 이와 같은 배터리는 내부 저항 열화로 충전시간 증가 및 동일 부하 조건에서 BOL 대비 방전 전류 증가 등의 영향이 있으므로 전력 시스템의 수요 반응 예비력, 주파수조정, 비상발전기 대체, 신재생에너지의 불규칙 출력보정 등과 같은 응용 분야별 충/방전 출력 특성에 적합한 ESS를 고려해야 한다.

이를 위한 재사용 배터리 재평가 기준을 통한 신뢰성 확보가 필요하며 안전성을 고려한 배터리 관리 장치(battery management system, BMS) 보호 기능을 탑재해야 한다. 리튬계 배터리를 사용하는 BMS는 상시 모니터링하고 있는 배터리의 전압, 전류, 온도를 고려하여 과충전, 과방전, 과온, 단락 등을 보호하며 보호 레벨은 응용하는 분야 및 사용 잔존 용량(state of charge, SOC)의 범위에 따라 달리 적용한다.

전기차 배터리의 경우 높은 에너지 밀도를 위하여 리튬 금속과 같은 고용량 음극재를 사용하는데 이는 리튬 전극 표면에 석출되어 생기는 수지상 결정(dendrite)의 안전성을 확보해야 한다. 수명에 따른 충/방전 주기 동안 내부 열화로 리튬 덴드라이트는 다공성 표면 형상을 가지고 있고 이는 리튬 표면에 생성된 피막 고체 전해

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

Copyright ©2018 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.

질 계면(solid electrolyte interphase, SEI) 저항의 크기에 영향을 준다. 이러한 저항은 배터리 시스템의 출력을 저해하고 나아가서 안전성에 문제를 야기한다 [2].

본 논문에서는 최초 사용에 따른 배터리 팩의 열화 정도를 감지하고 시간에 따라 나뭇가지처럼 자라날 수 있는 다공성 리튬 덴드라이트 석출을 사전에 예측 감지하여, 분리막을 뚫고 다른 전극까지 확산하여 매크로 한 배터리 내부 단락 및 발연, 발화, 열폭주, 폭발을 사전에 방지하여 재산이나 인명 상에 손해를 보지 않도록 보호 알고리즘을 제안한다.

2. 실험 방법

전기자동차 배터리 팩 용량은 차량 구동시스템의 트랙션 모터 및 인버터 사양, 12 V 전장품 부하를 고려하여 결정한다. 결정된 팩 용량은 단위 셀들을 직병렬로 연결하여 단위 모듈을 구성하고 이러한 모듈들을 연결하여 배터리 팩으로 제작한다.

그림 1은 전기자동차 배터리 팩을 구성하고 있는 기본 단위 모듈을 모사하여 모델링하였고 모듈 내부는 테슬라 전기자동차에서 양산 적용하는 동일 사이즈의 18650 리튬이온 배터리를 적용하였다. 단위 셀 간 연결은 니켈 플레이트를 가지고 스팟 용접을 하였으며 온도 센싱을 위한 써미스터로 구성하였다.

Fig. 1. Battery module design. (a) Module modeling and (b) spot welding point.

2.1 배터리 모듈 제작

실험 샘플 제작을 위하여 표 1과 같이 배터리 단위 모듈은 3P13S로 기본 구성하였으며, 직렬 연결한 각각의 셀 전압, 모듈 온도, 전류를 실시간 모니터링할 수 있도록 Texas Instrument사의 bq76L455A 배터리 관리 IC와 마이컴으로 구성하였다. 또한 실시간 전압 변동을 보기 위하여 TI사 GUI를 활용하였다. 제작한 샘플은 그림 2와 같다.

Table 1. Specification of the battery module.

Classification	Unit	Value
Cell	Type	Cylindrical, 18650
Array	Series and parallel	3P13S
Nominal voltage	V	46.8
Pack capacity	Wh	351
Operating temperature	℃	0 to 50 (charge)
		-20 to 75 (discharge)
Voltage sensing	ch	13
Current sensing	ch	1
Temperature sensing	ch	2

Fig. 2. Battery module and GUI (graphical user interface).

