

건전성 지표 기반 Hotelling t^2 을 이용한 고용량 배터리팩의 이상 탐지 기법 연구

이평연*, 박성윤*, 정호용**, 김종훈*
충남대학교*, 현대 일렉트릭**

Study on the abnormal detection method of high energy battery pack using Hotelling t^2 based health indicator

Pyeong-Yeon Lee*, Seongyun Park*, Ho-yong Jeong**, Jonghoon Kim*
Chungnam National University*, Hyundai electric**

ABSTRACT

에너지저장시스템(Energy storage system; ESS)의 장시간 운용에 따라 배터리 물리적, 화학적으로 배터리 내부 활물질의 변형이 일어나며, 배터리의 전기화학적 특성이 달라진다. 이의 특성을 반영한 배터리 팩의 운용이 필요하며, 안정적이고 장기간 사용하기 위해 배터리 팩 내부 셀 간 불균형을 반영이 필요하다. 하지만, 배터리 팩의 노화로 셀 간 불균형이 발생 시, 같은 조건에서 개별 셀의 노화도를 판단하는 것은 어렵다. 이러한 이유로 배터리 팩뿐만 아니라 개별 셀의 노화를 판단하기 위해 건전성 지표(Health indicator)를 사용한다. 건전성 지표를 사용하여 Hotelling t^2 통계량을 적용하여 배터리의 이상 신호 탐지를 수행하였다.

1. 서론

리튬이온 배터리는 높은 에너지 밀도, 낮은 자가방전, 수명이 긴 장점이 있으며, 구동 전원 및 에너지 저장의 매체로써, 전기자동차(Electric vehicle; EV), 에너지저장장치(Energy storage system; ESS), 항공, 우주의 다양한 분야에 사용되고 있다. 에너지 저장장치의 장기간 운용이 요구됨에 따라, 장기간 사용 가능한 직렬 및 병렬 조합으로 이루어진 고용량 배터리 팩의 사용이 증가하고 있다. 배터리의 장시간 사용에 따른 대용량에 대한 요구가 많아지고 있으며, 이에 따라 배터리의 성능 진단의 연구가 활발히 진행되고 있다. 에너지저장장치의 경우 다수의 배터리가 직렬 및 병렬 조합으로 연결되어있으며, 고장 및 성능 저하가 생기면, 높은 유지 비용 및 안전에 문제가 있어 배터리 관리 장치 (battery management system; BMS)의 한 부분인 PHM(prognostics and health management)^{[1],[2]}의 중요도가 증가하고 있다. 배터리의 성능을 진단하기 위해 충전상태 (state of charge; SOC), 열화 상태(state of health; SOH) 가 사용되고 있으며 특히 SOH는 배터리의 특성 저하를 추적하는 상태 표시기로 사용된다.

SOH는 대표적으로 방전용량, 내부 저항, 출력으로 정의할 수 있으며, 어플리케이션의 부하 프로 파일에서는 3가지 지표를 산출함에 어려움이 있어 노화로 인한 상태를 진단하는 건전성 지표(health indicator)의 연구가 활발히 진행되고 있다.^{[3],[4]} 건전성 지표의 열화에 대한 상관분석을 수행하여 열화를 판단 가능함을 확인하였으며, Hotelling T^2 를 통해 배터리의 이상 거동을 감지하는 기법을 제안하며, 고에너지 배터리 팩의 이상

데이터를 활용하여 이상 거동을 감지하는 기법을 검증하였다.

2. 건전성 지표 산출을 위한 전기적 특성 실험

2.1 고에너지 배터리 팩의 전기적 특성 실험

고에너지 배터리 팩의 열화에 따른 전기적 특성을 확인하기 위해 24S1P의 배터리 팩을 사용하고, 외기 온도의 영향을 제거하기 위해 항온항습챔버를 25도로 설정하였다. 배터리 팩의 열화를 확인하기 위해 전기적 특성 실험은 cycle life test로 알려진 그림 1의 프로 파일로 실험을 수행하였다. 정격 C-rate인 1/3C를 적용하여 만충과 만방이 반복되며 총 200 cycle의 전기적 특성 실험을 수행하였다. 이의 프로 파일에서 건전성 지표를 산출하였다.

