

칼만 필터를 이용한 리튬-폴리머 배터리의 SOC 추정

장기욱¹, 정교범[†]

A SOC Estimation using Kalman Filter for Lithium-Polymer Battery

Kiwook Jang¹, and Gyo-Bum Chung[†]

Abstract - The SOC estimation method based on Kalman Filter(KF) requires the accurate battery model to express the electrical characteristics of the battery. However, the performance of KF SOC estimator can hardly be improved because of the nonlinear characteristic of the battery. This paper proposes the new KF SOC estimator of Lithium-Polymer Battery(LiPB), which considers the variation of parameters based on the hysteresis effect, the magnitude of SOC, the charging/discharging mode and the on/off load conditions. The proposed SOC estimation method is verified with the PSIM simulation combined the experimental data of the LiPB.

Keywords: lithium-polymer battery, SOC, hysteresis, modeling error, kalman filter, estimation

1. 서 론

전기 에너지를 저장하여 사용할 수 있는 배터리는 휴대폰, 전기 자동차, 하이브리드 자동차 등 다양한 분야에서 사용되고 있다.^[1]

배터리를 에너지원으로 사용하는 시스템의 안정적인 운전은 배터리 충전량(SOC: State-Of-Charge)에 대한 정확한 정보를 필요로 한다. SOC 추정을 위한 연구는 다양한 방식으로 활발하게 진행되고 있다.^[2] 배터리의 충·방전 전류를 시간에 대해 적산하여 SOC를 추정하는 방법인 Ampere-Hour(AH) Counting 방법은 구현하기는 쉬우나, 초기치 문제와 센서 노이즈로 인한 SOC 추정 오차 누적의 문제점이 있다.^{[1][3]} 배터리 단자 전압을 이용하는 Open-Circuit-Voltage(OCV) 방법은 배터리의 안정화를 위한 휴지시간을 요구하여, 실시간 측정이 필요한 분야에 적용이 어렵다.^{[3][4]}

칼만 필터를 이용한 SOC 추정은 실시간 구현이 가능하고, 노이즈에 강인한 특성을 보여 많은 연구가 진행되고 있다.^{[4][5][6][7]} 배터리의 비선형적인 특성으로 인해 주로 확장 칼만 필터 방식이 이용되며, 초기치 문제를 해결할 수 있는 장점이 있으나, 상태변수의 증가에 따라

계산시간이 증가하는 단점이 있다.^[4] EKF를 이용한 배터리의 SOC 추정 기법은 우수한 추정 성능을 얻기 위해 배터리의 동작 특성을 정확하게 표현할 수 있는 배터리 모델의 사용이 요구된다.^{[8][9]} 그러나, 배터리의 전기적/화학적 특성은 다양한 인자에 의해서 영향을 받으므로, 배터리의 전기적 특성의 정확한 모델링은 매우 어려운 일이며, 확장 칼만 필터를 이용한 배터리 SOC 추정기의 성능을 저하시키는 결정적인 요인이 된다.^[4] 최근, SOC 크기, 충·방전 모드, 배터리 전류크기 및 히스테리시스 특성에 의한 배터리 모델링 에러를 최소화하고, SOC 추정 성능을 향상시키기 위한 연구가 진행되었다.^{[4][6][8]}

따라서, 본 논문은 리튬-폴리머 배터리의 SOC 추정기의 성능을 향상하기 위해서 칼만 필터 기반의 새로운 방법을 제안한다. SOC 추정기는 히스테리시스 특성, SOC 크기, 충·방전 모드 및 부하전류 유·무에 의한 배터리의 파라미터 변동을 조합한 칼만 필터를 이용하여 구현되었다. 그리고, 실험을 통해 수집된 배터리 전기적 특성 데이터를 이용한 PSIM 시뮬레이션 결과를 AH Counting 방법과 OCV 방법을 이용한 결과와 비교하여 제안한 방법의 성능을 검증하였다.

2. 배터리 모델

2.1 배터리 모델

그림 1은 본 연구에서 채택한 부하에 연결된 배터리 모델이다.^[5] 배터리 출력전압 V_t 는 개방회로전압 V_{oc} ,

Paper number: TKPE-2012-17-3-5 ISSN: 1229-2214

[†] Corresponding author: gbchung@hongik.ac.kr, Dept. of Electronic & Electrical Eng., Hongik University
Tel: +82-41-860-2595 Fax: +82-41-863-7605

¹ LG Chemistry, Battery R&D, Advanced BESS PJT.

Manuscript received Jan. 26, 2012; accepted Mar. 13, 2012

출력전압의 빠른 과도응답 특성을 나타내는 V_i , 느린 과도응답 특성을 나타내는 V_d 의 합이다. 벌크 커패시턴스 C_b 는 배터리의 용량을 결정하며, C_b 의 전압 V_{oc} 는 SOC의 함수이다. R_i 는 배터리의 내부 저항, R_d 와 C_d 는 확산 저항 및 확산 커패시턴스를 나타낸다.

2.2 배터리 전압-전류 특성 해석

그림 2-(a)는 배터리에 부하 전류 i_t 를 인가한 경우, 배터리 출력전압 V_t 의 파형을 나타내며, 그림 2-(b)는 동작모드 변화에 따른 전기적 등가회로를 나타낸다.