2.2 배터리 관리 장치 설계

산화, 환원 반응을 기반으로 하는 리튬계 배터리는 그 성능 및 안전성이 비선형적인 특성을 가지고 있어, 실시간 배터리 상태를 모니터링하고 적절한 관리가 필요하다. 이를 위하여 BMS는 그림 3과 같이 셀 전압, 전류, 온도를 측정하는 하드웨어와 측정된 모니터링 값을 연산하고 이에 따라 적절한 제어를 하는 소프트웨어 및 알고리즘으로 구성되어 있다.

본 연구에서는 BMS의 다양한 기능에서 리튬 배터리의 안전성에 초점을 두고자 한다. 특히 장기간 사용하여 수명을 다한 리튬계 전기자동차 배터리를 재사용하는 ESS 제품에서 덴드라이트와 같은 전기 화학적 변화를 사전에 감지하여 발화나 폭발로 이어지는 문제를 사전에 방지하고자 한다 [3].

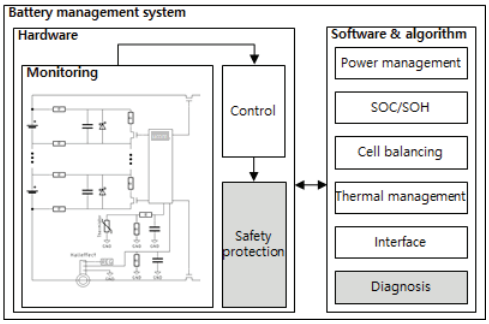

Fig. 3. Block diagram of BMS (battery management system).

2.3 리튬 배터리 덴드라이트 감지 알고리즘

리튬 배터리 덴드라이트는 비균일한 다공성층으로 성장하여 전해질이 소모되면서 형성되는데 이는 저항의 크기에 영향을 준다. 이러한 특성은 초기 SEI 저항 성분 대비 증가됨을 알 수 있기 때문에 BMS는 이러한 전기 화학적 특성을 고려하여 적용한 BMS 안전제어 알고리즘을 구현하였다 [4].

수명이 종료된 전기차 배터리의 경우 충/방전 이력이 사용 환경에 따라 다르기 때문에 내부 단위 셀들의 열화 정도가 균일하지 못하다. 또한 미세한 덴드라이트 형성이 진행되는 경우 전체 배터리 팩의 충/방전 효율이 낮아지며, 단위 셀 단위의 자가 방전율이 높아지고 비정상적인 상태의 덴드라이트 형성이 이루어지면 분리막을 뚫고 내부 쇼트까지 진화될 수 있다.

따라서 그림 4 순서도와 같이 OCV (open circuit voltage) 구간에서 배터리의 전압 편차를 실시간으로 모니터링하고 BMS EEPROM에 이력을 저장하며, 장시간 측정 데이터를 가지고 리튬 배터리의 비정상적인 전압 감소 현상을 감지하도록 알고리즘을 제안하였다. 표 2에서와 같이 리튬 배터리의 충/방전 동작 이후 전기화학적 안정화 시간을 고려하여 OCV 진입 조건을 1 mA 미만에서 30분 동안 유지하도록 설정하였다. 그리고 리튬 배터리의 만충전과 만방전의 전압 편차가 상대적으로 안정적인 구간 및 저전압 영역을 선택하여 자가방전율의 편차의 정확도를 높일 수 있도록 설정하였다. 또한 배터리 모듈에서 정상적인 미소 부하의 방전 편차를 제외하고자 최대 전압과 최소 전압의 비율을 고려하여 파라미터를 설정하였다 [5].

제안한 알고리즘의 파라미터는 배터리 팩을 재사용하는 응용분야 및 단위 셀의 전기화학적 특성을 고려하고 최초 사용에 대한 이력 및 특성치를 참고하여 사용자가 설정할 수 있도록 제안하였다.

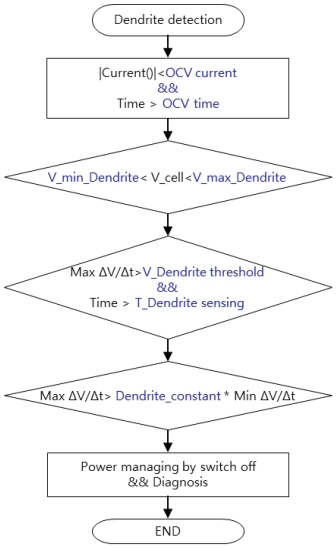

Fig. 4. Flow chart for dendrite detection algorithm.