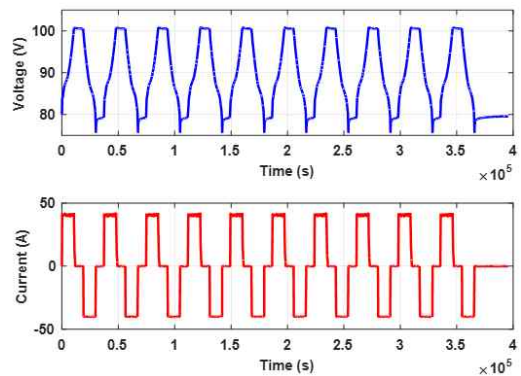


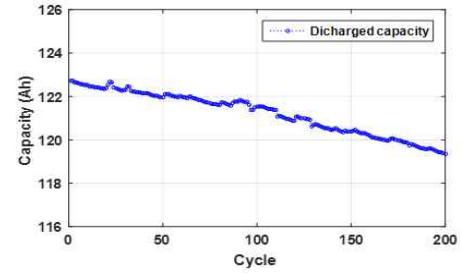
그림 1 전기적 노화 실험 프로파일
Fig. 1 Cycle life test profile

2.2 전기적 노화 실험 기반 건전성 지표 선정

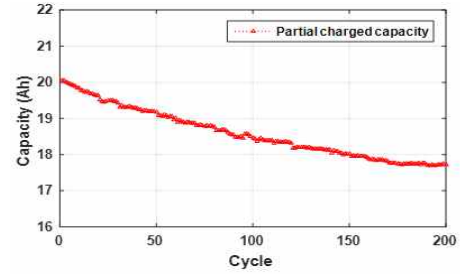
본 논문에서의 건전성 지표(health indicator)는 노화를 판단할 수 있는 지표로써 정의한다. 기존의 문헌에서는 특정 전압 사이의 시간을 건전성 지표로 사용한다. 하지만, 특정 구간에서 부하가 조금이라도 변화가 있다면, 건전성 지표는 신뢰할 수 없는 값을 나타낼 수 있다. 또한, CC(constant current), CV(constant voltage) 충전에서 용량을 산출하여 건전성 지표로 사용한다. 하지만, 이의 방법은 실제 어플리케이션에서 만방에서 만충까지 충전과 방전을 수행 해야한다는 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 운용 중인 어플리케이션에서 사용할 수 있도록 건전성 지표를 정의하였다. 첫번째 지표는 특정 전압

영역의 전류를 누적한 미소 용량으로 정의한다. 미소 용량을 정의하기 위해 단위 전압을 0.1V로 나누어 미소 용량을 산출하였다. 이는 방전용량과의 상관관계가 높은 전압 영역을 선정하고 상관분석을 수행하여, 건전성 지표의 타당성을 확보하기 위함이다. 그림 2에 상관분석을 나타낸다. 방전용량과 가장 상관관계가 큰 전압 영역은 3.6 ~ 3.7V이다. 이 영역을 건전성 지표로 사용하였다. 두 번째의 건전성 지표는 OCV(Open circuit voltage) 회복량이다. 특정 SOC에서 OCV의 회복량은 만방전했을 때의 OCV 회복량으로 정의한다. 배터리가 노화함에 따라 배터리 전극 내부로 인터칼레이션 (intercalation) 되는 양이 감소하며, 이는 노화된 배터리를 사용 시 리튬의 이동 및 전극과의 반응이 약화하기 때문에 배터리의 효율이 떨어짐을 의미한다. 또한, 배터리팩은 단위 셀과 달리 개별 셀들의 조합으로 이루어지기 때문에 셀간 전압 불균형을 필수적으로 고려가 필요하다. 셀간 전압 불균형이 심해지면 배터리 수명의 감소는 가속화되며 과충전과 과방전의 위험이 있다. 이러한 이유로 배터리팩 내부 셀들의 건전성 지표를 산출하였다. 건전성 지표로 선정된 2가지의 지표는 그림 3에 나타내었으며, 그림 4는 배터리팩 내부 셀들의 건전성 지표를 나타낸다. 배터리팩이 노화함에 따라 각 단위 셀의 건전성 지표가 다른 값을 가지고 있으며, 배터리 팩 내부 노화의 정도가 다를 수 있음을 의미한다.

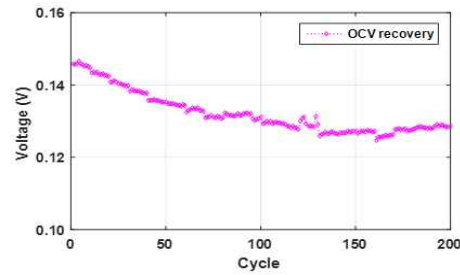
그림 4의 (b)는 배터리 팩 내부 단위 셀의 이상 현상을 확인할 수 있다. 24개의 단위 셀 중 11번 셀이 131번째 cycle부터 OCV의 회복량이 증가하며, 만방에서 단위 셀 최대 전압과 0.1V 이상 차이가 있음을 확인하였다. 배터리 팩에서 내부의 전압 불균형을 모니터링이 가능한 지표이며, 이상 탐지를 위한 인자로서도 사용 가능할 것으로 판단된다.



