

리튬 인산 철 배터리의 OCV 곡선 특성을 고려한 확장 칼만 필터 기반 SOC 추정 알고리즘

김현석, 김도현, 임중현, 김동환, 이병국[†]
 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Extended Kalman Filter-based SOC Estimation Algorithm Considering the OCV Curve Characteristic of LFP Batteries

Hyun Seok Kim, Do Hyeon Kim, Jong-Hun Lim, Dong Hwan Kim and Byoung Kuk Lee[†]
 Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문은 전기자동차용 리튬 인산 철 배터리의 확장 칼만 필터 기반 실시간 SOC 추정 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 리튬 인산 철 배터리 OCV 곡선의 변화 경향을 분석하고, 기울기 변화율에 따라 칼만 필터의 파라미터를 선정하여 실시간 SOC를 추정한다. 제안하는 알고리즘의 유효성을 검증하기 위하여 전기자동차용 주행 프로파일을 기반으로 리튬 인산 철 배터리의 실험 및 시뮬레이션을 진행한다.

1. 서론

리튬 인산 철 배터리는 높은 열적 안정성과 내구성을 보이기 때문에 현재 전기자동차 등 다양한 어플리케이션에 동력원으로서 적용되고 있다. 이러한 리튬 인산 철 배터리의 안전한 운용을 위해서는 배터리 상태를 나타내는 지표(예: SOC, State-of-Charge)를 정확하게 추정하는 것이 중요하며, 그중에서도 충전 상태 (SOC, State-of-Charge)는 전기자동차의 운행 시간에 직접적인 영향을 미치므로 높은 추정 정확도가 요구되고 있다.

기존에는 전류 적산법을 통해 실시간으로 SOC를 추정했으나, 센싱 과정에서 발생하는 오차 누적으로 장기간 운용 시 추정 정확도가 감소하는 한계가 존재한다^[1]. 이를 개선하기 위해 휴지 구간에서 개방 회로 전압 (OCV, Open Circuit Voltage)을 기반으로 SOC를 초기화하는 방안이 제안되었다. 그러나 리튬 인산 철 배터리는 평탄한 OCV 곡선 구간을 가지기 때문에 높은 초기화 정확도를 보장하기 어렵다.

따라서 본 논문에서는 리튬 인산 철 배터리의 OCV 곡선의 기울기 변화에 따라 확장 칼만 필터의 오차 공분산 (R, Q)를 선정하여 SOC를 추정하는 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 OCV 곡선의 미분을 통해 기울기가 크게 변화하는 구간을 분석하여 각 구간별 확장 칼만 필터의 오차 공분산 (R, Q)를 선정한다. 제안하는 알고리즘의 유효성을 검증하기 위해 전기자동차용 주행 프로파일 기반 실험 데이터를 이용하여 SOC 추정 정확도를 비교 및 분석한다.

2. OCV 곡선 특성 기반 SOC 추정 알고리즘

2.1 OCV 곡선 기울기 변화량 분석

본 논문에서는 OCV 곡선 특성을 기반으로 SOC를 추정한다. 그림 1 (a)는 리튬 인산 철 배터리의 OCV 곡선을 나타내

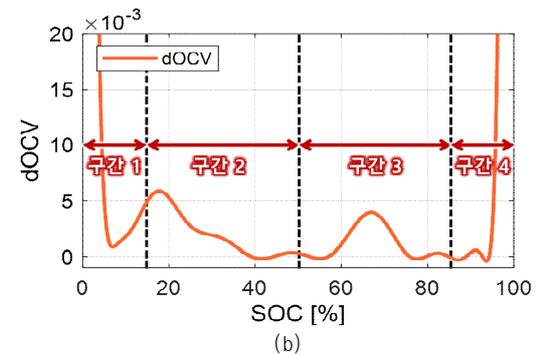
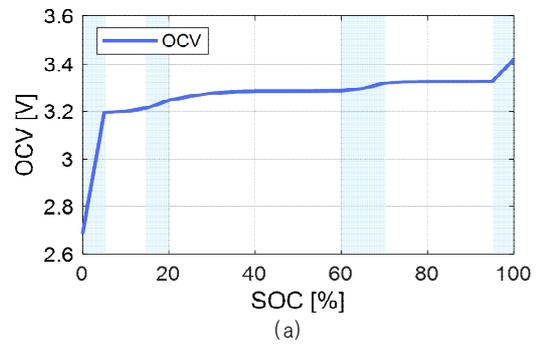