Table 2. Parameter for dendrite detection.

Parameter	Unit	Value
OCV current	mA	1
OCV time	min	30
T_dendrite sensing	hr	5
V_max_dendrite	mV	3,900
V_min_dendrite	mV	1,000
V_dendrite threshold	mv	500
Dendrite constant	-	5

3. 결과 및 고찰

3.1 배터리 모듈 열화

일반적인 리튬계 전기차 배터리 팩의 경우 급속 충전 및 완속 충전 두 가지 방식으로 충전을 하는데 충전 전압, 전류는 적용된 배터리 팩 사양에 따른다. 방전 역시 차량 구동 전력 사양과 전장품 전원 공급 전력에 따라 다르다. 또한 사용자의 환경에 따라 배터리 팩 충/방전 전력은 모두 다양하다. 이러한 전기차 배터리 팩의 충/방전 열화 현상을 모사하기 위하여, 본 연구 시험 샘플은 그림 5와 같이 정전압(constant voltage) 및 정전류(constant current) 충전, 대전류 펄스(pulse) 방전으로 가속 열화 충/방전 패턴을 인가하였다. 상온 상습 조건하에서, 충전은 4 A (1.875 C-rate), 방전은 1초 동안 60 A (8 C-rate) 방전 및 휴지 9초 패턴으로 시험하였다. 배터리 모듈 시험 전, 단위 셀의 가속 열화

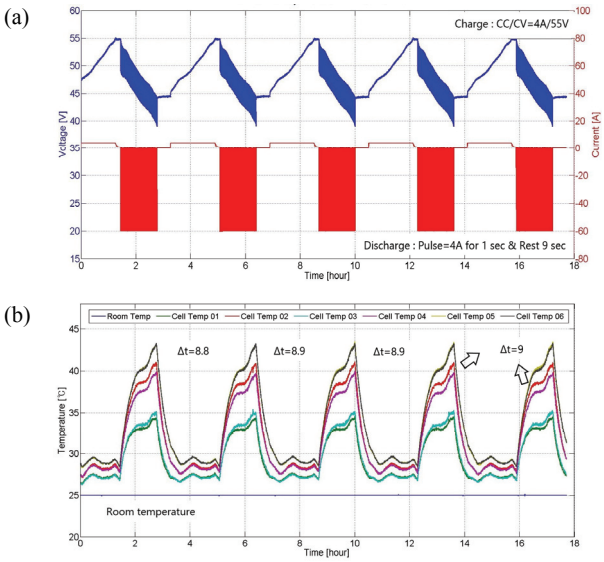

Fig. 5. Accelerated deterioration charge and discharge pattern. (a) Constant current & constant voltage charge, pulse discharge & rest time (charge and discharge test profile) and (b) degradation condition by temperature difference (temperature difference in battery module).

조건을 고려하기 위하여 15 A (6 C-rate)까지 정전류 연속방전을 하였으나 1회 충/방전 싸이클만으로도 배터리 온도가 57℃까지 도달하였다. 모듈 시험 시 단위 셀 조건은 시험 안전성 문제로 제외하였고 상기에서 제안한 정전압, 정전류 충전 및 대전류 펄스방전을 통하여 셀 온도 편차를 열화 조건으로 고려하였다.

시험 샘플은 냉각을 고려한 전장 설계를 고려하지 않았기 때문에 1초 (9초 휴지) 대전류 펄스 방전을 반복할 때마다 모듈 내 셀 간 최대 편차가 대략 9℃로 측정되었고, 이 온도 편차를 이용한 열화 인자를 고려하고자 하였다. 또한 셀 간 편차를 지속적으로 유도하기 위하여 BMS의 밸런싱 기능은 미동작 상태로 시험을 진행하였다.

3.2 리튬 배터리 덴드라이트 모사 전압 편차

100회 충/방전 싸이클 이후 직렬로 연결된 배터리 모듈 어레이에서 특정 직렬 연결부 3개 셀 전압 거동이 나머지 직렬 연결부보다 빠르게 움직임을 확인할 수 있었다. 이는 특정 단위 셀 내부 저항 값이 변동되었음을 확인할 수 있었으며, 지속적인 충/방전 시 모듈의 과충전이나 과방전 전압 레벨까지 빠르게 도달됨을 확인할 수 있었다. 나아가 이러한 비정상적인 충/방전은 잠재적인 덴드라이트 현상을 유발할 수 있음을 확인하였다.

