

단일 확장 칼만 필터를 이용한 리튬배터리의 SOC 및 SOH 추정법

고영휘, 최우진
 숭실대학교 전기공학과

SOC and SOH Estimation Method for the Lithium Batteries Using Single Extended Kalman Filter

Younghwi Ko, Woojin Choi
 Department of Electrical Engineering, Soongsil University

ABSTRACT

전기자동차(EV)뿐만 아니라 ESS(Energy Storage System) 등의 사용량이 증가하면서 리튬이온배터리의 중요성은 점점 커지고 있다. 리튬 이온 배터리의 정확한 상태를 추정하는 것은 배터리의 안전하고 신뢰성 있는 작동을 위해 매우 중요하다. 본 논문에서는 AEKF(Adaptive Extended Kalman Filter)를 이용한 배터리 파라미터와 충전상태(SOC, State of Charge)를 추정하고, 이를 활용하여 배터리의 건강상태(SOH, State of Health)를 추정하는 간단한 알고리즘을 제시한다. AEKF에 파라미터 값을 적용하여 SOC를 추정하고, 추정된 SOC값과 전류 적산을 이용하여 SOH를 추정한다. SOC 오차에 따른 SOH 추정 값의 편차는 SOC 연산 간격을 늘리고 가중치 필터를 적용하여 최소화시킴으로써 결과의 정확성을 향상했다. 다양한 자동차의 표준 주행 패턴을 적용한 실험을 통해 제안된 방법을 이용하여 얻어진 SOH 추정 결과는 RMSE(Root Mean Square Error) 1.428% 이내임을 검증하였다.

1. 서론

최근 환경규제에 따라 전기자동차(EV, Electric Vehicle)의 사용이 확대되고 있고, 전력 사용량 피크 저감용으로 ESS(Energy Storage System)의 사용이 증대되고 있다. EV의 주행 가능 거리의 최대화 및 ESS의 합리적이고 효율적인 운영을 최적화 하기 위해서는 배터리의 SOC와 SOH를 정확히 추정하는 것이 필수적이다. SOC의 추정 방법으로는 전류적산법, 확장 칼만 필터, 파티클 필터, 옵저버 등 다양한 방법들이 있다 [1]. 전류적산법은 전류를 적산하여 배터리의 SOC를 추정하는 방법인데 측정 전류 값에 포함된 오차가 전류 적산 시간이 길어질수록 누적되어 SOC 추정오차가 커지는 단점이 있으며, 이를 보완하기 위해 OCV(Open Circuit Voltage)를 이용하여 주기적인 리셋을 실시해야 하는 불편함이 있다. 따라서, 이러한 전류 적산 에러에 영향을 받지 않는 확장 칼만 필터, 파티클 필터, 옵저버 등의 방식이 선호된다. SOH 추정 방법으로는 전류적산법, 이중 확장 칼만 필터 등이 있다[2]. 전류적산법은 배터리를 완전충전 및 완전방전을 진행하여 용량을 측정하는 방법이나 실제 사용 중인 시스템에서의 시행은 거의 불가능하며, 긴 시간과 많은 에너지 소비를 전제로 한다. 이중 확장 칼만 필터를 이용하는 방식은 사용 중인 배터리의 완전 충전 및 방전 없이 SOH를 추정하는 것이 가능하나 SOH를 추정하는 데에 최소 100시간 이상의 시간이 소요되기 때문에 실용적인 사용이 어렵다[2].

본 논문에서는 단일 확장 칼만 필터를 이용하여 SOC와 SOH를 빠르고 간단하게 추정할 수 있는 새로운 방법을 제시한다. 단일 확장 칼만 필터로 실시간 SOC를 추정하며, 전류적산법과 추정된 SOC 데이터를 이용하여 SOH를 추정하는 알고리즘을 구현하였다. 또한, 가중치 필터를 적용하여 SOC의 오차가 커지는 경우에도 정확하게 SOH를 추정할 수 있도록 하였다. 제안된 알고리즘은 매우 간단하고 연산량이 적어 많은 배터리 셀들로 구성된 EV와 ESS의 개별 셀의 상태를 정확하게 추정하는 응용에 적용이 가능하다.

