

OCV 히스테리시스 특성을 이용한 확장 칼만 필터 기반 리튬 폴리머 배터리 SOC 추정

김중훈*, 전창윤*, 허인녕*, 조보형*, 김범재**
 서울대학교*, 삼성테크윈**

OCV Hysteresis Effect-based SOC Estimation in EKF Algorithm for a LiFePO₄/C Cell

J. H. Kim*, C. Y. Chun*, I. N. Hur*, B. H. Cho* and B. J. Kim*
 Seoul National University*, Samsung Techwin**

ABSTRACT

본 논문에서는 리튬 폴리머 배터리(LiFePO₄/C)의 개방전압(OCV;open-circuit voltage) 히스테리시스 특성을 이용한 확장 칼만 필터(EKF;extended Kalman filter) 기반 state-of-charge(SOC) 추정방법을 소개한다. 배터리 등가회로의 주요 요소인 OCV 모델링을 위해 충전 및 방전 각각의 OCV 히스테리시스 특성을 고려하였고 더불어 OCV-SOC 관계의 SOC 간격을 10%에서 5%로 조정하여 EKF 기반 SOC 추정알고리즘의 성능이 향상되었다. 축소된 하이브리드 자동차용 전류프로파일을 적용했을 때 SOC 추정이 잘 이루어지지 않는 영역은 EKF의 측정방정식에 노이즈 모델 및 데이터 리젝션(data rejection)을 구축하였다. 제안된 방법을 이용하여 SOC 추정결과 전류적산법 대비 5%이내의 SOC 추정에러를 만족하였다.

1. 서 론

리튬 폴리머 배터리(LiFePO₄/C)는 안정성이 높고 에너지 효율이 좋은 차세대 이차전지로 각광받고 있으며 대용량으로 만들 수 있는 만큼 향후 전기자동차의 동력원으로 중요한 역할을 담당하리라 예측된다[1]. 동력원으로서 효율적인 역할을 위해서 배터리 관리 시스템인 (BMS;battery managememnt system)의 필요성이 대두되고 있다. 그 중, state-of-charge(SOC)는 배터리 관리 시스템의 척도로서 과충전/과방전 방지 및 배터리의 노화를 막기 위해서 반드시 필요한 요소이다.

EKF(extended Kalman filter)[3] 기반 SOC를 추정하기 위해서는 배터리의 전기화학적 특성을 잘 나타낼 수 있는 등가회로 모델링이 반드시 수반되어야 한다. 예를 들어, 리튬 이온 배터리의 등가회로 모델의 경우 open-circuit voltage(OCV) 및 하나의 R_i와 RC-ladder(R_{Diff}, C_{Diff})로 구성되는데, 이 중 OCV는 없어서는 안 될 중요한 데이터이다. 리튬 폴리머 배터리의 전기화학적 특성실험결과 상이한 OCV, 즉 히스테리시스 특성을 갖는다[2]. 등가회로 모델 기반 SOC 추정이 진행될 때, 알고리즘상의 OCV-SOC 관계의 정밀화가 요구된다. 더불어, 비선형적인 특성을 나타내는 배터리를 간략화된 등가회로로 모델함으로써 발생하는 오차로 인해 SOC 추정성능이 저하되는 문제점은 등가회로 모델링의 풀어야 할 숙제이다.

본 논문에서는 리튬 폴리머 배터리의 OCV 히스테리시스 특성을 이용한 EKF 기반 배터리의 SOC 추정방법에 대해 제안한다. SOC 추정위한 등가회로 모델링 구현시 오차를 해결하기 위해 EKF의 측정방정식에 노이즈 모델을 추가하였다.

2. 리튬 폴리머 배터리의 히스테리시스 특성

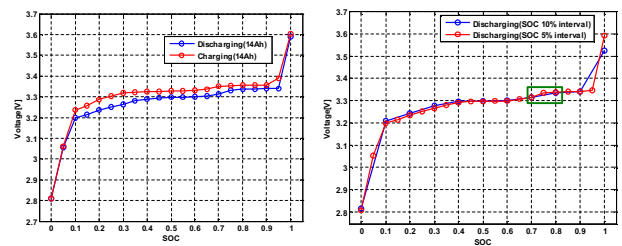


그림 1 OCV 히스테리시스 특성

그림 1은 OCV의 히스테리시스 특성을 나타낸다. 리튬 이온 배터리와 달리 SOC 10%이하, 90%이상 영역을 제외하고 나머지 영역에서 평평한, 즉 히스테리시스 특성을 보인다. 방전은 물론 충전 OCV도 동일한 특성을 나타낸다. OCV-SOC 관계를 이용하여 SOC 추정알고리즘 구현 시 이러한 히스테리시스 특성은 추정에러를 일으킬 가능성이 크다. 더욱이, SOC 10-90% 영역에서 OCV의 차이가 크지 않으므로, 정교화된 OCV-SOC 관계를 구현하기 위해서는 기존 10%의 SOC별 간격이 5%로 조정되어야 한다. 위의 특성을 모두 고려하여 그림 2의 등가회로 모델이 선택된다.