*Mode 2*와 *Mode 3*은 i_t 가 인가된 온로드 상태 (On-Load Condition)이며, *Mode 1*, *Mode 4* 및 No-Load Condition)이다.

Mode 1 ($t_0 \leq t < t_1$): 무부하 상태에서 배터리가 안정화되어 있다. 배터리의 출력전압 V_t 는 배터리 SOC를 결정하는 전압 V_{oc} 와 같다.

Mode 2 ($t = t_1$): 배터리에 전류원 i_t 가 연결된 순간이다. 전압 V_t 는 V_{oc} 와 내부저항 R_i 에 인가된 전압 V_i 에 의해 결정되며, SOC 변화는 없다.

Mode 3 ($t_1 < t < t_2$): 배터리가 방전하는 온로드 상태이며, 배터리 출력전압 V_t 는 V_{oc} , V_i 및 RC-병렬회로의 전압 V_d 의 합이다.

Mode 4 ($t = t_2$): 전류원 i_t 가 제거된 순간이다. 전압 V_t 는 V_{oc} 와 V_d 의 합이며, SOC 변화는 없다.

Mode 5 ($t_2 < t \leq t_3$): 출력전압 V_t 는 V_{oc} 와 V_d 의 합이다. 무부하 운전상태이나, RC-병렬회로의 방전에 의해 V_d 및 V_t 가 감소하며, SOC 변화는 없다.

2.3 파라미터 추출 방법

저항 R_i 는 전류원 i_t 를 배터리에 인가한 순간인 *Mode 2*와 배터리에 전류가 제거된 순간인 *Mode 4*에서 식(1)과 같이 V_t 의 크기 변화를 이용하여 구한다.

$$R_i = \frac{V_{t,t_1^+} - V_{t,t_1^-}}{I_t} \quad (1)$$

여기서, V_{t,t_1^-} 는 부하전류를 인가하기 직전의 전압이고, V_{t,t_1^+} 는 부하전류를 인가한 직후의 전압이다.

전압 V_d 는 *Mode 3* 및 *Mode 5*에서 식 (2)과 같이 지수 함수(Exponential Function)로 표현된다.

$$V_d(t) = I_t \cdot R_d \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (2)$$

여기서, $\tau = R_d \cdot C_d$ 이며, 파라미터 R_d , C_d 는 곡선근사(Curve Fitting) 기법을 이용하여 구할 수 있으며, *Mode 3*과 *Mode 5*에서 R_d , C_d 의 값은 다르다.

Battery Model

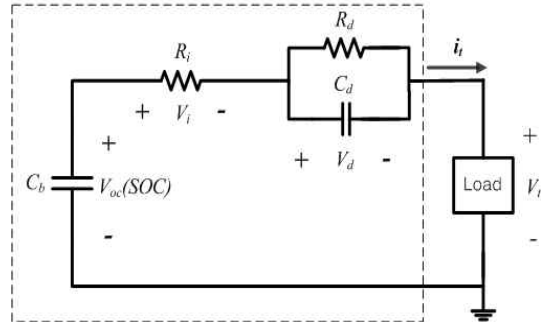


Fig. 1 Equivalent Circuit of Battery connected to a Load

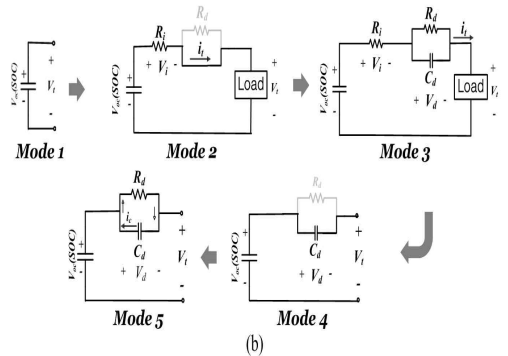
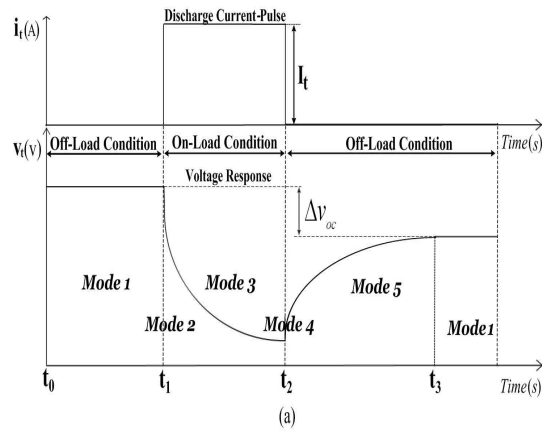


Fig. 2 I-V characteristics analysis of the battery (a) I-V characteristics (b) Equivalent circuit at each mode

파라미터 C_b 는 *Mode 3*에서 배터리 전하량 변화와 전압 변화량 ΔV_{oc} 을 이용하여 구하며, 식(3)과 같다.

