

# EKF를 이용한 SOC 구간별 개별 Minor loop에 따른 LiFePO<sub>4</sub> 셀의 SOC 추정성능 비교분석

이현준<sup>1</sup>, 박종후<sup>1</sup>, 김종훈<sup>2</sup>  
 숭실대학교<sup>1</sup>, 조선대학교<sup>2</sup>

## Comparison of SOC estimation using EKF of the LiFePO<sub>4</sub> cell according to minor loop in individual SOC range

Hyun jun Lee<sup>1</sup>, Joung hu Park<sup>1</sup>, Jonghoon Kim<sup>2</sup>  
 Soongsil University<sup>1</sup>, Chosun University<sup>2</sup>

### ABSTRACT

본 논문은 LiFePO<sub>4</sub> 셀의 SOC(State of Charge) 추정에서 가장 중요한 역할을 하는 모델 파라미터인 OCV(Open Circuit Voltage)의 설계에 관한 것이다. LiFePO<sub>4</sub> 셀은 히스테리시스 특성 때문에 Charging/Discharging OCV값을 이은 curve인 Major loop만으로는 신뢰도 높은 SOC 추정이 어렵다. 따라서, 기존의 Major loop에 추가적으로 SOC 10% 구간별로 Minor loop를 설계해 줌으로써 배터리 모델링의 정확도를 높이고, 이를 최종적으로 EKF(Extended Kalman Filter) 알고리즘을 이용하여 SOC 추정으로 해봄으로써 정확도 향상을 비교해 보고 분석해 보고자 한다.

### 1. 서 론

최근 신재생 에너지 및 EV(Electric Vehicle), ESS(Energy Sotrage System)등 배터리를 사용한 어플리케이션에 관한 관심이 높아짐에 따라, 배터리를 효율적이고 안전하게 사용하고 관리할 수 있는 기술인 BMS(Battery Management System)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 에너지밀도가 높고 고전압 어플리케이션 구축이 용이한 리튬이차전지에 대한 수요가 점차 증가하고 있다.<sup>[1]</sup> 그리고 리튬이차전지 중 LiFePO<sub>4</sub> 배터리는 기존 리튬이차전지의 단점인 충방전 횟수를 2배 이상 늘렸으며, 폭발 및 발화의 문제를 해결하여 현재 가장 주목을 받고 있는 배터리이다.<sup>[2]</sup>

LiFePO<sub>4</sub> 배터리의 효율적인 이용을 위해선 BMS 기술 중 가장 큰 비중을 차지하는 정확한 SOC 추정이 필요하다. 그러나 LiFePO<sub>4</sub> 셀은 히스테리시스 특성을 가지고 있어, Charging/Discharging 전압이 비선형적인 차이를 보이게 되고, 그에 따라 배터리의 모델 파라미터값 중 핵심요소인 OCV도 차이를 보이게 된다. 기본적인 OCV 파라미터의 설계방식은 일정 SOC 간격의 Charging/Discharging OCV값을 이은 curve인 Major loop를 설계해 주는 것이다. 하지만, 단순히 이 Major loop만으로는 LiFePO<sub>4</sub> 셀의 히스테리시스 특성을 극복하기 어렵다.

따라서, 본 논문에서는 기존의 Major loop에 추가적으로 SOC 10% 구간별로 Minor loop를 설계하여 모델 파라미터의 정확도를 높이고, 최종적으로 EKF 알고리즘을 이용하여 SOC 추정을 해봄으로써 결과를 비교분석해 보고자 한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 전기적 등가회로 모델링

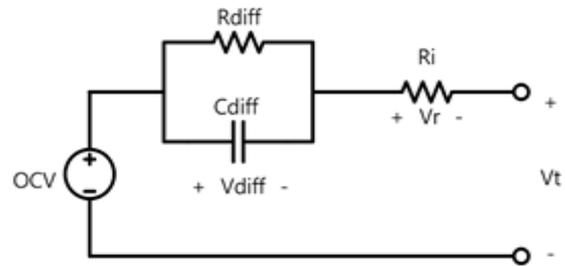


그림 1 등가회로 모델<sup>[2]</sup>  
 Fig. 1 Equivalent-circuit Model

그림 1은 기본적인 배터리의 등가회로 모델이다. 배터리의 전하 전달 현상을 나타내는 Ri 확산(Diffusion)현상을 나타내는 Rdiff와 Cdif, 그리고 OCV로 이루어져 있다.

