

보정된 개방전압 히스테리시스 기반 LiFePO₄ 배터리의 SOH 비교

이동윤*, 김종훈*, 이성준**

충남대학교 전기공학과*, 조선대학교 기계시스템미래자동차공학부**

SOH comparison of a LiFePO₄ Cell based on Modified OCV Hysteresis Curve

D. Y. Lee*, J. H. Kim*, S. J. Lee**

Department of Electrical Engineering, Chungnam National University*

School of Mechanical System & Automotive Engineering, Chosun University**

ABSTRACT

다른 리튬계열 전지와 달리, 인산철(LiFePO₄) 배터리는 중간 동작 영역에서 개방전압(OCV; open circuit voltage)의 히스테리시스(hysteresis) 영역이 존재한다. 그러므로, 인산철 배터리 관리시스템, 특히 충전상태(SOC; state of charge)와 수명상태(SOH; state of health)의 정확한 모니터링을 위해서는 OCV의 정밀성이 요구된다. 본 논문에서는, 충전 및 방전 OCV SOC의 SOC 간격에 따른 인산철 배터리의 SOH를 비교하기 위해 전기적 등가회로 모델(ECM; electrical circuit modeling)적응제어 알고리즘 기반 실시간 내부저항(DCIR; direct current internal resistance)을 모니터링 하였다.

1. 서 론

환경오염을 억제하기 위한 신재생에너지의 연구가 활발히 진행되고 있으며, 효율적 운용을 위해 이를 저장 및 사용할 수 있는 리튬계열 배터리의 관심도 나날이 증가하고 있다. 전기자동차(EV)와 에너지 저장장치(ESS)의 핵심 요소로서, 리튬계열 배터리의 위상은 더욱 높아지고 있다. 이 중, 인산철(LiFePO₄) 배터리는 높은 에너지 밀도, 고출력 및 폭발/발화이 문제를 해결하여 주목받는 리튬계열 배터리 중 하나이다[1][2].

여느 리튬계열 배터리와 마찬가지로, 인산철 배터리의 운용 효율성을 위한 관리시스템(BMS; battery management system)이 필수적이며, 이 중 충전상태(SOC; state of charge)와 수명상태(SOH; state of health)의 모니터링이 중요 이슈이다. 하지만, 다른 리튬계열 배터리와 달리 인산철 배터리의 경우 중간 동작영역에서 내부의 히스테리시스(hysteresis) 특성이 존재하며, 이는 기존 배터리 관리시스템의 조정이 불가피하다. 특히, 개방전압(OCV; open circuit voltage)와 SOC 관계(OCV SOC)에 의존적인 SOC/SOH 추정알고리즘의 경우 이러한 히스테리시스 특성은 모니터링 에러의 증가를 야기하므로, 이를 해결하기 위한 연구가 요구된다[3][4]. 즉, OCV SOC 관계의 재조정(방전/충전, SOC 간격 등)을 통해 알고리즘의 추정성능 및 신뢰성이 보장되어야 한다.

본 논문에서는, 기존에 사용되던 방전커브와 SOC 10% 간격 기반의 OCV SOC를 4가지 경우(방전 및 충전커브, SOC 5% 및 10% 간격)로 나누고 전기적 등가회로 모델(ECM; electrical circuit modeling) 기반 적응제어(본 논문에서는 슬라이딩 모드 제어(SMO; sliding mode observer)[5]를 적용하였음)를 적용한 SOH 모니터링 결과를 서로 비교하였다.

2. 실험 환경



그림 1 14Ah 인산철(LiFePO₄) 배터리 실험 환경

본 논문에서 사용되는 인산철 배터리는 14Ah의 정격용량 표준전압 3.2V 및 2.0 3.65V의 동작 범위를 가진다(상온 25°C 인). 앞의 서론에서 언급한 4가지 경우에서의 OCV SOC 관계를 얻기 위한 충전 및 방전실험이 수행되었다. 그림 1은 14Ah 인산철 배터리의 실험 환경을 나타낸 것으로서, 충방전기와 챔버 등 다양한 장비로 구성되어 있다.

3. 연구결과 및 분석

인산철 배터리의 OCV 히스테리시스 특성을 분석하고, 조정된 OCV SOC 관계를 알고리즘에 반영하기 위한 여러 실험 및 데이터 분석을 진행하였다. 방전/충전조건 및 SOC 5%/10% 간격에 따른 다양한 OCV SOC 관계를 확보하였다. 방전용량과 충전용량을 토대로 OCV가 얻어지므로, C rate별 방전 및 충전 용량 측정이 선행되어야 한다(본 논문은 1C 적용).