$$C_b = \frac{1}{\Delta V_{oc}} \int_{t_1}^{t_2} I_t dt \quad (3)$$

3. 파라미터

그림 3~6은 식 (1)~(3)을 이용하여 추출한 리튬-폴리머 배터리의 파라미터이다. 사용한 배터리는 정격용량

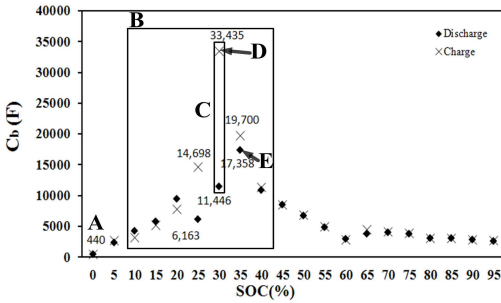


Fig. 3 Variations of the parameter C_b with SOC and charge/discharge mode

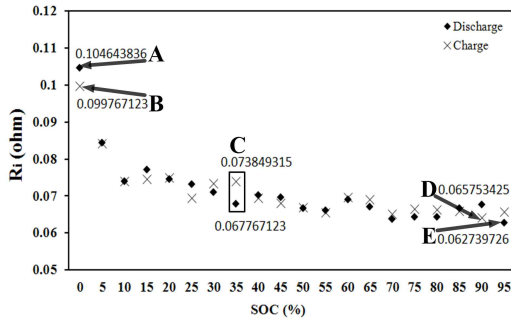


Fig. 4 Variations of the parameter R_i with SOC and charge/discharge mode

0.73(Ah), 정격전압 3.79(V)인 에너테크사(ENERTECH INC.) 제품이다. 배터리의 컷오프 전압은 각각 3.4(V)와 4.2(V)로 설정하였고, 펄스전류원 i_t 는 크기 0.73(A), 펄스폭 180(s)이다. 배터리의 충·방전동작 중, 내부 온도 변화로 인한 V_{oc} 의 변동은 무시하였으며, 실내온도 25(°C)에서 Multi-Channel Source Measure Unit (YOKOGAWA GS-820)을 사용하여 측정하였다.

그림 3은 SOC값과 충·방전 모드에 따른 C_b 의 크기이다. 충전모드에서 C_b 는 SOC 0(%)인 점 A에서 최소값 440(F), SOC 30(%)인 점 D에서 최대값 33,435(F), 평균값 7,293(F)을 갖는다. 방전모드에서 C_b 는 SOC 0(%)인 점 A에서 최소값 440(F), SOC 35(%)인 점 E에서 최대값 17,358(F), 평균값 5,714(F)을 갖는다. C_b 의 크기는 SOC 변화에 따라 비선형적으로 변화하며, 충·방전 모드 변화에 대한 C_b 의 변화는 영역 B 내의 점 C에서 최대 변화폭 21,989(F)을 갖는다.

그림 4는 SOC값과 충·방전 모드에 따른 R_i 의 크기이다. 충전모드에서 R_i 는 SOC 0(%)인 점 B에서 최대값 0.09976(Ω), SOC 90(%)인 점 D에서 최소값 0.063(Ω), 평균값 0.071311(Ω)을 갖는다. 방전모드에서 R_i 는 SOC 0(%)인 점 A에서 최대값 0.10464(Ω), SOC 95(%)인 점 E에서 최소값 0.06273(Ω), 평균값 0.0712(Ω)을 갖는다. R_i 의 크기는 SOC 변화에 따라 비선형적으로 변화하며,

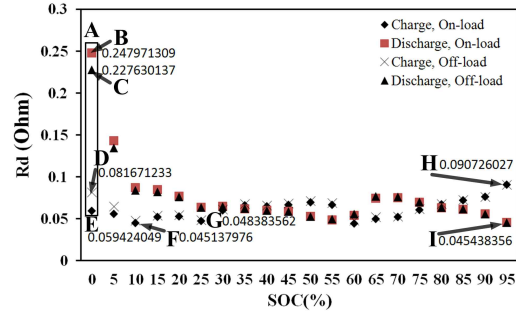


Fig. 5 Variations of the parameter R_d with SOC, charge/discharge mode, on-load/off-load condition

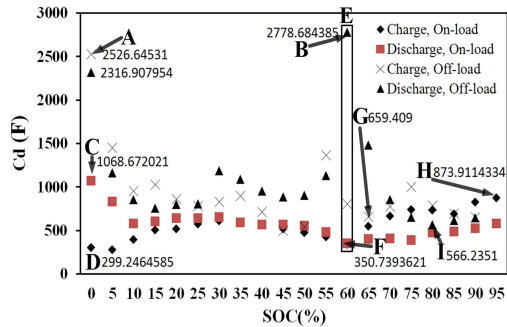


Fig. 6 Variations of the parameter C_d with SOC, charge/discharge mode, on-load/off-load condition

충·방전 모드 변화에 대한 R_i 값의 차이는 점 C에서 최대 변화폭 0.006(Ω)을 갖는다.

그림 5는 SOC 크기, 충·방전 모드, 부하전류 유·무에 따른 R_d 의 크기이다. 온로드 상태의 충전모드에서 R_d 는 SOC 95(%)인 점 H에서 최대값 0.09007(Ω), SOC 10(%)인 점 F에서 최소값 0.04513(Ω), 평균값 0.06089(Ω)을 갖는다. 방전모드에서 R_d 는 SOC 0(%)인 점 B에서 최대값 0.24797(Ω), SOC 95(%)인 점 I에서 최소값 0.0454(Ω), 평균값 0.0773(Ω)을 갖는다.

