

실시간 동적 주행 통신 데이터 기반 적응형 확장 칼만 필터 적용 전기자동차 SOC 추정 고도화 연구

공태현, Ekuewa Oluwaseun Isaiah, 하태빈, 이재혁, 손찬양, 김종훈*

충남대학교

xogus8948@naver.com, *whdgns0422@cnu.ac.kr

Advanced SOC estimation for electric vehicles applying a real-time dynamic driving communication data-based adaptive extended Kalman filter

Taehyeon Gong, Ekuewa Oluwaseun Isaiah, Taebin Ha,

Jaehyuk Lee, Chanyang Son Jonghoon Kim*

Chungnam University*

요약

본 논문은 전기자동차(EV)의 실주행 환경에서 급가속 및 센서 노이즈로 인해 발생하는 SOC 추정 오차를 해결하고자 OBD 데이터를 활용한 적응형 확장 칼만 필터를 제안한다. 제안된 알고리즘은 추정 잔차(Residual)를 반영하여 잡음 공분산을 실시간으로 갱신하고, OCV 기율기 특성에 따라 전압 관측 신뢰도를 조정하는 이중 적응 기법을 적용했다. 실제 주행 데이터 검증 결과, 해당 기법은 기존 EKF 대비 최대 오차 1.627%, RMSE 0.363%로 성능을 획기적으로 개선하였다. 결과적으로 다양한 운행 조건에서도 높은 정밀도를 유지하는 강인하고 실용적인 SOC 추정 전략을 제시한다.

I. 서론

전기자동차(Electric Vehicle; EV)의 배터리 상태 추정은 차량-단말-클라우드가 연결되는 커넥티드 구조에서 운영 효율과 안전성을 좌우하는 핵심 데이터 기술로 확장되고 있다. 특히 운행기록 자기진단 장치(On-Board Diagnostics; OBD) 및 계측 제어 통신망(Controller Area Network; CAN)의 대규모 실주행 데이터 기반 클라우드형 배터리 관리 시스템(Battery Management System; BMS)으로의 전환이 가속화되고 있다. 이때 충전 상태(State Of Charge; SOC)는 가장 기본적 변수로서 통신 및 센서 변화에 강인한 추정이 요구된다. 기존 확장 칼만 필터(Extended Kalman Filter; EKF)는 공분산 고정으로 실주행 환경에서는 취약점을 드러낼 수 있다. 이에 잔차로 공분산을 갱신해 정확도를 높이는 적응형 확장 칼만 필터(Adaptive Extended Kalman Filter; AEKF) 연구가 활발히 보고되고 있다. 본 논문은 실주행 데이터와 AEKF에 $dSOC/dOCV$ 민감도 스케줄링을 결합한 SOC 오차 저감 방법을 제안한다. 이는 급변하는 조건에서 오차 누적과 과도 보정을 완화해 EKF 대비 개선된 정량적 효과를 제시하고자 한다.

II. 본론

그림 1은 본 연구에서 구축한 OBD-II 기반의 EV 배터리 데이터 수집 시스템의 구성을 나타낸다. 해당 시스템은 OBD-II를 통해 차량 CAN 통신망에 접속하여 배터리 팩 전압 및 전류 데이터를 실시간 스트림 형태로 취득하며, 데이터 로깅 유닛을 이용해 동기화를 수행한다. 동시에 BMS 내부에서 연산된 SOC 데이터를 기준값(Reference)으로 수집하여 제안 알고리즘의 추정 성능을 정량적으로 비교할 수 있는 환경을 구성하였다. 이러한 통신 기반 데이터 취득 구조는 별도의 센서 추가나 하드웨어 개조 없이 커넥티드 EV 환경에 즉각 적용 가능한 이점이 있다. 그림 2는 본 연구에 적용된 AEKF 기반 SOC 추정 알고리즘의 흐름도를 나타낸다.