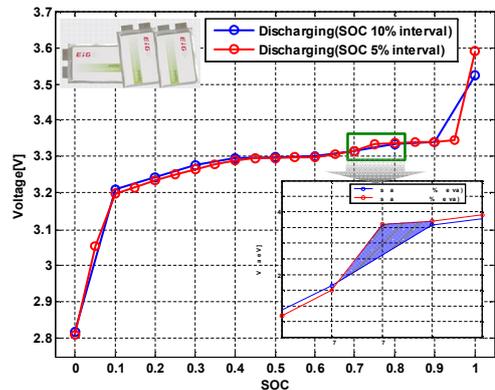


그림 2 14Ah 인산철 배터리의 방전 OCV(SOC 5%/10% 간격)[6]

4가지 OCV SOC 관계 중, 그림 3은 방전용량 기반의 SOC 5%/10% 간격에 따른 OCV SOC를 나타낸다[6]. 낮은 SOC 영역과 높은 SOC 영역을 제외하고 중간 SOC 영역에서 히스테리시스 특성이 있음을 확인할 수 있다. 특별히, 낮은 SOC 영역에서는 SOC 간격에 상관없이 유사한 OCV SOC를 얻게 되나, 높은 SOC 영역의 경우 SOC 5% 간격 시 SOC 10 95%에서 히스테리시스를 확인할 수 있다. 반대로 SOC 10% 간격 시 SOC 10 90%의 히스테리시스가 존재하며, 이는 높은 영역에서 OCV SOC 차이로 인한 모델링과 알고리즘 추정에러의 원인이 될 수 있다. 추가로, SOC 70 80% 영역에서 OCV의 차이를 볼 수 있는데, 앞에서 언급한 높은 SOC 영역의 경우 확인한 차이가 있지만, 이 영역에서는 그리 크지 않다. 하지만, 이런 작은 OCV 차이도 SOC/SOH 모니터링 성능 저하를 야기한다.

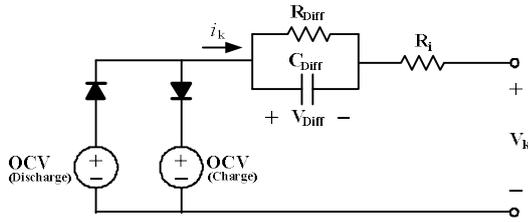


그림 3 14Ah 인산철 배터리의 전기적 등가회로 모델(ECM)[6]

충전용량과 방전용량 기반의 각 OCV 커브는 모두 히스테리시스 특성을 나타내며, 두 커브의 차이에 따라 전기적 등가회로 모델에 두 OCV를 고려할 수 있다. 충전과 방전전류의 방향이 서로 다를 때 착안하여 OCV에 다이오드를 연결한 전기적 등가회로 모델을 완성한다[6]. 내부 직렬저항이나 RC ladder는 동일하게 사용하며, 전류에 따른 배터리 전압의 하강/상승으로 내부 DCIR(direct current internal resistance)을 측정한다.

8A 8A의 최대값을 가지는 충전/방전 전류를 인산철 배터리에 적용했을 때의 충방전 전압을 그림 4에 나타내었다. 전기적 등가회로 모델의 단자전압과 그림 4의 실제 측정전압과의 차이를 비교하여 모델 에러를 확인할 수 있으며, 이는 곧 추정 알고리즘의 정확성과 관련이 있다. 앞에서 언급한 OCV SOC의 상이함으로 인해 전기적 등가회로 모델의 단자전압과 추정 알고리즘의 정확성이 달라진다. 추가적으로, 방전 혹은 충전 시작 전의 OCV의 상이함으로 내부 DCIR 성분도 다르다. DCIR 정보가 배터리의 SOH와 연결되는 만큼, 본 논문에서 DCIR 성분의 모니터링을 통해 SOH를 예측할 수 있다. 본 논문에서는 SOH 모니터링을 위해 적용제어의 하나인 슬라이딩 모드 제어(SMO; sliding mode observer)[5]를 사용하였다. 확장칼만필터(EKF; extended Kalman filter)와 마찬가지로 실제 측정전압과 모델기반 추정전압과의 차이를 줄여나가는 방식으로서, 기본적인 식의 형태는 유사하다. 그림 5는 네 경우(①; SOC 5% 간격을 적용한 방전/충전 OCV, ②; SOC 10% 간격을 적용한 방전/충전 OCV, ③; SOC 10% 간격을 적용한 방전 OCV, ④; SOC 10% 간격을 적용하되 OCV 히스테리시스 고려하지 않음)에서의 DCIR 값을 서로 비교하였다. 그림 5에서 파란 음영이 칠해 있는 부분은 실제 오프라인 DCIR 값을 측정하였을 때의 결과 범위이다. ④의 경우, 실제 오프라인 DCIR 값과의 일치성이 떨어지며, ③의 경우, ④보다 오프라인 DCIR 값과 일치하나, 값의 변동이 충방전 영역에서 심함을 볼 수 있다. ①과 ②를 비교하였을 때, OCV SOC의 SOC 간격에 따라 오프라인 DCIR 값과의 일치성 및 모니터링 값과의 변동을 볼 수 있다. 더불어, ②와 ③을 비교 시(동일 SOC 간격 적용, 충전/방전 히스테리

