

# DCIR을 이용한 EKF 기반의 LiPB SOH 판별 방법

임동진, 조용기, 정용민, 안정훈, 이병국<sup>†</sup>  
성균관대학교 정보통신대학

## A LiPB SOH Determination Method based on Extended Kalman Filter using Direct Current Internal Resistance

Dong Jin Lim, Yong Ki Cho, Yong Min Jeong, Jung Hoon Ahn, and Byoung Kuk Lee<sup>†</sup>  
College of Information & Communication Engineering, Sungkyunkwan University

### ABSTRACT

본 논문은 LiPB의 SOH (State of Health)를 판별하는 방법 중 배터리용량 (Ah) 및 저항 증가모델의 장·단점을 비교한다. 그리고 정확한 SOH 추정을 위해 DCIR (Direct Current Internal Resistance)을 사용한 판별 방법을 제안한다. 정확한 DCIR 값을 추정하기 위하여 EKF (Extended Kalman Filter)를 적용하고, MATLAB 시뮬레이션을 통해 DCIR 값을 확인한다. 또한, 실제 LiPB의 각 SOC (State of Charge) 상태마다 DCIR 값을 측정하고, 추정 값과 비교를 통해 정확도를 판단한다.

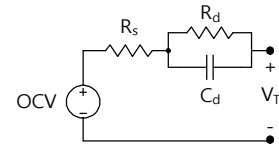


그림 1 LiPB의 1차 RC ladder 모델  
Fig. 1 1<sup>st</sup> RC ladder model of the LiPB

전압과 내부 직렬저항  $R_s$  그리고 배터리의 과도 상태에 영향을 주는  $R_d$ 와  $C_d$ 로 구성 된다.

### 1. 서 론

LiPB는 에너지 밀도가 높으면서 비중이 크다는 장점이 있기 때문에 전기 자동차 및 ESS (Energy Storage System) 분야에서 많이 사용되고 있다. 다양한 분야에서 대용량 배터리의 사용 증가에 따라 BMS (Battery Management System)의 필요성이 강조되고, 그에 따른 SOC 및 SOH 연구도 활발하게 이루어지고 있다.<sup>[1]</sup>

배터리의 정확한 SOH 예측이 가능할 경우, 노화된 배터리의 정확한 SOC 추정이 가능하고, 배터리의 효율적인 사용이 가능하다. SOH 판별하는 방법은 여러 가지가 있는데, 그 중 Ah 증가모델의 경우 정확도 측면에서는 상당히 높지만 실제 SOH를 실시간으로 예측이 불가능하다. 그러한 단점을 보완한 C 증가모델의 경우 커패시턴스를 통해 실시간 추정은 가능하지만 연산 과정의 용이성이 낮다. 그리고 R 모델의 경우 배터리 내부 저항을 증가모델 함으로써 실시간 추정 및 연산의 용이성은 있지만, 내부 저항  $R_s$ 와  $R_d$  선정 기준의 명확하지 않다는 단점이 있다.

본 논문에서는 높은 정확도를 유지하면서 R 모델에서의 단점인 내부저항의 선정 기준을 DCIR 방법을 통해 명확하게 제시한다. 또한 DCIR을 이용하여 배터리의 특성, 실시간 추정 및 연산의 용이성을 포함하는 SOH 추정 방법에 대해 제안한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 배터리 증가모델

LiPB의 증가모델은 그림 1과 같이 1차 RC ladder 모델로 구성 할 수 있다. 1차 RC ladder 모델은 간단하면서도 배터리 동적 특성을 잘 나타내는 모델로써, 각 SOC에 대응하는 OCV

#### 2.2 EKF를 이용한 SOC 추정 및 검증

그림 1과 같이 1차 RC ladder 모델의 상태 변수를 식 (1)과 같이 구성 된다. 또한 EKF의 모델링을 위해 전류적산법을 식 (2)로 나타내고, 단자전압은 식 (3)과 같이 나타낸다.