2. 단일 확장 칼만 필터를 이용한 리튬배터리의 SOC & SOH 추정

2.1 AEKF(Adaptive Extended Kalman Filter)를 이용한 리튬배터리의 SOC 추정

먼저 제안된 방식을 이용하여 배터리의 SOH를 추정하기 위해서는 정확한 SOC의 값의 추정이 요구된다. 본 논문에서는 널리 알려진 AEKF(Adaptive Extended Kalman Filter)를 이용하여 자동차의 주행 패턴을 이용하여 얻어진 전류 프로파일을 이용하여 배터리를 구동시킨 후 측정된 전압 및 전류 값을 통해 SOC를 추정한다. 이때 정확한 SOC-OCV 커브를 이용하는 것이 중요하며, SOC-OCV 커브는 매 5% 구간마다 측정된 데이터를 사용했다. 이후 SOC-OCV 커브는 다항식을 이용하여 한번에 커브 피팅하여 이용할 수 있으나 본 논문에서는 구간 선형화법을 적용하여 오차를 줄였다. 적용된 구간 선형화법은 Cubic Hermite 방법으로 원함수의 모양과 단조함수를 보존하기 위해 마지막 점의 기울기를 정한 3차 다항식이다.

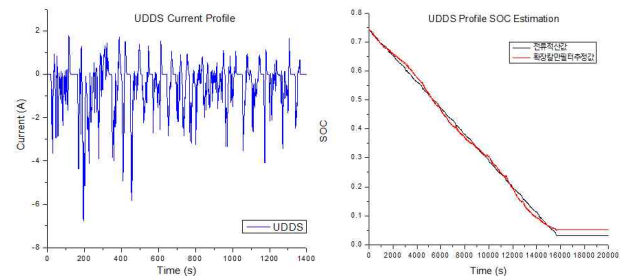


그림 1 UDDS 전류프로파일 및 SOC 추정 결과
 Fig. 1 UDDS Current profile and SOC estimation results

7차 다항식을 이용한 SOC-OCV 곡선 피팅 시 SOC 추정 오차의 RMSE(Root Mean Square Error)는 1.450%이고, Cubic Hermite 보간법 사용 시 RMSE는 1.149%로 줄어든다. 그림 1

은 AEKF와 Cubic Hermite 보간법을 이용하여 추정된 리튬전지의 SOC 추정 결과를 나타낸다.

2.2 제안된 방식을 이용한 리튬배터리의 SOH 추정

먼저 수식 (1)은 전류적산법의 일반식을 나타낸다.

$$SOC_{t_2} = SOC_{t_1} + \frac{\int_{t_1}^{t_2} idt}{C_n} \quad (1)$$

따라서 배터리의 용량은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_n = \frac{\int_{t_1}^{t_2} idt}{SOC_{t_2} - SOC_{t_1}} \quad (2)$$

이때, t_1, t_2 는 전류적산 및 SOC 연산의 단위가 되는 기준 시간의 시점과 종점이다.

수식(2)를 통해 배터리의 용량을 계산하기 위해서는 전류 적산값 및 SOC값이 정확해야 한다. 식 (2)의 분자를 계산하기 위해 사용하는 전류 적산법은 짧은 시간 동안 적용될 경우 에러가 크게 누적되지 않기 때문에 문제가 없다. 여기서 분모의 SOC 값은 AEKF를 통해 정확하게 추정된 값을 사용하여야 한다. 만일 전류 적산값과 추정된 SOC값이 충분히 정확하다면 식 (2)를 통해 SOH를 정확하게 추정할 수 있다. 그러나 추정된 SOC값에는 반드시 오차가 존재하므로 요구되는 SOH 추정 정확도를 확보하기 위해서는 전류 적산의 주기의 최적화 및 추정된 SOH를 이전값과 비교하여 보정하는 과정이 필요하다.