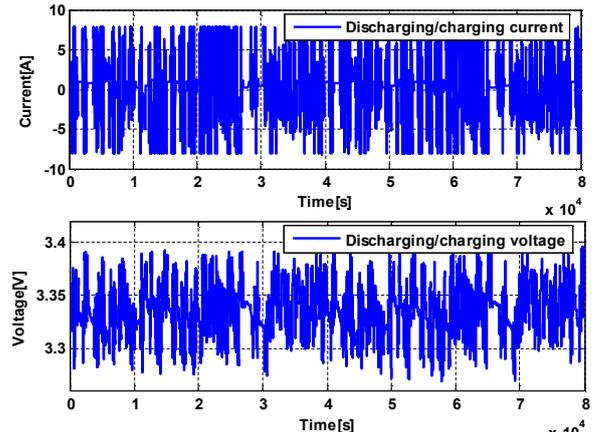


그림 4 인산철 배터리의 SOH 모니터링을 위한 충방전 전류프로파일(-8A-8A) 및 해당 전압데이터[6]

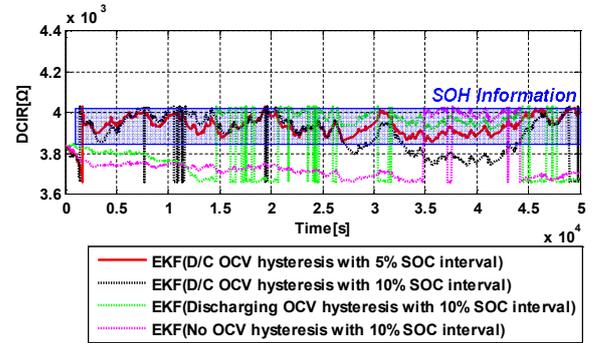


그림 5 인산철 배터리의 SOH 모니터링 결과(충전/방전타입 및 OCV-SOC내 SOC 간격 고려)

시스를 모두 고려한 OCV 사용 시, SOH 모니터링 결과가 더 정확함을 확인할 수 있다. 결국, 그림 5의 결과를 종합하면 다음과 같다. 첫째, 충전/방전 히스테리시스를 모두 고려한 OCV 적용 시, OCV SOC내 SOC 간격이 작을수록 DCIR(SOH) 모니터링 결과가 우수하다. 둘째, OCV SOC내 SOC 간격이 동일할 때, 충전/방전의 히스테리시스를 모두 고려한 DCIR(SOH) 모니터링 결과가 우수하다.

4. 결 론

본 논문에서는, 충전/방전타입 및 OCV SOC의 SOC 간격에 따른 인산철 배터리의 SOH를 비교하기 위해 전기적 등가회로 모델 및 적용제어 알고리즘 기반 내부저항을 모니터링 하였다.

이 논문은 2017년 미래창조과학부와 한국연구재단의 우주핵심기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF 2017M1A3A4A03025124)

참 고 문 헌

[1] M. Coleman, C. H. Lee, C. Zhu, and W. G. Hurley, "State-of-Charge Determination From Voltage Estimation: Using Impedance, Terminal Voltage and Current for Lead-Acid and Lithium-ion Batteries,"
 [2] Y. Zhang, C.-Y. Wang, and X. Tang, "Cycling degradation of an automotive LiFePO₄ lithium-ion battery," *Journal of Power Sources*, vol. 196, pp. 1513-1520, Feb. 2011.
 [3] M. A. Roscher, J. Assfalg, and O. S. Bohlen, "Detection of Utilizable Capacity Deterioration in Battery Systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 1, pp. 98-103, Jan. 2011.
 [4] Y. Zhang, C.-Y. Wang, and X. Tang, "Cycling degradation of an automotive LiFePO₄ lithium-ion battery," *J. Power Sources*, vol. 196, pp. 1513-1520, Feb. 2011.
 [5] F. A. Inthamoussou, R. J. Mantz, and H. D. Battista, "Flexible power control of fuel cells using sliding mode techniques," *J. Power Sources*, vol. 205, pp. 281 - 289, May. 2012.
 [6] J. H. Kim, C. Y. Chun, I. N. Hur, B. H. Cho, B. J. Kim, "OCV Hysteresis Effect-based SOC Estimation in EKF Algorithm for a LiFePO₄/C Cell," in Proc. of KPEE Power Electronics Autumn Conference, Nov. 2011.