#### 2.2 확장칼만필터(EKF) 방정식

$$\begin{bmatrix} SOC_k \\ V_{diff,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 - \frac{\Delta t}{C_{diff} \cdot R_{diff}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SOC_{k-1} \\ V_{diff,k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{C_n} \\ \frac{\Delta t}{C_{diff}} \end{bmatrix} i_{k-1} \quad (1)$$

$$V_k = h_k(OCV, V_{diff}) - R_i i_k = OCV - V_{diff} - R_i i_k \quad (2)$$

식 (1)는 확장칼만필터의 state equation을 나타내고, 식 (2)는 확장칼만필터의 measurement equation을 나타낸다.

#### 2.3 Major loop

그림 2는 SOC 10% 간격으로 Charging/Discharging OCV를 측정하여 설계한 LiFePO<sub>4</sub> 셀의 Major loop이다. 앞에서 언급했듯이, 히스테리시스 특성에 의해 Charging/Discharging OCV curve가 차이가 나는 것을 확인 할 수 있다.

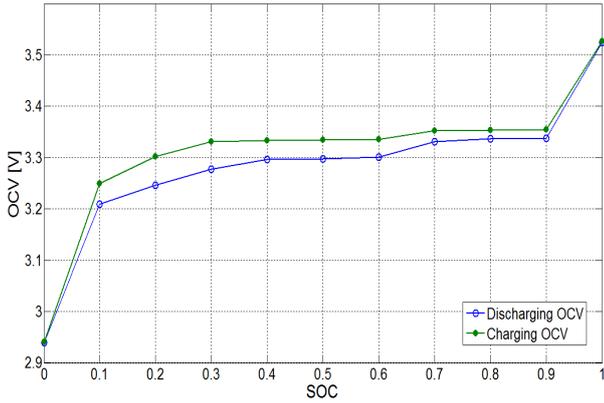


그림 2 메이저 루프<sup>[2]</sup>  
Fig. 2 Major loop

### 1.4 제안하는 Minor loop

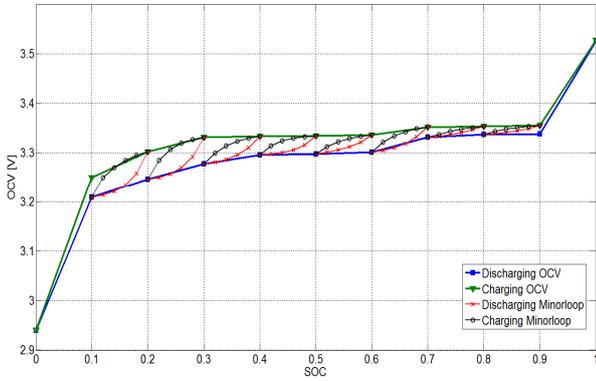


그림 3 제안하는 충/방전 메이저 루프 및 마이너 루프  
Fig. 3 Propose Charging/Discharging Major loop and Minor loop

$$OCV(SOC) = OCV_0' + \int_{SOC_0'}^{SOC} e^{a1(SOC-\tau)} \cdot u1d\tau \quad (3)^{[3]}$$

$$OCV(SOC) = OCV_0' - \int_{SOC}^{SOC_0'} e^{a1(SOC-\tau)} \cdot u1d\tau \quad (4)^{[3]}$$

그림 3은 기존의 Major loop에 추가적으로 Minor loop을 설계한 OCV curve 이다. SOC 10% 간격별로, 충전방향은 식 (3), 방전방향은 식 (4)를 이용하여 Major loop의 Charging OCV와 Discharging OCV를 잇는 Minor loop을 설계하였다. SOC가 0.1에서 0.9사이일 때 배터리 전류의 방향이 바뀌면, 배터리의 등가모델은 Minor loop의 OCV값을 읽어온다. 실제 배터리가 어플리케이션에 사용될 때 좁은 SOC 구간에서 충/방전을 반복하고, 이에 따라 배터리의 등가회로 모델에 사용되는 충전 및 방전 OCV가 자주 바뀌게 되므로 이때, Major loop가 아닌 Minor loop의 OCV 값을 사용하게 된다면, SOC 추정 정확도가 매우 좋아지게 된다.