충전모드에서 오프상태로 전환되었을 경우, R_d 는 SOC 0(%)인 점 D에서 최대값 0.0816(Ω), SOC 25(%)인 점 G에서 최소값 0.0483(Ω), 평균값 0.0638(Ω)을 갖는다. 방전모드에서 오프상태로 전환되었을 경우, R_d 는 SOC 0(%)인 점 C에서 최대값 0.2276(Ω), SOC 95(%)인 점 I에서 최소값 0.0454(Ω), 평균값 0.076(Ω)을 갖는다. R_d 의 크기는 SOC 크기, 충·방전 모드, 부하전류 유·무에 따라 다른 값을 갖으며, 부하전류 유·무에 대한 R_d 값의 차이는 점 A에서 최대 변화폭 0.02(Ω)을 갖는다.

그림 6은 SOC, 충·방전 모드, 부하전류 유·무에 따른 C_d 의 크기이다. 온로드 충전모드에서 C_d 는 SOC 95(%)인 점 H에서 최대값 873.9(F), SOC 0(%)인 점 D에서

최소값 299.27(F), 평균값 556.797(F)을 갖는다. 온로드 방전모드에서 C_d 는 SOC 0(%)인 점 C에서 최대값 1068.7(F), SOC 60(%)인 점 F에서 최소값 350.74(F), 평균값 569.11(F)을 갖는다. 충전모드에서 오프상태로 전환되었을 경우, C_d 는 SOC 0(%)인 점 A에서 최대값 2526.6(F), SOC 65(%)인 점 G에서 최소값 659.4(F), 평균값 937.95(F)을 갖는다. 방전모드에서 C_d 는 SOC 60(%)인 점 B에서 최대값 2778.68(F), SOC 80(%)인 점 I에서 최소값 566.24(F), 평균값 1075.88(F)을 갖는다. C_d 의 크기는 SOC 크기와 충·방전 모드에 따라 다른 값을 갖으며, 부하전류 유·무에 대한 C_d 값의 차이는 점 E에서 최대 변화폭 2727.9(F)을 갖는다.

4. 히스테리시스 현상

배터리 충·방전 과정에서 SOC 크기에 대한 전압 V_{oc} 크기는 그림 7과 같은 히스테리시스 특성을 보인다.^[10] 히스테리시스 곡선은 운전점 A→B→A와 같이 완전 충전점 A에서 완전 방전점 B로 이동하는 완전 충·방전 동작에 의한 히스테리시스 메이저루프(Hysteresis Major Loop)와, 운전점 A→C→D→E와 같이 부분 충·방전 동작에 의해 형성되는 히스테리시스 마이너루프(Hysteresis Minor Loop)가 있다. 메이저루프 내부에 존재하는 마이너루프는 배터리 운전 조건에 따라 다르게 나타난다.^[10]

전기자동차나 하이브리드 자동차에서 사용되는 배터리는 완전 충·방전 동작보다는 부분 충·방전 동작 조건에서 구동되므로 히스테리시스 마이너루프 특성을 고려해야 SOC 추정 오차를 감소시킬 수 있다.

그림 8은 SOC - V_{oc} 곡선의 기울기에 따른 SOC 추정 오차를 나타낸다. 영역 1에서 SOC - V_{oc} 곡선의 기울기는 상대적으로 작으며, SOC 값은 V_{oc} 의 변동에 큰 영향을 받는다. 영역 2에서 SOC - V_{oc} 곡선의 기울기는 상대적으로 크며, V_{oc} 변동에 대한 SOC 값의 변화량은 상대적으로 크지 않다.

그림 9는 그림 8의 영역 1을 확대한 그래프이다. SOC 20(%)인 C점에서 SOC 30(%)인 D점으로 부분 방·충전 동작을 히스테리시스 메이저루프, 평균값 및 히스테리시스 마이너루프를 고려하여 SOC - V_{oc} 곡선을 표시하였다. SOC 30(%)인 D점에서 V_{oc} 는 히스테리시스 메이저루프 평균값 3.7769(V), 히스테리시스 메이저루프 방전 모드 3.7659(V), 메이저루프 충전모드 3.7854(V), 히스테리시스 마이너루프 3.77(V)의 4개 값이 존재한다.

5. 칼만 필터를 이용한 SOC 추정

칼만 필터 추정기의 구현을 위한 이산 상태공간 방정식은 식 (4), (5)와 같다.