$$x_k = \begin{bmatrix} SOC_k \\ V_{diff,k} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$SOC_{k+1} = SOC_k - \frac{1}{C_n} \int I_b dt \quad (2)$$

$$V_{T_k} = OCV(SOC_k) - i_k R - V_d \quad (3)$$

1차 RC ladder 모델의 상태방정식은 다음의 식 (4)와 같다. 상태 방정식에 첫 번째와 두 번째 항은 식 (2)와 식 (3)을 통해 나온 값이며 마지막 항  $w_k$ 는 시스템 노이즈를 나타낸다.

$$x_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 - \frac{\Delta t}{R_d C_d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SOC_k \\ V_{diff,k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\Delta t}{C_n} \\ \frac{\Delta t}{C_d} \end{bmatrix} i_k + w_k \quad (4)$$

다음 상태의 값을 추정하기 위해서 식 (6)과 같이 칼만 이득의 값이 필요하고, 칼만 이득을 계산하기 위해 식 (5)와 같이 오차 공분산의 예측이 필요하다. 그리고 현재 값의 오차 공분산을 연산하기 위해 식 (8)이 필요하다.

$$P_k = AP_{k-1}A^T + Q \quad (5)$$

$$K_k = P_k H^T (HP_k H^T + R)^{-1} \quad (6)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k + K_k (z_k - h(\hat{x}_k)) \quad (7)$$

$$P_k = P_k - K_k H P_k \quad (8)$$

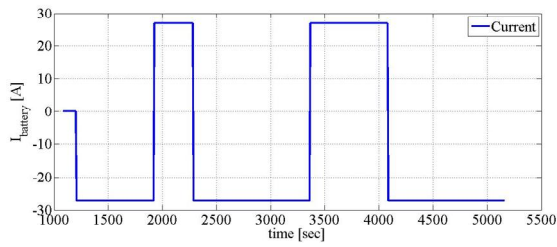


그림 2 전류 프로파일  
Fig. 2 Current profile

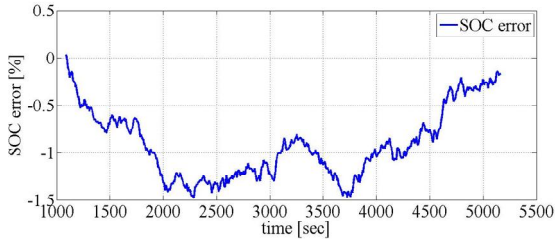


그림 3 EKF에서 추정된 SOC 오차  
Fig. 3 SOC estimation error by the EKF

SOC 추정 정확도 검증을 위해 그림 2의 충·방전 프로파일을 Kokam 社의 27 Ah/ 99.9 Wh LiPB에 적용하였다. 그 결과는 그림 4와 같고, 오차는 그림 3과 같이  $\pm 1.5\%$  내로 발생하였다. 기존의 SOC 오차가  $\pm 5\%$  내인 경우 정확도가 높다고 판단 되는데, 본 시뮬레이션은  $\pm 1.5\%$  내로 정확도가 높은 SOC 추정이 이루어짐을 확인 할 수 있다.

### 2.3 DCIR을 통한 SOH 추정 방법 제안

2.2 절에서 EKF를 통해 정확한 SOC 추정이 이루어지고 있다. 이를 통해서 정확한 각 SOC에 해당하는 OCV 전압이 추정 되고 따라서 식 (9)와 같이 DCIR을 계산 할 수 있다.<sup>[2]</sup>

$$DCIR_k = \frac{OCV(SOC_k) - V_{T(measurment),k}}{I_{b(measurment),k}} \quad (9)$$