본 논문에서는 가중치 필터를 사용하여 SOC 오차에 따른 급격한 SOH 추정값의 변동을 보정하였다. 기존 SOH값과 새로 추정된 SOH의 분산값을 계산한 후 가중치를 조정하여 최종적인 SOH값을 산정하는 방식이다.

$$P_p = P_e + Q \quad (3)$$

$$C_{n-c} = \frac{R \times C_{n-l} + P \times C_{n-m}}{P_p + R} \quad (4)$$

$$P_e = \frac{P_p \times R}{P_p + R} \quad (5)$$

$$Q = \left\{ \frac{P_p (C_{n-l} - C_{n-m})}{P_p + R} \right\}^2 + P_p - P_e \quad (6)$$

$$R = (C_{n-l} - C_{n-m})^2 - P_p \quad (7)$$

여기서, P는 SOH 값의 분산을, Q는 예측 오차에 대한 분산을, R은 측정 오차에 대한 분산을 의미하며, p 는 예측값을, e 는 추정값을, m 은 측정값을, l 은 기준값을 의미한다. 측정값과 추정값의 공분산을 통해 가중치를 결정하여 SOH 추정의 정확성을 높인다.

3. 자동차용 실주행 패턴을 이용한 실험 및 분석

이 논문에서는 SAMSUNG-SDI-18650 리튬이온배터리 (3.6V, 2.85Ah)를 사용하여 실험을 진행하였다. 실험에서 사용된 충·방전 프로파일은 자동차 주행 패턴으로부터 역 계산된 배터리 전류의 프로파일이며 그림 2와 같다. 즉, 자동차 주행 프로파일의 시간-속도 그래프로부터 차량의 운동에너지를 계산하고 이를 다시 전기에너지로 변환한 후 각 셀의 충·방전 전

류로 환산한다. 이 전류 데이터를 이용하여 전자부하를 제어함으로써 배터리를 구동하고 전압·전류 프로파일을 취득한다. 실험에서는 UDDS(Urban Dynamometer Driving Cycle), HWFET(Highway Fuel Economy Test)의 두 가지 자동차 주행 프로파일을 반복하면서 리튬배터리의 SOC 및 SOH를 추정한 결과를 나타내었다.

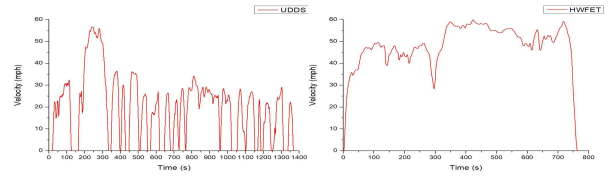


그림 2 동력계 구동 사이클(UDDS, HWFET)
Fig. 2 Dynamometer Driving Cycle(UDDS, HWFET)

그림 3, 4는 각 프로파일별 SOC 및 SOH 추정 결과이며, SOH는 1800초 및 3600초 주기로 계산한다. 표 1과 그림 5, 6은 각 프로파일별 SOC의 추정 오차와 SOH 추정 오차를 가중치 필터 적용 전후 및 SOH 추정 주기로 나누어 보여준다. 이때, SOC의 추정 오차가 클수록 SOH 연산 오차가 커지는 것으로 보아, SOC의 추정 오차가 SOH의 연산 오차로 직결되는 것을 알 수 있다. 그림에서 보듯이 가중치 필터를 적용하는 경우 SOH 추정 오차가 대략 1/3 이하로 감소하는 것을 볼 수 있으며, 최대 88.4%까지 감소한다. 또, SOH 추정 주기가 3600초로 길어질 때도 SOH 추정 오차가 대략 1/3 이하로 감소하는 것을 볼 수 있으며, 최대 72.3%까지 감소한다.