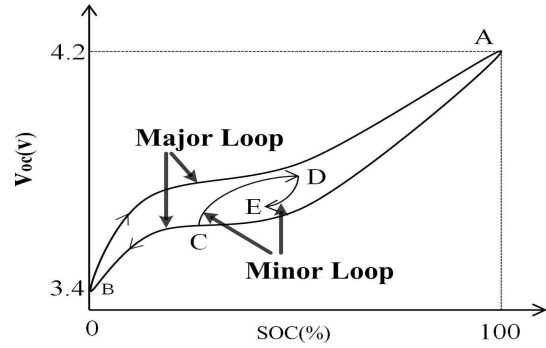


Fig. 7 Hysteresis major-loop and minor-loop

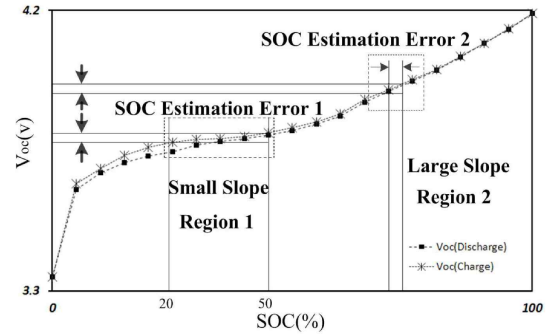


Fig. 8 SOC estimation error with a slope of the SOC - V_{oc} curve

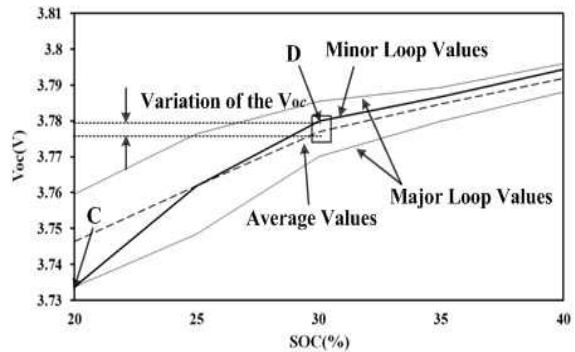


Fig. 9 V_{oc} variation with the hysteresis effect

$$\begin{bmatrix} V_{oc,k} \\ V_{d,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & (1 - \frac{\Delta t}{R_{d,k-1}C_{d,k-1}}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{oc,k-1} \\ V_{d,k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{C_{b,k-1}} \\ \frac{\Delta t}{C_{d,k-1}} \end{bmatrix} i_{t,k-1} + \omega_{k-1} \quad (4)$$

$$V_{t,k} = V_{oc,k} - V_{d,k} - R_{i,k-1}i_{t,k} + \nu_{k-1} \quad (5)$$

여기서, 프로세스노이즈 ω_k 와 측정노이즈 ν_k 는 서로 독립이고 각각의 평균값은 0, 공분산은 Q_k, R_k 인 가우시안 노이즈이다.

예측과정은 식 (6), (7) 그리고 보정과정은 식 (8), (9), (10)와 같다.

$$\hat{x}_k^- = F_k \hat{x}_{k-1}^- + B_k i_t \quad (6)$$

$$P_k^- = F_k P_{k-1}^- F_k^T + Q_k \quad (7)$$

$$K_k = P_k^- H_k^T [H_k P_k^- H_k^T + R_k]^{-1} \quad (8)$$

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k [y_k - H_k \hat{x}_k^- - D_k i_t] \quad (9)$$

$$P_k^+ = (I - K_k H_k) P_k^- \quad (10)$$

여기서, $\hat{x}_k = [\hat{v}_{oc}, \hat{v}_d]^T$, $u_k = i_t$ 이고, 행렬 F, B, H, D 는 각각 식(11)~(14)과 같으며, SOC 크기, 충·방전 모드, 부하전류 유·무, 히스테리시스 특성에 따라 그 값은 다르게 결정된다.

$$F_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 - \frac{\Delta t}{R_{d,k} C_{d,k}} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$B_k = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{C_{b,k}} & \frac{\Delta t}{C_{d,k}} \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

$$H_k = [1 \quad -1] \quad (13)$$

$$D_k = R_{i,k} \quad (14)$$

기존의 칼만필터를 이용한 SOC 추정 방법은 상태변수로 SOC를 설정하였으나, 본 논문에서는 상태변수를 V_{oc} 로 설정하였다.^{[4][6][8]} 그림 10은 본 논문에서 제안한 칼만필터를 이용한 SOC 추정 방법에 대한 플로우차트(Flow-Chart)이다. 칼만필터는 배터리 전압 V_t 와 전류 i_t 를 측정 후 충·방전 모드와 SOC 값의 크기에 따라서 히스테리시스 메이저루프, 히스테리시스 마이너루프 또는 히스테리시스 평균값 루프 중에서 하나를 선택한다. 그리고, 부하전류 유·무에 따라서 식(4)와 식(5)의 행렬 F, B, H, D의 값을 조정하며, V_{oc} 을 추정하고, SOC- V_{oc} Table을 이용하여 SOC값으로 변환한다.

6. 시뮬레이션 결과 및 분석

리튬-폴리머 배터리의 동작특성을 PSIM 프로그램 상에 구현하기 위해서, 리튬-폴리머 배터리의 전압, 전류, 파라미터 및 히스테리시스 특성을 Table File로 저장하였다. SOC 크기, 충·방전 모드 및 부하전류 유·무에 따른 파라미터 변동과 히스테리시스 특성을 고려한 칼만 필터 SOC 추정기는 PSIM 프로그램 C-Block을 이용하여 구현하였다. 리튬-폴리머 배터리를 SOC 100(%)에서 SOC 20(%)까지 SOC 5(%)씩 방전시킨 후에, SOC 100(%)까지 SOC 5(%)씩 충전시켰으며, 그림 11는 전류 i_t 및 전압 V_t 의 실측 파형이다. 전류 i_t 는 크기 0.73(A), 펄스폭 180(sec.), 주기 3780(s)이며, 전류 i_t 및 전압 V_t 는 각각 1(s)마다 측정하였다.