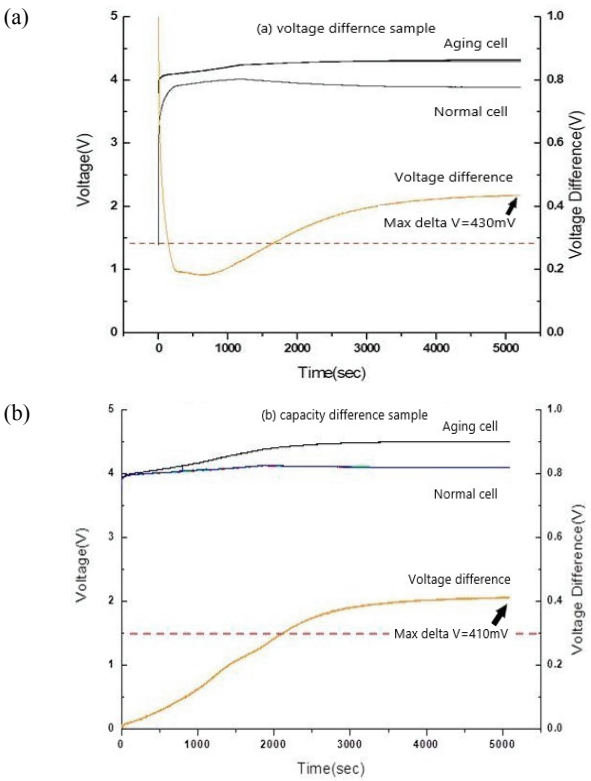

Fig. 6. Differences voltage and capacity in charge mode after aging process. (a) Voltage difference sample in module and (b) capacity difference sample in module.

따라서 배터리 모듈 내부 직병렬로 용접된 셀들을 분해하여 확인한 결과, 3개가 병렬로 연결된 셀들 중에서 단위 셀 하나가 정상적인 셀들 대비 최대 전압 편차는 485 mV이었으며, 최대 용량 편차는 3% 미만을 나타내었다.

그림 6은 각 최대 전압 편차 및 최대 용량 편차 샘플을 가지고 정상적인 셀과 직렬 연결하여 표준 충전 조건에서 만충전까지의 시간을 충분히 두고 각각의 전압 편차를 확인하였다. 최대 전압 편차 샘플들의 경우 만방전 상태에서 충전 시 CC모드에서는 190~300 mV 편차를 유지하다가, CV모드에서는 300~430 mV 편차를 유지하였다. 또한 최대 용량 편차 샘플들의 경우 CC모드에서는 최대 380 mV까지 편차를 보였으며, CV 모드에서는 410 mV 편차를 유지하였다. 본 논문에서 제안한 열화 조건을 고려할 때, 배터리 팩 내부 셀 간 편차는 최대 430 mV로 확인할 수 있었다. 그리고 두 개 셀의 표준 충/방전 조건에서 제안한 알고리즘 파라미터의 덴드라이트 최대 전압인 3.9 V 영역까지 확인하고자 셀당 4 V 영역까지 충분히 충전시간을 두고 최

대 편차를 확인하였다. 또한 제안한 알고리즘 진입 조건에 1 mA 이하로 30분 동안의 무부하 상태를 두었기 때문에 정전류 충전 전류를 흘렸을 때의 전압 편차를 최댓값으로 고려하여도 문제가 없음을 확인할 수 있었다. 또한 알고리즘에 적용한 dendrite threshold 전압 파라미터 값의 선정은 최대 430 mV보다 큰 값을 적용할 수 있음을 확인하였고, 무부하 진입 조건도 사용자의 환경에 따라 설정할 수 있음을 알 수 있었다. 즉 적용 시스템의 운영 조건을 고려하여 열화 조건에 맞도록 사전 시험 결과에 따라 파라미터 선정 및 적용이 필요함을 확인하였다.

방전 상태의 경우는 사용 조건의 방전 전류의 양에 따라 전압 편차가 달라지므로 파라미터 변수 선정에는 적합하지 않음을 확인하였다.