그림 1 리튬 인산 철 배터리의 OCV 특성 : (a) 리튬 인산 철 배터리의 SOC-OCV 곡선 (b) 리튬 인산 철 배터리의 OCV 미분 곡선

Fig. 1 OCV characteristic of LFP battery : (a) SOC-OCV curve of LFP battery (b) Differential OCV curve of LFP battery

며, SOC가 5% 이하일 때와 95% 이상일 때 OCV가 급격히 변하는 것을 확인할 수 있다. 또한, SOC 20% 지점과 70% 지점에서 기울기의 변화가 발생한다. 그림 1 (b)는 리튬 인산 철 배터리의 OCV 미분 곡선으로, 총 4개의 구간(100% ~ 85%, 85% ~ 50%, 50% ~ 15%, 15% ~ 0%)에서 OCV의 미분값이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 OCV 곡선의 기울기가 변하는 지점을 바탕으로 4개의 SOC 구간을 설정한다.

2.2 OCV 곡선 기울기 기반 SOC 추정 알고리즘

제안하는 SOC 추정 알고리즘은 그림 2와 같이 구성된다. 우선, SOC 구간에 따라 확장 칼만 필터의 오차 공분산 (R, Q) 값을 설정한다. 추정 단계에서는 이전 추정값과 입력 변수를 바탕으로 SOC를 예측한다. 이때, 추정하고자 하는 상태 변수 x 를 비선형 함수로 정의한 후, 미분을 통해 선형화된 시스템 모델을 도출한다. 보정 단계에서는 예측된 값과 측정된 값을 비

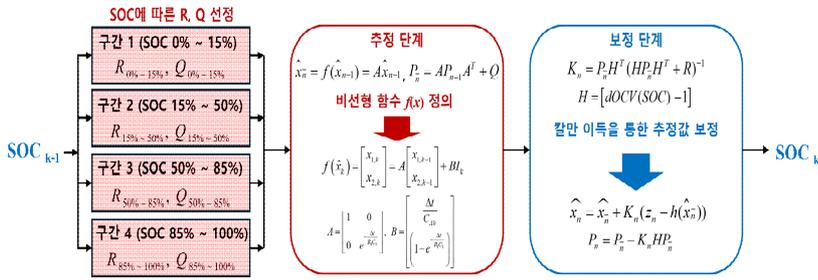


그림 2 제안하는 알고리즘 순서도
Fig. 2 Proposed algorithm flowchart

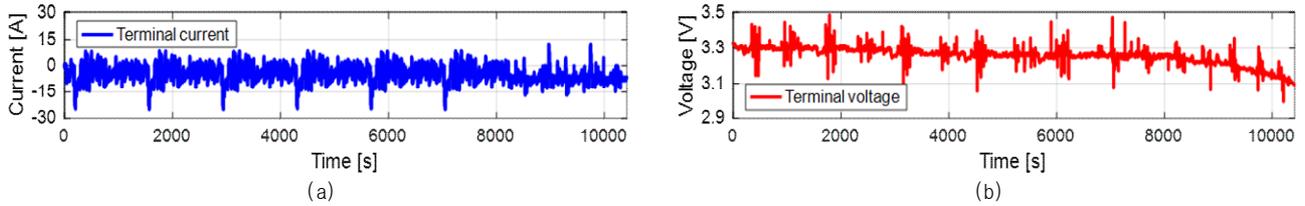


그림 3 배터리 전류, 단자 전압 프로파일 : (a) 배터리 전류 (b) 배터리 단자 전압
Fig. 3 Battery current and terminal voltage profile : (a) Battery Current (b) Battery terminal voltage

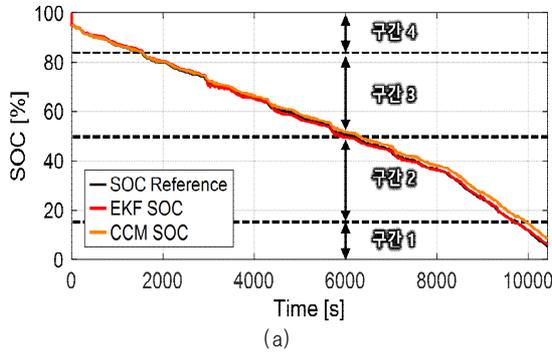


그림 4 확장 칼만 필터 기반 SOC 추정 알고리즘 적용 결과
Fig. 4 Result of EKF-based SOC estimation algorithm