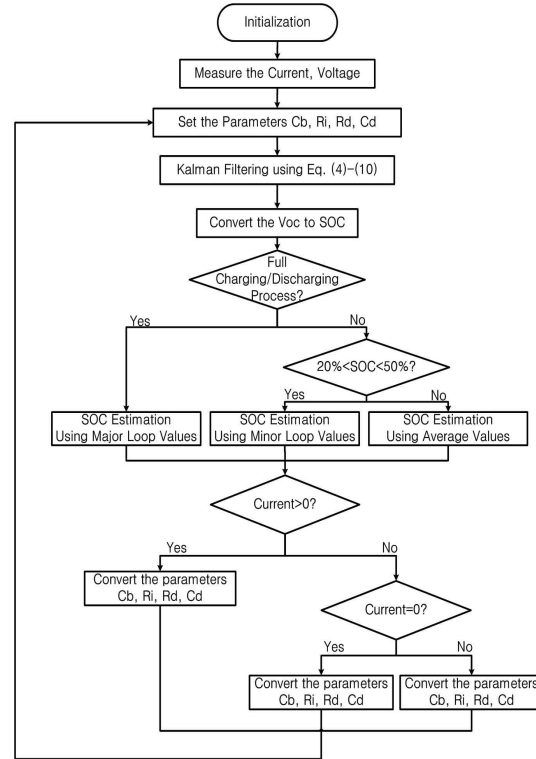


Fig. 10 A flow-chart of the proposed SOC estimation method

6.1 히스테리시스 특성을 고려한 SOC 추정

히스테리시스 특성을 고려한 칼만 필터 SOC 추정기의 성능을 검토하였다. 그림 12는 그림 11과 동일한 조건에서 히스테리시스 메이저루프의 평균값을 이용한 SOC 추정 결과이다. 그림 12-(a)는 SOC 추정 결과이며, 그림 12-(b)는 그림 12-(a)의 영역을 확대한 그래프이다. 히스테리시스 메이저루프를 이용한 SOC 추정 결과는 SOC 30(%) 구간에서 이론값인 Real SOC와 최대 8(%) 오차를 보였다.

그림 13-(a)은 그림 11과 동일한 조건에서 히스테리시스 마이너루프를 이용한 SOC 추정 결과이고, 그림 13-(b)은 그림 13-(a)의 영역을 확대한 그래프이다. 오차는 크게 감소하였으며, SOC 30(%) 구간에서 SOC 추정 오차는 최대 3(%) 정도이다. 그림 12의 히스테리시스 메이저루프의 평균값을 이용한 SOC 추정 결과와 비교하여 SOC 추정 오차가 감소하였음을 확인할 수 있다.

6.2 파라미터 변동을 이용한 SOC 추정

SOC 크기, 충·방전 전류와 부하 전류의 유·무에 따른 파라미터 변동을 고려한 칼만 필터 SOC 추정기를 부하 전류의 유·무에 따라 구분하여 온로드 조건과 오프로드 조건으로 구분하여 결과를 비교·분석하였다.

6.2.1 온로드 조건(On-load Condition)

그림 14는 상수 파라미터를 이용한 SOC 추정 결과와 파라미터 변동을 이용한 SOC 추정 결과의 비교이다.

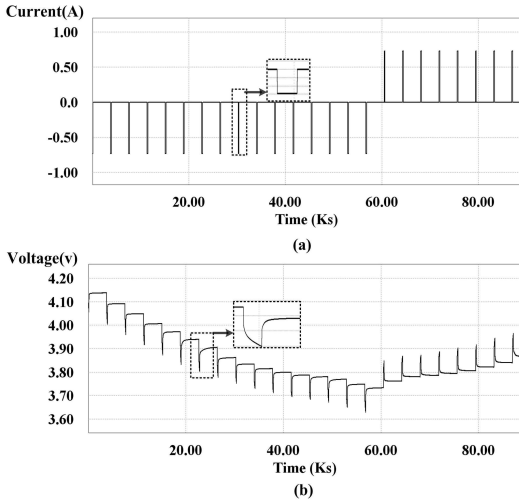


Fig. 11 Current and voltage of the battery (a) Current (b) Voltage

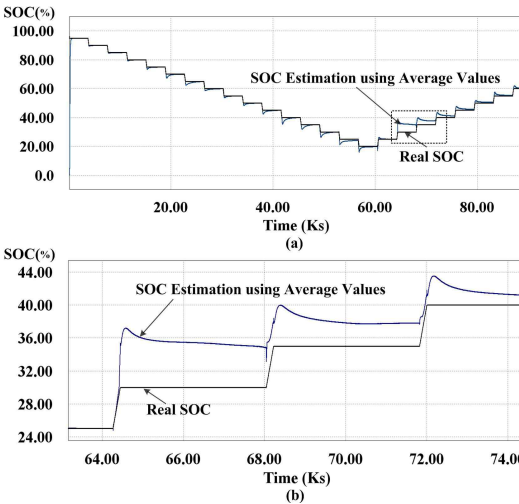


Fig. 12 SOC estimation result using average values (a) All SOC region (b) Zoom-in result

상수 파라미터는 R_i , R_d , C_d , C_b 의 평균값을 사용하였고, 파라미터 변동은 R_i , R_d , C_d 을 변동시키는 경우와 R_i , R_d , C_d , C_b 을 변동시키는 경우로 구분하여 결과를 비교하였다.