### 1.5 실험결과

그림 4는 확장칼만필터 알고리즘을 이용해 Major loop만을 적용한 모델과 Major loop에 Minor loop을 추가한 모델을 SOC 추정 시킨 결과이다. 실험을 위해 14[Ah], voltage range 2~3.6[V]의 파워치형 LiFePO<sub>4</sub> 셀을 실제 하이브리드 자동차용 주행 전류프로파일을 적용하여 충/방전 전압데이터를 확보

하였고, Matlab의 simulink기능을 이용하여 시뮬레이션 하였다.

Ah counting의 결과와 비교해 보면, Major loop만을 적용한 모델보다 Major loop에 Minor loop을 추가한 모델이 확실히 더 정확하게 SOC 추정하는 모습을 확인할 수 있었다. 표 1은 결과를 수치적으로 보기위해 평균오차를 계산하여 비교한 것이다. 역시, Ah counting과의 평균오차를 비교해보면 Major loop만 적용했을 경우엔 0.001432[V], Major loop과 Minor loop을 모두 적용했을 경우엔 0.000081[V]로 확실히 정확도가 높아진 것을 확인할 수 있다.

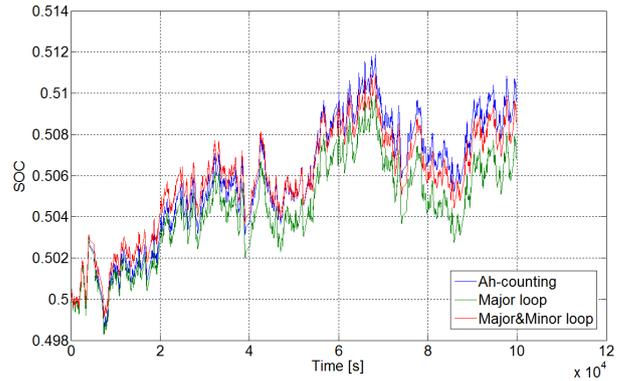


그림 4 확장칼만필터 알고리즘을 이용한 SOC 추정 결과 비교  
Fig. 4 Comparison of SOC estimation using EKF

표 1 평균오차 비교

Table 1 Comparison of Average error

Ah counting Major loop	0.001432 [V]
Ah counting Major and Minor loop	0.000081 [V]

## 3. 결 론

본 논문에서는 LiFePO<sub>4</sub> 셀의 SOC 추정 정확도를 높이기 위해 기존의 Major loop에 추가적으로 SOC 10% 구간별 개별 Minor loop을 설계하여 배터리 모델의 정확도를 높였다. 이를 검증하기 위해 확장칼만필터 알고리즘을 사용하여 SOC 추정 결과를 비교하였다. 그 결과, Major loop만을 사용한 모델보다 Minor loop을 추가적으로 설계한 모델을 사용했을 때 훨씬 더 정확하게 SOC를 추정하는 것을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] 이현준, 박종후, 김종훈, “등가회로 모델링 구성에 따른 확장칼만필터(EKF) 기반 SOC 추정성능 비교분석”, 전력전자학회 2014년도 추계학술대회 논문집, pp. 26 27, 2014. 11
- [2] 이현준, 박종후, 김종훈, “SOC 구간별 개별 Minor loop에 따른 LiFePO<sub>4</sub> 셀의 등가회로 모델링 비교분석”, 2015년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부문회 추계학술대회 논문집, pp. 198 200, 2015. 04
- [3] Hanlei Zhang, Mo Yuen Chow, “On line PHEV Battery Hysteresis Effect Dynamics Modeling”, IECON 2010 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 1844 1849, pp. 7 10 Nov. 2010