

## 확장칼만필터를 적용한 효율적 배터리 SOC 추정 알고리즘

이연식\*, 백재석<sup>o</sup>, 이옥재\*\*

\*군산대학교 소프트웨어학부,

<sup>o</sup>(주)해라이트

\*\* (주)해라이트

e-mail: yslee@kunsan.ac.kr\*, gwings@naver.com<sup>o</sup>, ojlee@halight.co.kr\*\*

## Efficient Battery SOC Estimation Algorithm Using Extended Kalman Filter

Yon-Sik Lee\*, Jae-Seok Baik<sup>o</sup>, Ok-Jae Lee\*\*

\*School of Software, Kunsan National University,

<sup>o</sup>Halight Co.,

\*\*Halight Co.

### ● 요약 ●

본 논문에서는 리튬이온 배터리의 SOC(State Of Charge) 초기 정보의 정확도 향상을 위하여 확장칼만필터(EKF) 방법을 적용한 효율적 SOC 추정 알고리즘을 제안한다. 일반적인 전류적산법을 사용하는 방법은 초기 조건이 부정확한 경우에 오차가 발생하고 시간에 따라 누적 오차가 커지는 단점이 있다. 이러한 문제점 해결을 위하여 초기 SOC 추정값에 EKF 방법을 동시에 적용하는 알고리즘을 제안한다. 제안 알고리즘의 평가를 위한 실험을 통하여 제안 방법이 기존 SOC 추정 방법보다 추정 오차가 개선됨을 확인하였다.

**키워드:** 배터리 관리시스템(Battery Management System), 충전 상태 추정(State Of Charge Estimation), 확장칼만필터(Extended Kalman Filter)

## I. Introduction

SOC는 배터리의 충전상태를 나타내는 지표로서 가용 전하의 잔량을 배터리의 용량과의 비율로 나타낸다. SOC 추정을 통하여 배터리 과충전 및 과방전을 예상하고 이를 배터리 제어 및 관리에 적용할 수 있다[1]. 배터리의 단자 전압인 개방회로전압의 변화를 통해 SOC를 추정하는 OCV(Open Circuit Voltage)방법은 충·방전 후 안정화 요구로 인하여 실시간 측정이 불가능하다. 배터리의 초기값에 배터리의 충전 및 방전이 이루어지는 동안의 전류를 적분한 값으로 SOC를 추정하는 전류적산법은 구현이 쉽고 실시간 추정이 가능하지만, 초기 조건이 부정확한 경우에는 오차가 발생하고 시간이 지남에 따라 오차가 누적되는 단점이 있다[1,2]. 본 논문에서는 전류의 누적 정보를 이용하는 전류적산법의 예측 정확도 분석을 기반으로, SOC 초기 정보의 정확도 향상을 위하여 내부 상태 예측단계와 오차 분산 보정단계를 반복적으로 수행하는 EKF 방법[3,4,5]을 동시에 적용하는 추정 오차 최소화 알고리즘을 제안한다. 제안 알고리즘의 평가에는 배터리 모델링 및 배터리 파라미터를 구분 적용하고, Simulink를 이용한 실험 결과를 통하여 제안 방법이 효율성 및 정확성을 분석 평가한다.

## II. Battery Modeling and Parameter Extraction

### 1. Battery modeling

배터리 모델링은 주어진 전류, 전압, 온도, 용량, 파라미터 및 SOC 정보를 기반으로 배터리 내부 상태 추정을 위한 기본 과정으로, 테브난(Thevenin) RC (Resistor-Capacitor) 등가회로 모델을 사용한다.

그림 1은 RC 등가회로 모델로 배터리 용량  $C_b$ , 배터리 내부저항  $R_i$ , 전기화학적 확산 저항  $R_d$ , 전기화학적 확산 캐패시턴스  $C_d$ 를 나타내며, 배터리의 충방전 상태에 따른 각 파라미터의 변화를 이용하여 배터리 OCV를 추정한다[2,3].