3.3 알고리즘 동작 확인

그림 7은 알고리즘 정상 동작을 확인하기 위하여 열화된 배터리 모듈 내부 단위 특정 셀 한 개가 1.3 V 이하인 저전압 대역에서 미세한 다공성 덴드라이트를 형성한다고 보았을 때, 장기 감지 시간을 65초로 줄여서 팩 출력 제어를 하도록 모사하여 확인하였다. 출력단 파워 FET의 차단에 따라 모듈 출력이 떨어졌다가 5초 유지 후 재기동하도록 구현되었고, 이는 상위제어기에 alarm을 보내어 출력을 디레이팅할 수 있도록 협조 제어 알고리즘 구현을 제안하였다.

제안한 리튬 배터리 덴드라이트 보호 알고리즘 구현을 위하여 BMS는 최종 모니터링 전압과 재기동 시 모니터링하는 최초 전압을 상시 비교하여야 하며, 마이컴 동작 모드별로 최종 모니터링 데이터를 반드시 EEPROM에 저장하여야 한다. 또한 알고리즘에 적용한 파라미터 값들은 재사용하고자 하는 응용 분야의 특성에 맞도록 파라미터들을 선정하여 적용할 수 있도록 구현하였다.

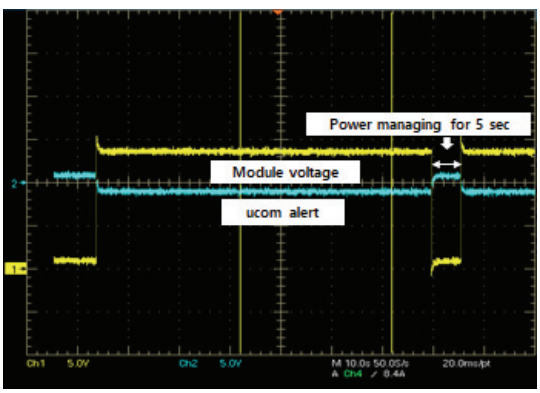

Fig. 7. Experiment of implemented algorithm operating.

이와 같이 전기자동차 배터리를 재사용하는 경우, 배터리 상태 이력 정보는 재사용하는 ESS가 적용되는 전력 시스템의 분류에 적합하도록 신뢰성과 안전성을 예측할 수 있는 중요한 데이터가 되기 때문에 BMS는 이를 저장하고 관리할 수 있도록 구현하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 전기자동차 배터리를 재사용하는 ESS의 안전성을 고려하고자 리튬 배터리 덴드라이트 보호 알고리즘의 타당성을 검증하고 모사 시험을 통하여 구현 동작을 확인하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

직병렬로 연결된 배터리 팩에서는 냉각 편차와 같은 원인으로 단위 셀 간 열화도가 균일하지 않으며, 특정 셀의 열화가 지속적으로 집중됨을 알 수 있었다. 이러한 배터리 팩을 ESS에 재사용하고자 할 경우, 셀 내부 잠재적인 덴드라이트 현상을 사전에 감지하여 내부 단락의 위험성을 피할 수 있도록 제안한 알고리즘을 통하여 검증할 수 있었다. 또 덴드라이트가 형성되지 않는 최대 안전 전압 편차를 고려하기 위하여 열화된 배터리 모듈의 단위 셀 전압 및 용량 편차를 기반으로 제안한 알고리즘 파라미터를 선정하였고 유효성을 확인하였다. 즉 내부 단락 위험성을 사전 감지하므로 배터리 팩의 전력을 제어할 수 있으며, 이는 배터리가 발화 및 폭발로 전개되지 않도록 내부 전기화학 반응을 감지할 수 있을 것으로 사료된다.

REFERENCES

[1] IEC62619 Edition 1.0, IEC 62485-1 Edition 1.0, IEC 62485-2 Edition 1.0, IEC 62485-3 Edition 2.0.

[2] C. M. López, J. T. Vaughey, and D. W. Dees, *J. Electrochem. Soc.*, **159**, A873 (2012). [DOI: https://doi.org/10.1149/2.100206jes]

[3] 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]

[4] E. Redondo-Iglesias, P. Venet, and S. Pelissier, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, **67**, 104 (2018). [DOI: https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2751218]

[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]