그리고 그림 5는 그림 2의 전류 프로파일을 적용하여 EKF가 추정된 DCIR의 결과를 나타낸다. 그래프의 적색 점과 녹색 점은 각각 현재 노화된 배터리와 초기 상태 배터리의 DCIR을 나타낸다. 그리고 청색 실선은 식 (9)를 통해 실시간으로 DCIR을 연산한 결과이며, 노화된 배터리의 DCIR을 실시간으로 추정한다. 그리고 추정된 DCIR 정확도를 계산하기 위한 방법은 식 (10)과 같다. 이 때  $R_{aging}$ 은 현재 노화된 상태의 실측 DCIR을 의미하고,  $R_{estimates}$ 는 추정된 DCIR을 나타낸다.

$$Accuracy [\%] = 100 \times \left(1 - \frac{|R_{aging} - R_{estimates}|}{R_{aging}}\right) \quad (10)$$

표 1 기준 DCIR과 추정 DCIR간 정확도

SOC [%]	10	20	30	40	50
Accuracy [%]	96.6	99.9	97.7	86.5	83.7

표 1은 기준 DCIR과 추정된 DCIR의 정확도를 나타내며, 각 SOC에 대응하는 정확도는 약 83.7~99.9%로써 정확하게 추정 한다는 것을 확인할 수 있다.

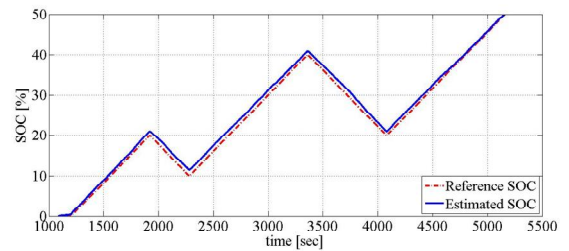


그림 4 실제 실험의 SOC와 EKF에서 추정된 SOC의 비교  
Fig. 4 Comparison of actual experiments SOC and estimated SOC

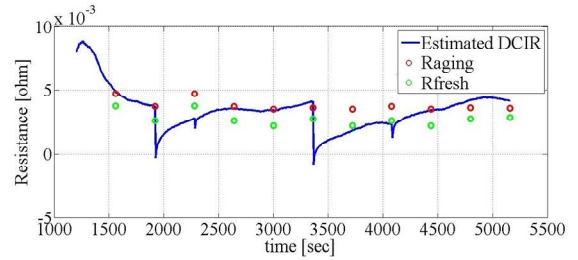


그림 5 추정된 DCIR과 실제 DCIR 값의 비교  
Fig. 5 Comparison of estimated DCIR and actual value

식 (11)은 추정된 DCIR의 SOH 나타낸다. 여기서  $R_{EOL}$ 은 배터리의 출력 전력의 60% 지점에서의 노화된 저항을 나타낸다.

$$SOH [\%] = \frac{|R_{EOL} - R_{estimates}|}{|R_{EOL} - R_{fresh}|} \times 100 \quad (11)$$

표 2 실측 SOH와 추정 SOH의 비교

종 류	실측값	추정값
SOH [%]	48.06	35.85

실험 결과를 통해 실측한 SOH와 추정된 SOH의 오차는 표 2와 같이 약 12.21%로 나타났다. 따라서 추정값과 실측값이 비슷한 양상으로 나타나는 것을 확인할 수 있다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 LiPB의 1차 RC ladder 모델과 EKF를 기반으로 하여 실시간으로 정확한 DCIR을 추정 하였다. 그리고 추정된 DCIR을 기반으로 한 SOH 판별 방법을 제안하고 실험을 통해 노화된 배터리의 SOH를 정확하게 판단하였다. 추후에는 정확도 개선 및 실제 주행패턴을 적용하여 성능 개선을 할 예정이다.

## 참 고 문 헌

- [1] Gregory L. Plett, "Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB based HEV battery packs Part 3. State and parameter estimation", Journal of Power Sources, Vol. 134, pp. 277-292, 2004.
- [2] Michael Wahlstrom, "Design of a Battery State Estimator Using a Dual Extended Kalman Filter", M.S. thesis, University of Waterloo, 2010.