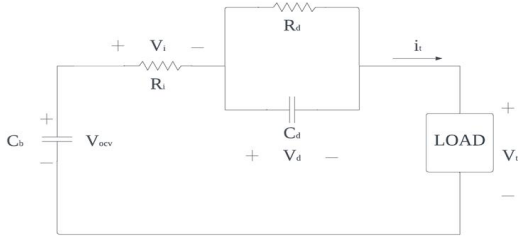


Fig. 1. RC equivalent circuit model

## 2. Parameter extraction

배터리 모델의 파라미터  $V_i$ ,  $V_d$ ,  $V_{ocv}$ ,  $R_i$ ,  $R_d$ ,  $C_d$  는 SOC, 충·방전 조건 및 부하 전류에 따른 추출이 가능하며,  $R_i$ 는 부하 전류를 인가하는 순간의  $V_i$ 를 이용하여 결정하고,  $R_d$ ,  $C_d$ 는  $V_d$ 를 이용하여 결정한다.

### 2.1 Parameter $C_b$

벌크 캐패시터 전압  $V_{ocv}$ 을 구하는 식(1)을 사용하여, 파라미터  $C_b$ 는 식(2)와 같이 결정한다.

$$\frac{dV_{ocv}}{dt} = \frac{i_t}{C_b}, \quad V_{ocv} = \frac{1}{C_b} \int_{t_1}^{t_2} i_t dt \quad (1)$$

$$C_b = \frac{1}{V_{ocv}} \int_{t_1}^{t_2} i_t dt \quad (2)$$

### 2.2 Parameter $R_i$

$R_i$ 는 부하 전류를 인가하는 순간을 나타내는 모드에서 추출하며, 다음 식(3)과 같이 결정한다.  $V_{i,t_0}$ 은 부하 전류를 인가하기 직전의 전압이며,  $V_{i,t_1}$ 은 부하 전류를 인가한 직후의 전압을 나타낸다.

$$R_i = \frac{V_{i,t_1} - V_{i,t_0}}{i_t} \quad (3)$$

### 2.3 Parameter $R_d$ , $C_d$

부하 전류에 따른 파라미터 변동 에러 최소화 방법으로 전류를 인가한 상태와 전류를 인가하지 않은 상태로 구분하여  $R_d$ ,  $C_d$ 를 추출한다.  $V_d$ 는 식(4)와 같이 산출한다.  $\tau = R_d C_d$ 이며,  $R_d$ ,  $C_d$ 는 곡선 근사 기법을 이용하여 결정한다.

$$V_d(t) = i_t R_d (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (4)$$

배터리 파라미터는 실험을 위한 배터리 모델의 기본 정보로 사용되며, 초기 파라미터 설정을 통해 실제 배터리와 유사한 상태를 설정한다.

## III. The Proposed Battery SOC Estimation Algorithm

전류적산법은 SOC 산출을 위한 식(5)에서 알 수 있듯이 초기  $SOC(0)$ 가 정확하지 않으면 오차가 발생하는 문제점이 있다.

$$SOC(t) = SOC(0) - \int_0^t \frac{I(t)}{C_n} dt \quad (5)$$

본 논문에서는 전류적산법의 장점인 실시간 SOC 추정이 가능하고 초기 SOC 오차를 줄이기 위하여 EKF를 적용한 초기 SOC 갱신 방법을 제안한다. 제안 알고리즘의 처리 흐름도는 그림 2와 같다.