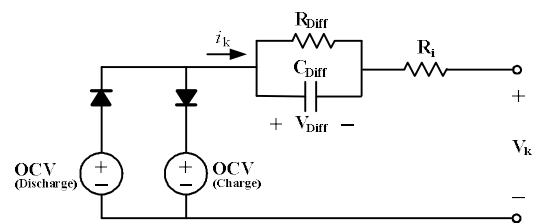


그림 2 단순화된 리튬 폴리머 배터리 등가회로 모델

3. 확장 칼만 필터(EKF)

EKF는 비선형시스템의 상태 추정에 적합한 알고리즘으로서 진행방정식(dynamic equation)과 측정방정식(measurement equation)으로 구성된다. 식 (1)의 칼만게인 K_k을 나타내며, 식 (2)-(3)은 배터리의 SOC 추정을 위한 진행방정식 및 측정방정식을 나타낸다.

$$K_k = P_k H_k^T [H_k P_k H_k^T + R_k]^{-1} \quad (1)$$

$$x_k = \begin{bmatrix} \text{SOC}_{k+1} \\ V_{\text{Diff},k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 - \frac{\Delta t}{R_{\text{Diff}} C_{\text{Diff}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{SOC}_k \\ V_{\text{Diff},k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\Delta t}{C_{n,k}} \\ \frac{\Delta t}{C_{\text{Diff}}} \end{bmatrix} i_k \quad (2)$$

$$V_k = h_k(\text{OCV}, V_{\text{Diff}}) - R_i i_k = \text{OCV} - V_{\text{Diff}} - R_i i_k \quad (3)$$

4. 노이즈 모델 (Noise model)

그림 2의 단순화된 등가회로 모델을 이용하여 SOC를 추정할 경우 단순화로 인한 모델링 오차가 발생한다. 이러한 모델링 오차를 해결하기 위해 SOC 추정알고리즘에 노이즈 모델 및 데이터 리젝션을 추가하였다. 식 (1)을 살펴볼 때, 칼만계인 K_k 은 측정오차 분산 R_k 에 의하여 값이 변하게 된다[4]. 식 (4)-(5)는 측정오차 분산값에 따른 칼만계인의 값이 변함을 보인다.

$$\text{If } R_k = \infty \quad K_k = P_k H_k^T [H_k P_k H_k^T + \infty]^{-1} = 0 \quad (4)$$

$$\text{If } R_k = 0 \quad K_k = P_k H_k^T [H_k P_k H_k^T]^{-1} = H_k^{-1} \quad (5)$$

리튬 폴리머 배터리의 전기화학적 특성실험을 바탕으로 3가지의 노이즈 모델 및 데이터 리젝션이 SOC 추정알고리즘에 적용되며 이를 표 1에 나타내었다.

표 1 노이즈 모델 및 데이터 리젝션

Measurement noise model by SOC's
$R_{k+1} = R_k$ for $(0.1 < \text{SOC} < 0.95)$
$R_{k+1} = R_k \{1 + G_{\text{SOC_low}}(0.1 - \text{SOC})\}$ for extreme SOC ($\text{SOC} < 0.1$)
$R_{k+1} = R_k \{1 + G_{\text{SOC_high}}(\text{SOC} - 0.95)\}$ for extreme SOC ($\text{SOC} > 0.95$)
$G_{\text{SOC_low}} = G_{\text{SOC_high}} = 15$
Measurement noise model by dynamics of diffusion
$V_{\text{Diff}}^{\text{Final}} = R_{\text{Diff}} I \left(1 - e^{-\frac{t}{R_{\text{Diff}} C_{\text{Diff}}}} \right) + V_{\text{Diff}}^{\text{Initial}} \left(e^{-\frac{t}{R_{\text{Diff}} C_{\text{Diff}}}} \right)$
$V_{\text{Diff}}^{\text{Final}} \approx R_{\text{Diff}} I$ (Fast dynamic) $V_t = \text{OCV} - R_1 I - V_{\text{Diff}}^{\text{Final}}$
$R_{k+1} = R_k \{1 + G_{\text{step}}(\text{step_time})\}$
step_time = 5
Measurement noise model by battery current
$R_{k+1} = R_k$ for reliable current ($ i < 15\text{A}$)
$R_{k+1} = R_k \{1 + G_i(i - 15\text{A})\}$ for unreliable current ($ i > 15\text{A}$)
$G_i = 5$
Data rejection caused by the fast dynamic of the RC ladder
$R_k = \infty$ for reject_time ($\Delta I > 15\text{A}$)
reject_time = 100ms