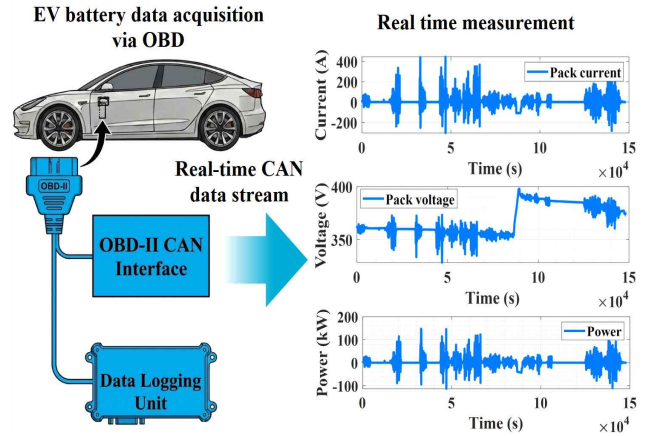


그림 1 OBD 기반 EV 배터리 데이터 수집 모식도

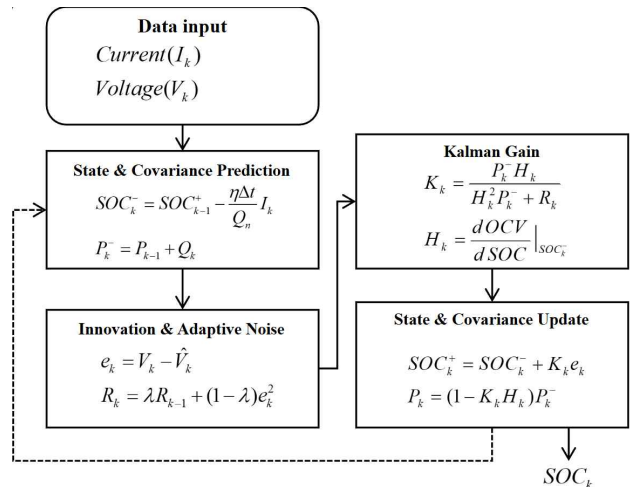


그림 2 AEKF 기반 SOC 추정 고도화 수식도

예측 단계에서는 전류 적산법을 통해 상태 변수를 갱신하고, 측정 단계에서는 등가 회로 모델을 통해 예측된 단자 전압과 실제 측정 전압 간의 차이인 전압 잔차(Residual)를 계산한다. 제안된 AEKF는 이 잔차의 크기를 기반으로 측정 잡음 공분산(R_k)을 실시간으로 갱신하는 방식을 취한다. 잔차가 커지는 구간에서는 공분산 값을 증가시켜 칼만 이득(Kalman gain)을 낮춤으로써 추정값의 급격한 변동을 억제하고, 잔차가 작은 구간에서는 추정값을 적극 반영하여 수렴 속도를 높이는 메커니즘으로 동작한다. 또한 본 연구에서는 배터리 OCV 곡선의 기울기 특성을 반영한 $dSOC/dOCV$ 기반의 파라미터 스케줄링을 적용하였다. OCV 곡선의 기울기가 평탄하여 전압 변화량이 SOC 변화를 명확히 반영하지 못하는 낮은 관측성(Observability) 구간에서는 측정 업데이트의 가중치를 낮추어 과도한 보정이 발생하는 것을 제한하였다. 반대로 전압 민감도가 높은 구간에서는 전압 오차에 의한 보정 비중을 높이도록 설계하여, 전압 민감도에 따른 구조적 오차 제어 로직을 필터 수식 내에 구현하였다. 실주행 데이터를 이용한 검증 결과는 그림 3과 그림 4에 제시되어 있다. 기존 EKF 알고리즘은 주행 시간이 지속됨에 따라 전류 적산 오차가 누적되거나 전류 변동이 큰 구간에서 추정 오차가 확대되는 경향을 보인 반면, 제안된 AEKF는 전 구간에서 기준 SOC 궤적을 안정적으로 추종하였다. 이는 잔차 기반의 공분산 갱신과 민감도 스케줄링이 결합되어 통신 데이터의 잡음과 모델 불확실성을 상쇄했기 때문이다. 표 1의 정량적 지표 분석 결과, AEKF의 최대 추정 오차는 1.627%로 EKF의 4.215% 대비 감소하였으며, 평균 절대 오차(Mean Absolute Error; MAE)와 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error; RMSE) 또한 각각 0.242%, 0.363%를 기록하여 EKF 대비 개선된 성능을 확인하였다. 결과적으로 본 연구의 AEKF 설계는 실차 주행 환경에서 SOC 추정의 정확도와 강건성을 확보함을 입증하였다.