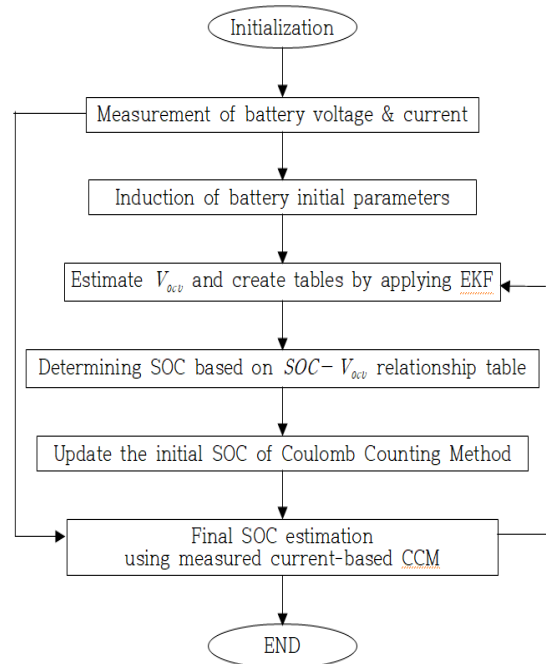


Fig. 2. Process flow of the proposed SOC estimation algorithm

제안 알고리즘은 배터리 충·방전 전압과 전류를 이용하여 EKF 방법을 적용해서 상태 변수  $V_{ocv}$ 를 추정한다. 추정된  $V_{ocv}$ 는  $SOC - V_{ocv}$  관계를 이용하여 변환한 SOC 값을 전류적산법의 초기값  $SOC(0)$ 에 치환하고, 식(5)를 통해 측정된 전류의 변화량을 이용하여 최종 SOC를 추정한다.

## IV. Experiments and Evaluations

실험을 위해 사용하는 리튬이온 배터리는 Samsung SDI의 INR18650-25R이며, 각 사양 정보를 기반으로 각 실험의 측정 최대 전압과 최소 전압의 기준값을 정하고, 전류적산법에 필요한 배터리 용량을 설정한다. 0.5C의 기준 전류로 방전하는 CC-CV (Constant Current-Constant Voltage) 충·방전 실험을 통해 배터리 파라미터를 추출한다. 실험을 통해 SOC를 10% 단위로 구분 산출한 추출 파라미터는 표 1과 같으며, 이는 실험에 사용된 RC 배터리 모델의 기본

정보로 활용한다.

Table 1. Battery characteristic parameter values

SOC	OCV(V)	Ri( $\Omega$ )	Rd( $\Omega$ )	Cd(F)
100%	4.115	0.027	0.017	2314
90%	4.074	0.026	0.017	4320
80%	3.975	0.027	0.024	2356
70%	3.894	0.027	0.031	1869
60%	3.816	0.027	0.033	1778
50%	3.701	0.026	0.020	1231
40%	3.632	0.027	0.020	2851
30%	3.576	0.027	0.026	3430
20%	3.505	0.027	0.024	2600
10%	3.402	0.028	0.021	3040
0%	3.254	0.029	0.070	5360

초기 SOC 추정값에 EKF 방법을 동시에 적용하는 제안 알고리즘의 평가를 위한 실험 Simulink 블록화는 다음 그림 3과 같으며, 실험 환경으로 온도는 25℃, 전류와 전압 측정 노이즈는 기본값, 초기 SOC 값을 0.7로 설정하고 전류적산법과 EKF 방법의 SOC 추정값 차이를 확인한다. 제안 알고리즘의 초기 SOC 값을 EKF를 이용하여 추정된 SOC 값을 적용한다.

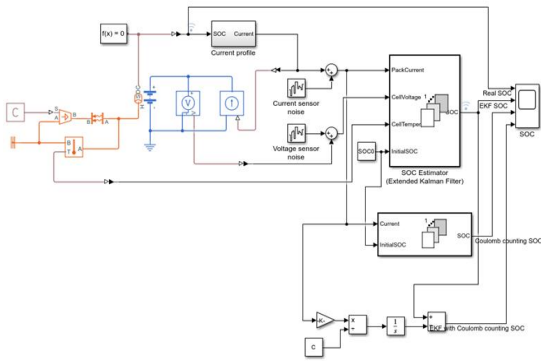


Fig. 3. Block model of CC and EKF (Simulink)

전류적산법과 EKF 방법을 별도로 적용한 실험과 제안 알고리즘인 전류적산법과 EKF 방법을 동시에 적용한 실험 결과는 그림 4와 같다. 전류적산법을 이용한 SOC 추정값은 초기 SOC 값으로 인하여 실제값 대비 초기 오차가 존재하지만, EKF 방법을 이용한 SOC 추정값은 시간이 지남에 따라 배터리의 실제 SOC 값에 근접해지며, SOC 평균 추정값은 8.163으로 실제 SOC 평균값 7.867과 0.296 차이가 발생하였다. 제안 알고리즘을 적용한 SOC 평균 추정값은 8.096으로, 초기 SOC 오차를 줄이고 시간이 지남에 따라 실제 배터리 SOC 값에 더욱 근접함을 보여 추정 성능이 향상됨을 알 수 있다.