상수 파라미터를 이용한 SOC 추정 결과는 약 6(%) 이상의 오차가 존재한다. 파라미터 R_i , R_d 와 C_d 을 변동시켜 SOC를 추정하는 경우, 상수 파라미터를 이용한 SOC 추정 결과에 비해 추정 성능이 약 5(%) 정도 향상됨을 확인할 수 있다. 파라미터 C_b 을 추가적으로 변동시켜 SOC를 추정하는 경우, SOC 추정 성능을 향상됨을 보이나, 부하 전류가 존재하는 상태에서, SOC 추정 성능은 파라미터 C_b 에 의한 영향은 거의 없으며, 과도 상태를 표현하는 파라미터 R_i , R_d 와 C_d 에 큰 영향을 받음을 보인다.

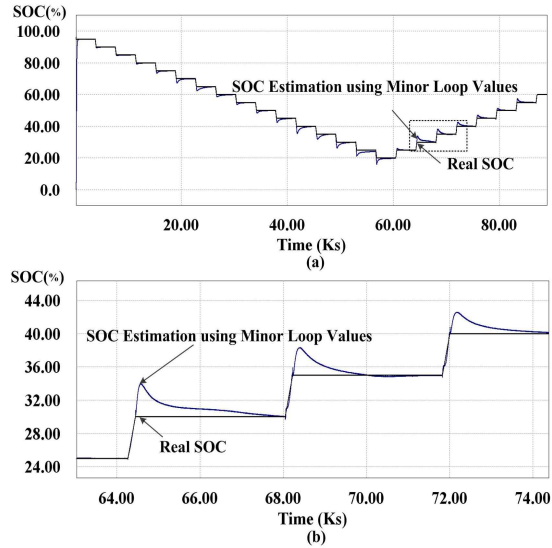


Fig. 13 SOC estimation result using minor loop values (a) All SOC region (b) Zoom-in result

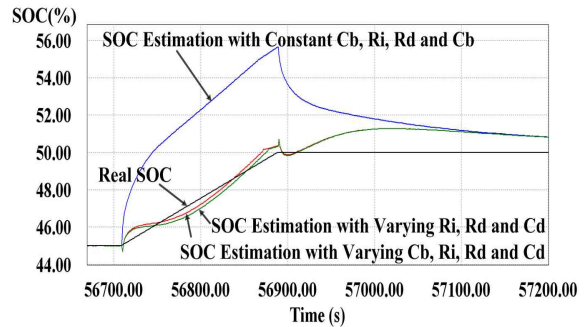


Fig. 14 SOC estimation with varying parameters (on-load condition)

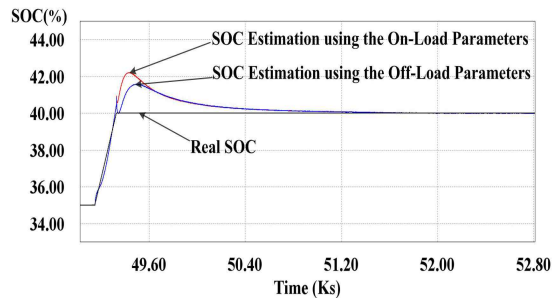


Fig. 15 SOC estimation with varying parameters (off-load condition)

6.2.2 오프로드 조건(Off-load Condition)

부하전류 유·무에 따른 파라미터 R_d , C_d 의 차이는 SOC 추정 결과에 영향을 미친다. 그림 15는 오프로드 상태에서, 온로드 파라미터를 이용한 실시간 SOC 추정 결과와 오프로드 파라미터를 이용한 SOC 추정 결과이다. 부하 전류 유·무에 상관없이 온로드 파라미터를 이

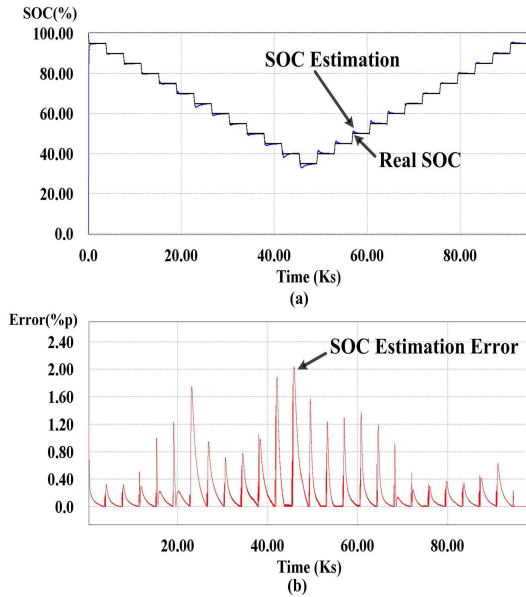


Fig. 16 SOC estimation using the proposed method
(a) SOC estimation result (b) SOC estimation error

용하는 것보다, 무부하 상태에서 오프로드 파라미터를 이용하면, SOC 추정 성능이 모든 SOC 영역에서 최대 약 1% 향상됨을 보인다. 그러나, 그림 15의 SOC 영역에서 여전히 최대 약 1% 추정 오차가 존재하며, 칼만 필터는 실제값에 수렴하기 위해 약 1(Ks)의 시간이 걸림을 확인할 수 있다. SOC 추정 오차의 크기 및 지속시간은 칼만 필터의 수렴 특성이라고 볼 수 없으며, 실제 배터리와 배터리 모델과의 오차에 기인하는 것이다.