(a)



(b)



(c)

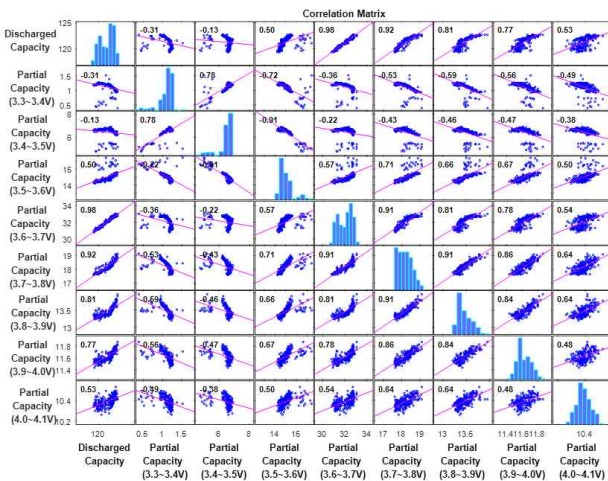


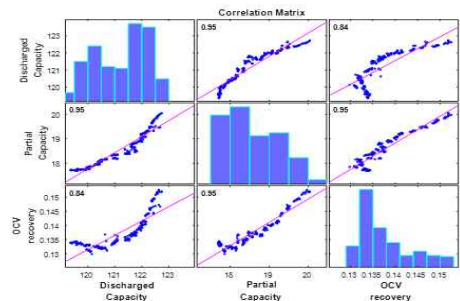
그림 2 전압별 충전 미소 용량

Fig. 2 Partial capacity by voltage range

3. Hotelling T²를 적용한 이상 탐지

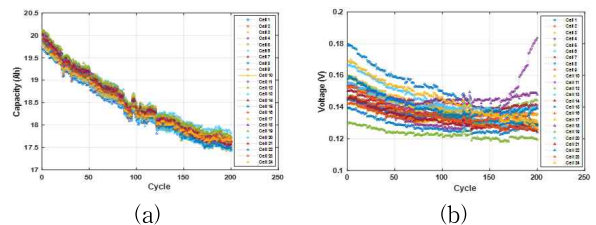
3.1 건전성 지표 기반 이상탐지를 위한 Hotelling T²

Hotelling T²은 다변량 통계 방법 중 하나로서, 다변량 통계 기법은 집목하는 변수들이 서로 높은 상관관계를 가지고 있을 경우 성능이 증가한다. 하나의 센서에서 측정되는 다양한 변수들을 동시에 고려하여 이상 거동을 판단하는 방법이다.



(d)

그림 3 선정된 건전성 지표와 상관 분석 결과 (a) 방전 용량, (b) 미소용량, (c) OCV 회복량, (d) 상관분석
Fig. 3 Health indicator and correlation analysis; (a) Discharged capacity, (b) Partial capacity, (c) OCV recovery, (d) Correlation analysis



(a)

(b)

그림 4 배터리팩 내 셀간 미소 용량 및 OCV 회복량
Fig. 4 Partial capacity and OCV recovery among cells in battery pack.

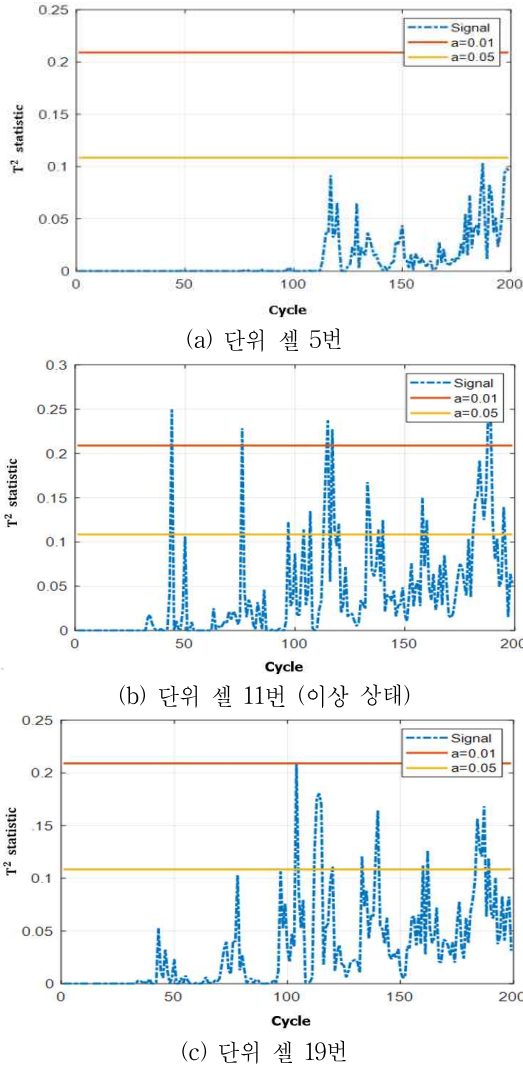


그림 5 배터리팩 내부 이상 단위 셀 판단 (Hotelling T^2)
Fig. 5 Determination of abnormal unit cell in the battery pack (Hotelling T^2)