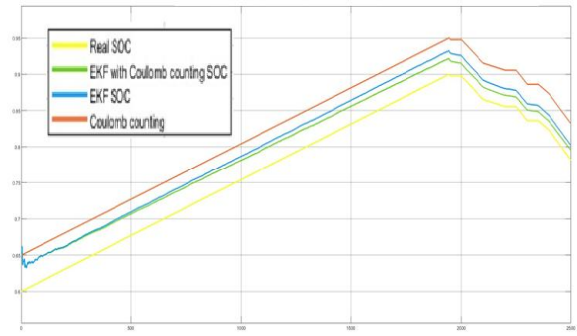


Fig. 4. Comparison of CC, EKF, Real SOC, and proposed algorithm

## V. Conclusions

배터리의 SOC 추정 오류로 인해 BMS에 문제가 생기면 배터리 전력 시스템 전체에 문제가 발생할 수 있다. 전류적산법은 배터리 충·방전 시 전류의 변화량과 배터리의 최대 용량 정보를 이용하여 실시간 추정이 가능하지만, SOC 초기값의 정확성이 요구될 뿐만 아니라 시간의 흐름에 따른 오차 누적이 발생하는 문제점이 있다.

본 논문에서는 SOC 초기값을 EKF 방법을 동시에 적용하여 추정된 값으로 갱신함으로써, 초기 SOC 오차를 개선하고 오차의 누적 발생을 방지하는 알고리즘을 제안하였다. 실험 결과를 통해 전류적산법이나 EKF 방법만을 적용한 방법과 비교하여, 본 논문에서 제안한 SOC 추정 알고리즘은 초기 SOC 값의 오차를 줄이고 시간이 지남에 따라 실제 배터리 SOC 값에 더욱 근접함을 보였다. 이를 통해 제안 알고리즘은 SOC 추정의 정확성을 기반으로 충·방전 특성을 고려한 배터리 효율 향상 및 배터리 이상 현상 대처에 유용하게 적용될 수 있다.

본 논문의 실험에 사용된 배터리는 셀(Cell) 단위로 SOC 값을 추정하였지만, 이러한 셀을 직·병렬로 연결하여 팩(Pack) 단위로 배터리를 구성할 때는 추가적인 기술적 보완이 요구된다. 또한 여러 슬레이브 제어기를 통제하는 마스터 제어기로 구역별 배터리를 제어할 수 있는 시스템 구축이 추가적으로 요구된다.

## ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by 2023 Fostering project on Regional Characterization Program through the INNOPOLIS (No. 2023-IT-RD-0015-01-101) and the National Research Foundation of Korea (No. 2021R1F1A1047768) grant funded by the Korea government (MSIT)

## REFERENCES

- [1] Jeong Lee, Jehyuk Won, "Enhanced Coulomb Counting Method for SoC and SoH Estimation Based on Coulombic Efficiency", IEEE Access, vol. 11, pp. 15449-15459, Oct., 2023.
- [2] C. Chen, R. Xiong and W. Shen, "A lithium-ion battery-in-the-loop approach to test and validate multiscale dual H infinity filters for state-of-charge and capacity estimation", IEEE Transaction on Power Electronics, vol. 33, no. 1, pp. 332-342, Dec., 2018.
- [3] U. Khalil, M. Ahsan, I. Ullah, A. Adnan, N. Khan and S. Nawaz, "SOC prediction of Lithium-Ion Battery using Extended Kalman Filter", 2018 International Symposium on Recent Advances in Electrical Engineering, pp. 1-5, Oct., 2018.
- [4] Z. Jokić, Zečević and B. Krstajić, "State-of-charge estimation of lithium-ion batteries using extended Kalman filter and unscented Kalman filter", 2018 23rd International Scientific-Professional Conference on Information Technology, pp. 1-4, Feb., 2018.
- [5] Y. Liu, Y. Huangfu, R. Ma, L. Xu, D. Zhao and J. Wei, "State of charge estimation of lithium-ion batteries electrochemical model with extended Kalman filter", 2019 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, pp. 1-7, Sep., 2019.