4. SOC 추정성능 검증

수정된 등가회로 모델링 및 노이즈 모델을 이 알고리즘에 적용하고 SOC 추정을 실시하였다. 실험은 두 종류의 전류프로파일(-8~8A, -20~20A)을 통해 충방전 전압을 얻고 이를 추정알고리즘에 적용하여 최대한 실제 충방전 시스템과 비슷하게 구현하였다. 그림 3과 4는 각각 -8~8A 및 -20~20의 전류프로파일 및 충방전 전압을 나타낸다. OCV-SOC 관계에서 SOC별 간격을 5%와 10%일 때의 추정성능 차이를 그림 5에 나타내었다. 그림 1에서 보듯 SOC 75~80% 영역에서 OCV의 차이가 존재하고 이로 인해 그림 5의 추정에러의 존재한다. 그러므로 SOC별 5%의 간격으로 OCV-SOC 관계를 구현하고 이를 추정알고리즘에 반영한다.

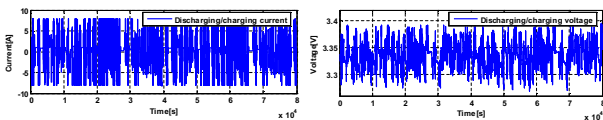


그림 3 전류프로파일(-8~8A) 및 충방전 전압

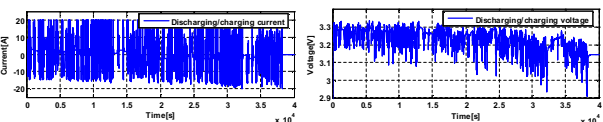


그림 4 전류프로파일(-20~20A) 및 충방전 전압

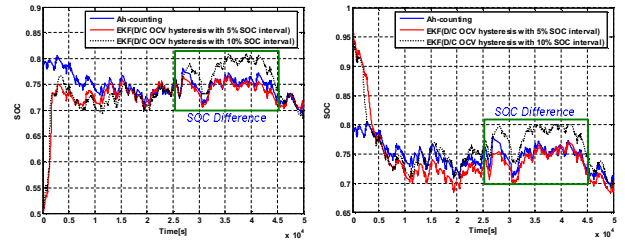


그림 5 SOC별 간격 5%와 10%일 때의 추정성능 차이(-8~8A)

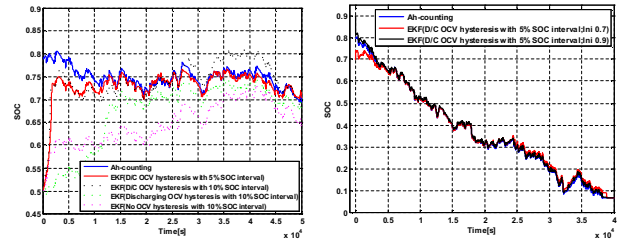


그림 6 SOC 추정 결과(왼쪽 -8~8A, 오른쪽 -20~20A)

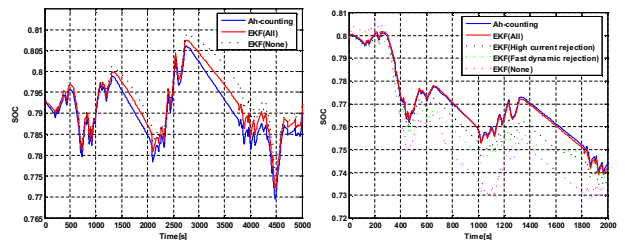


그림 7 노이즈 모델 유무에 따른 추정성능 차이 (왼쪽 -8~8A, 오른쪽 -20~20A)

그림 6은 각 전류프로파일에 따른 SOC 추정결과를 나타낸다. 충전 및 방전 OCV를 고려하고 각 OCV-SOC 관계 구현시 SOC별 5% 간격을 고려하여 이를 추정알고리즘에 반영 시 우수한 추정성능을 나타낸다. 그림 7은 노이즈 모델 유무에 따른 SOC 추정성능의 차이를 보여준다. 빠른 다이내믹에 의한 측정 노이즈 모델과 전류 크기별 측정 노이즈 모델이 고려되었으면 모델을 고려하지 않은 경우보다 나은 추정성능을 보여준다.

5. 결론

본 논문에서는 리튬 폴리머의 OCV 히스테리시스 특성을 이용하여 EKF 기반 SOC 추정방법을 소개한다. 등가회로 모델링 수정 및 노이즈 모델의 추가를 통해 추정성능이 향상되었다.

본 연구는 삼성테크윈의 연구비 지원에 의하여 연구되었으며 또한 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(No.20104010100490),

참고 문헌

- [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-ionbattery," *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] G. L. Plett, "Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 1-3," *Journal of Power Sources*, vol. 134, pp. 252-292, Aug. 2004.