관측값이 데이터 축의 분산에서 얼마나 떨어져 있는지 측정하는 방법으로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 변량 간 상관관계를 고려한 마할라노비스 거리(Mahalanobis distance)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (1)의 T^2 통계량을 산출하여 모니터링을 수행한다. T^2 의 통계량이 관리한계선을 넘게 되면 이상 상태의 값으로 간주하게 된다. p 는 변량을 의미하며, m 은 관측값의 개수, x_i 는 개별 관측값, S^{-1} 은 정상 데이터들의 표본 공분산의 역행렬을 의미한다. 식 (2)는 상한 관리 한계선(upper control limit; UCL)을 설정하는 수식으로, 관측치의 T^2 통계량이 상한 관리한계선보다 큰 경우 이상 상태로 판단한다. F 는 F 분포, α 는 유의수준을 나타낸다.

$$T^2 = (x_i - \bar{x})^T S^{-1} (x_i - \bar{x}) \quad (1)$$

$$UCL = \frac{p(m+1)(m-1)}{m(m-p)} F_{\alpha, p, m-p} \quad (2)$$

본 논문에서는 고에너지 배터리 팩에서 선정된 2개의 건전성 지표를 사용하고 Hotelling T^2 통계량을 적용하여 상한 관

리한계선을 넘는 값을 이상치로 판단하였다. Hotelling T^2 통계량의 상한 관리한계선의 $\alpha=0.05$ 는 신뢰구간 95%, $\alpha=0.01$ 은 신뢰구간 99%로 정의된다. 배터리 팩 내부 단위 셀에 대한 건전성 지표의 이상 탐지를 수행하였으며, 그림 5에 나타내었다. 그림 5의 (a)는 정상 상태의 단위 셀에서의 T^2 통계량을 의미하며, 계산된 UCL에 따라 이상 상태를 탐지한다. 단위 셀 11번은 미소 용량과 OCV 회복량의 cycle별 변화가 큼을 의미하며, 정상인 단위 셀 대비 T^2 통계량이 큰 차이를 보인다. 또한, T^2 통계량은 증가하고 있는 경향을 보이며, 추후 더 많은 cycle의 노화 시험이 진행된다면, 신뢰구간 99%를 넘어 이상 상태로써 판단되는 부분이 많아질 것으로 예상된다. 단위 셀 19번은 신뢰구간 95%로 이상 상태를 탐지하면 이상 상태인 부분이 많이 생기지만, 신뢰구간 99%라면, 정상인 셀로 판단할 수 있다. 이러한 이유로 배터리의 특성에 맞게 유의 확률의 설정이 필요하다.

4. 결론

고에너지 배터리 팩의 열화 특성을 반영하기 위해 건전성 지표를 사용하여 배터리 팩 뿐만 아니라 내부 단위 셀의 영향을 분석하였다. 또한, 건전성 지표를 사용하여 배터리 셀의 이상 현상을 탐지하기 위해 Hotelling T^2 통계량을 적용하였으며, 배터리의 특성에 맞는 적절한 유의 확률(α)의 선정이 필요하며, 실제 이상이 있는 고에너지 배터리 팩을 사용하여 제안한 방법을 검증하였다.

이 논문은 현대일렉트릭엔에너지시스템의 연구비를 지원받아 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] Huixing Meng et. Al, "A review on prognostics and health management (PHM) methods of lithium ion batteries," Renewable and Sustainable Energy Review, Col. 116, 109405, 2019
- [2] Seyed Mohammad Rezvanizani et Al, "Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility," Journal of Power Source, Vol. 256, pp. 110-124, 2014, June.
- [3] Seyed Mohammad Rezvanizani et Al, "Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility", Journal of Power Source, Vol. 321, pp. 1-10, 2016, June.
- [4] Yongquan Sun et Al, "Remaining useful life prediction for lithium-ion batteries based on an integrated health indicator," Microelectronics Reliability, pp. 1189-1194, 2018, September.
- [5] Dong Zhou et Al, "On-Line Remaining Useful Life Prediction of Lithium-Ion Batteries Based on the Optimized Gray Model GM(1,1)," Batteries, 3(3), 2017.