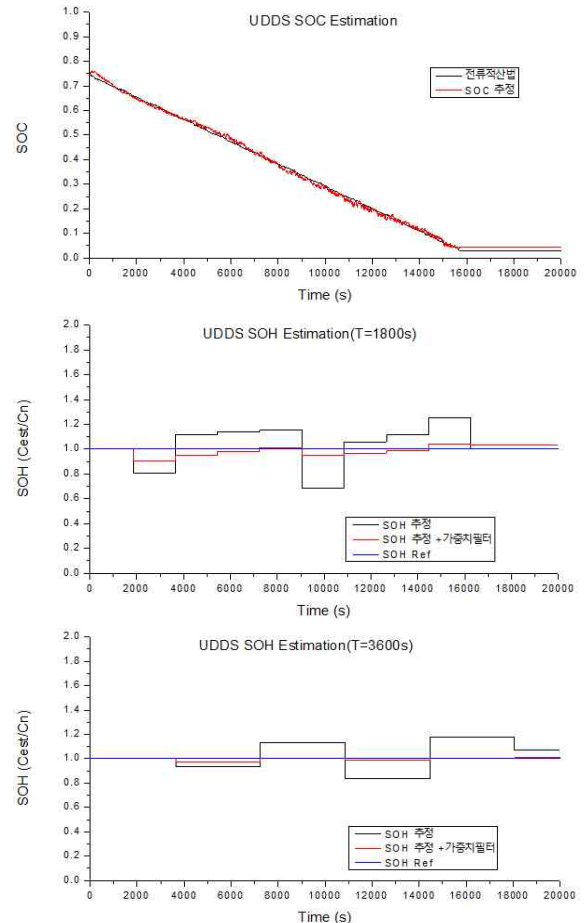


그림 3 제안된 방식의 SOC & SOH 추정 결과 (UDDS)
Fig. 3 Proposed SOC & SOH Estimation Results (UDDS)

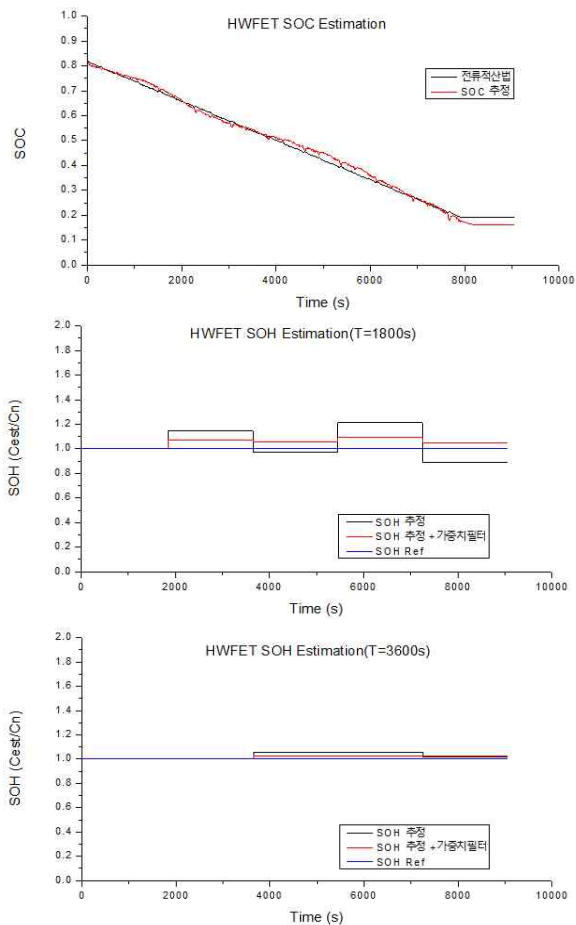


그림 4 제안된 방식의 SOC & SOH 추정 결과 (HWFET)
Fig. 4 Proposed SOC & SOH Estimation Results (HWFET)