6.3 제안된 방법을 이용한 SOC 추정

히스테리시스 특성, SOC 크기, 충·방전 모드와 부하 전류의 유·무의조건에 따른 파라미터 변동을 고려한 칼만 필터 SOC 추정기의 성능을 검토하였다. 그림 16-(a)은 온로드 상태 180(s), 오프로드 상태 3600(s)가 반복되면서 SOC는 100(%) - 30(%) - 100(%)의 마이너루프에서 동작하는 조건에서 SOC 값을 추정한 결과이다.

그림 16-(b)은 SOC 추정 오차이다. SOC 추정 오차 Error는 다음 수식 (16)을 통해 얻어진다.

$$Error = SOC_{real} - SOC_{est} \quad (16)$$

여기서, SOC_{real} 는 Ampere-Hour counting 방법과 OCV 방법을 사용한 SOC 값이고, SOC_{est} 는 본 논문에서 제안한 방법을 통해 얻어진 SOC 값이다.

제안된 방법은 온로드 조건에서 SOC 추정오차는 모든 SOC 영역에서 최대 약 1% 미만이며, 오프로드 조건에서 SOC 추정오차는 SOC 30~35(%) 영역에서 최대 약 2(%)임을 보여준다.

7. 결 론

본 연구는, 리튬-폴리머 배터리의 모델링 에러를 분석하여 칼만 필터 기반의 SOC 추정기의 성능을 개선하기 위한 방법을 제안하였고, 성능 검증을 위해, 실측 데이터를 기반으로 칼만필터 SOC 추정기의 PSIM 시뮬레이션을 진행하였다.

히스테리시스 특성, SOC 크기, 충·방전 모드 및 부하 전류 유·무를 고려하여 리튬-폴리머 배터리의 모델링 에러를 분석하였다. 칼만 필터는 히스테리시스 특성, SOC 크기, 충·방전 모드 및 부하전류 유·무를 고려하여 파라미터를 변동하는 방법으로 구현되었다. SOC를 추정한 결과는 온로드 조건에서 오차는 약 1(%)이고, 오프로드 조건에서 약 2(%)이다. 리튬-폴리머 배터리의 전 운전영역에서 SOC 추정 오차는 2(%)이다.

향후, DSP를 이용한 SOC 추정 시스템 구축과 더불어 온도, 습도 및 전류크기 등의 다양한 조건에서 본 논문의 결과에 대한 추가 검증이 필요할 것으로 보인다.

이 논문은 2010학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음

참 고 문 헌

- [1] S. Piller, M. Perrin, and A. Jossen, "Methods for State-of-Charge determination and their applications," *Journal of Power Sources*, Vol. 96, No. 1, pp. 113-120, Jun. 2001.
- [2] Coleman M, Chi Kwan Lee, Chunbo Zhu, Hurley W. G., "State-of-Charge Determination From EMF Voltage Estimation : Using Impedance, Terminal Voltage, and Current for Lead-Acid and Lithium-Ion Batteries," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 54, No. 5, pp. 2550-2557, Oct. 2007.
- [3] Windarko N. A., Jaeho Choi, "SOC Estimation Based on OCV for NiMH Batteries Using an Improved Takacs Model," *Journal of Power Electronics*, pp. 181-186, Feb. 2011.
- [4] J. Lee, O Nam, B. H. Cho. "Li-ion battery SOC estimation method based on the reduced order extended Kalman filtering," *Journal of Power Sources*, Vol. 174, No. 1, pp. 9-15, Jun. 2007.
- [5] F. Zhang, G. Liu, L. Fang, "A battery State of Charge estimation method with extended Kalman filter," *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 1008-1013, July 2008.
- [6] A. Vasebi, et. al., "A novel combined battery model for state-of-charge estimation in lead-acid batteries based on extended Kalman filter for hybrid electric vehicle applications," *Journal of Power Sources*, Vol. 174, pp. 30-40, Nov. 2007.
- [7] Kiwook Jang, Gyo-Bum Chung, "A Study On The Battery SOC Estimation Based On Kalman Filtering Using LabVIEW," *Annual Fall Conference Proceedings*

of The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, pp.321-322, 2010. 9.

- [8] Windarko, N.A, Jaeho Choi, Gyo-Bum Chung, "SOC estimation of LiPB batteries using Extended Kalman Filter based on high accuracy electrical model," *IEEE International Conference on Power Electronics and ECCE Asia*, pp. 2015-2022, May. 2011.
- [9] Kiwook Jang, Hyeok-Jin Kim, Gyo-Bum Chung, "Comparison of Battery Modelings and SOC Estimation Methods," *Annual Summer Conference Proceedings of The Korean Institute of Power Electronics*, pp. 87-88, 2010. 7
- [10] Feng Xuyun, Sun Zechang, "A battery model including hysteresis for State-of-Charge estimation in Ni-MH battery," *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 1-5, 3-5 Sep. 2008.



장기욱(張淇旭)

1981년 7월 9일생. 2009년 홍익대 전자·전기공학과 졸업. 2012년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2012년~현재 LG Chem. Battery 연구소 연구원.



정교범(鄭敎範)

1959년 12월 20일생. 1983년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 Univ. of Florida(공박). 1992년~1993년 Virginia Tech (Post Doc.). 1993년~1995년 한국전기연구소 선임연구원. 1995년~현재 홍익대 전자·전기공학과 교수.