교하여 오차를 계산하고, 칼만 이득을 통해 SOC를 보정한다. 이때, 상태 변수와 출력 변수의 관계는 행렬 H 를 통해 정의된다. 정확한 SOC 추정을 위해 오차 공분산 행렬 (R, Q)를 적절히 설정하여 시스템의 응답 특성을 조절할 수 있다. SOC 추정 알고리즘에서는 R 값이 큰 경우 예측값의 반영 비율이 증가하게 되어 확장 칼만 필터 모델을 기반으로 SOC를 추정한다. 반대로 Q 값이 큰 경우 출력 변수의 반영 비율이 증가하여 전류 적산을 기반으로 SOC를 추정한다.

2.3 알고리즘 적용 결과

제안하는 알고리즘의 유효성을 검증하기 위해 표 1의 사양을 갖는 리튬 인산 철 배터리에 전기자동차용 주행 프로파일을 적용하였다. 그림 3 (a)는 전기자동차용 주행 프로파일을 인가하였을 때 단자 전류를 나타내고, (b)는 단자 전압을 나타낸다. 확장 칼만 필터 기반 알고리즘을 적용하여 SOC를 추정한 결과는 그림 4와 같이 나타난다. 또한, 표 2는 전류 적산 알고리즘과 확장 칼만 필터 기반 알고리즘을 적용했을 때 SOC 추정 오차와 구간별 RMSE (Root mean squared error)를 나타낸다. SOC 추정 오차의 경우, 전류 적산 알고리즘 적용 시 SOC 추정 오차 3.13%가 발생했다. 반면, 확장 칼만 필터 기반 알고리즘 적용 시 SOC 추정 오차가 0.81%로 전류 적산 대비 SOC 추정 오차를 2.32% 감소시켰음을 알 수 있다. 구간별 RMSE의

표 1 배터리 셀 데이터

Table 1 Data of battery cell

Parameter	Value	Unit
Battery Type	LFP	-
Package Type	Pouch cell	-
Nominal Capacity	15	Ah
Nominal Voltage	3.2	V
Voltage Range	2.5 ~ 3.7	V
Maximum Current	200	A

표 2 SOC 추정 오차 및 구간별 RMSE

Table 2 SOC estimation error and RMSE per segment

	전류 적산 알고리즘	확장 칼만 필터
구간 1 RMSE	2.67%	0.25%
구간 2 RMSE	2.03%	0.26%
구간 3 RMSE	0.96%	0.63%
구간 4 RMSE	0.13%	0.55%
전체 구간 RMSE	1.53%	0.50%
종료 시점 오차	3.13%	0.81%

경우, 구간 4에서는 확장 칼만 필터 기반 알고리즘이 전류 적산 알고리즘보다 RMSE가 크게 나타났지만, 나머지 구간에서는 전류 적산 알고리즘의 오차 누적으로 인해 확장 칼만 필터 기반 알고리즘이 RMSE가 더 낮은 것을 확인할 수 있다. 이를 통해, 제안하는 알고리즘 적용 시 리튬 인산 철 배터리의 OCV plateau 특성을 반영하여 SOC를 높은 정확도로 추정할 수 있음을 확인하였다.

3. 결론

본 논문은 확장 칼만 필터 기반 리튬 인산 철 배터리의 SOC 추정 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 OCV 곡선의 기울기 변화에 따라 확장 칼만 필터의 오차 공분산을 선정하여 SOC를 추정한다. 확장 칼만 필터 기반 SOC 추정 알고리즘 적용 시 SOC 추정 오차는 0.81%로 기존 전류 적산 알고리즘 대비 2.32% 더 높은 추정 정확도를 갖는 것을 확인하였다. 또한, 구간 4를 제외한 모든 구간에서 제안하는 알고리즘이 더 높은 추정 정확도를 갖는 것을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] Yujie Wang, Jiaqiang Tian, Zhendong Sun, Li Wang, Ruilong Xu, Mince Li, Zonghai Chen, "A comprehensive review of battery modeling and state estimation approaches for advanced battery management systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 131, October, 2020.