표 1 AEKF 방식에 의한 SOC 추정 오차
Table 1 SOC Estimation Error by AEKF

DDC	오차(%)	RMSE(%)
UDDS	-3.407 ~ 3.076	1.149
HWFET	-3.551 ~ 3.394	1.670

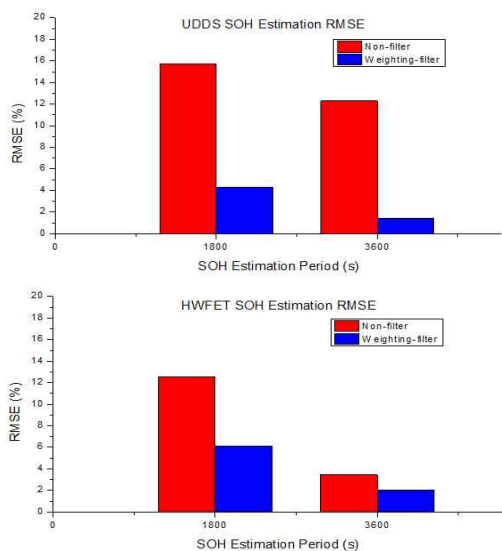


그림 5 제안된 방식의 SOC & SOH 추정 RMSE (HWFET)
Fig. 5 Proposed SOC & SOH Estimation RMSE (HWFET)

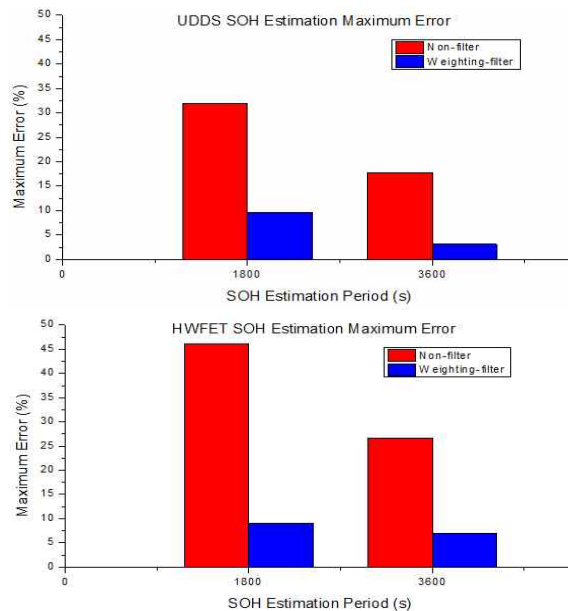


그림 6 제안된 방식의 SOC & SOH 추정 최대 오차 (HWFET)
Fig. 6 Proposed SOC & SOH Estimation Maximum Error (HWFET)

4. 결론

본 논문에서는 단일 확장 칼만 필터를 이용하여 리튬배터리의 SOC 및 SOH를 추정하기 위한 간단한 알고리즘에 관해 제안하고 그 결과를 시험을 통해 검증하였다. 본 방식은 기존의 이중 확장 칼만 필터를 사용하여 SOC와 SOH를 추정하던 방법에 비해 훨씬 간단하여 연산량을 줄일 수 있다. 따라서 EV나 ESS와 같이 많은 수의 셀들을 사용하는 시스템에 적용할 수 있다. 또한, SOC의 추정 에러에 의해 발생하는 SOH의 편차를 가중치 필터의 적용을 통해 줄여서 SOH 추정 정확성을 향상했다. 또, SOC 연산 간격을 늘려서 SOC 추정 에러의 영향을 극소화 시켰으며, 이를 통해 SOH 추정을 수행함으로써 SOH의 추정 정확성을 더욱 향상했다. SOH의 추정 정확성은 SOC 에러와 연산 간격의 영향을 받기 때문에 SOC 추정 정확성을 높이고 최적의 SOC 연산 간격을 제시하며 SOH 추정 편차를 줄일 수 있는 적합한 필터를 적용함으로써 실용화 가능한 알고리즘을 개발할 계획이다.

참고 문헌

- [1] Saeed Sepasi, "Inline state of health estimation of lithium-ion batteries using state of charge calculation", Journal of Power Sources Volume 299, 20 December 2015, Pages 246-254..
- [2] Ngoc-Tham Tran, "State of Charge and State of Health Estimation of AGM VRLA Batteries by Employing a Dual Extended Kalman Filter and an ARX Model for Online Parameter Estimation", Energies 2017, 10(1), 137
- [3] Dong Xile, "Evaluation of SOC Estimation Method Based on EKF/AEKF under Noise Interference", Energy Procedia 152(2018) 520-525