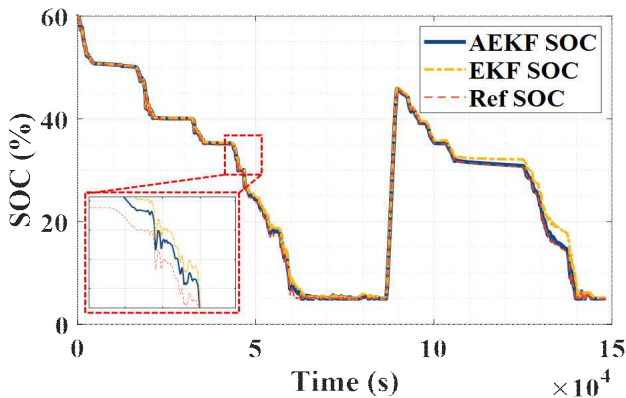


그림 3 AEKF 기반 SOC 추정 결과

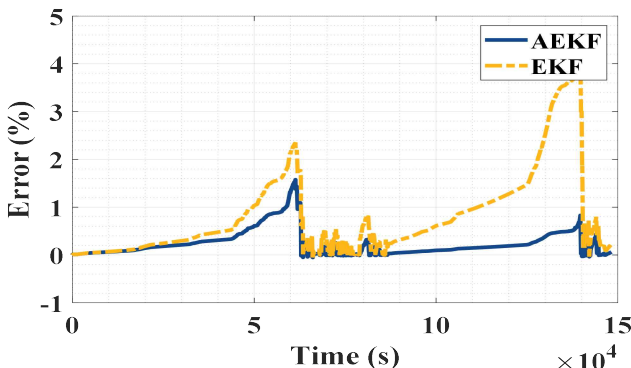


그림 4 SOC 추정 오차 비교

표 1 SOC 최대 추정 오차 및 MAE, RMSE 결과

	AEKF	EKF
MAX error [%]	1.627	4.215
MAE [%]	0.242	0.806
RMSE [%]	0.363	1.207

III. 결론

본 논문에서는 전기자동차의 실주행 환경에서 수집된 OBD-II 기반 CAN 통신 데이터를 활용하여, 배터리 SOC 추정의 정확도와 강건성을 향상시키기 위한 AEKF 기반의 고도화된 추정 알고리즘을 제안하였다. 제안된 기법은 전압 잔차 정보를 실시간으로 피드백하여 측정 잡음 공분산을 적응적으로 갱신함으로써, 주행 중 발생하는 비정상적인 통신 노이즈와 모델 불확실성에 능동적으로 대응할 수 있도록 설계되었다. 또한, 배터리의 전기화학적 특성을 반영한 $dSOC/dOCV$ 개형을 분석하여 SOC 구간별 전압 관측 민감도에 따라 필터의 보정 강도를 스케줄링하는 기법을 추가하였다. 이를 통해 전압 변화가 미미한 OCV 평탄 구간에서 발생할 수 있는 과도한 보정과 추정 값의 발산을 억제하였다. 실주행 데이터를 기반으로 한 비교 검증 결과, 제안된 AEKF 알고리즘은 기존 EKF 대비 최대 추정 오차, MAE, RMSE 등 모든 정량적 지표에서 유의미한 성능 개선을 달성하여 그 효용성을 입증하였다. 향후 연구로는 차량-클라우드(V2C) 통신을 활용하여 플릿(Fleet) 단위의 대규모 운행 데이터를 축적하고, 이를 기반으로 배터리 모델 파라미터를 지속적 학습 및 업데이트하는 프레임워크 구축이 필요하다. 더불어 실차 BMS 탑재를 위한 엣지 단에서의 추정 알고리즘 경량화, 온도 및 열적 거동을 포함하는 다중 상태 필터로의 확장, 그리고 장기적인 배터리 관리를 위한 SOC와 SOH의 통합 추정 기술 개발이 요구된다. 이러한 연구의 확장은 커넥티드 EV 시대에 필수적인 통신 기반 지능형 BMS 기술을 완성하는 데 중요한 토대가 될 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 국토부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 사용후 배터리 안전점검 및 재제조 배터리 순환 체계 안전관리 기술 개발 과제의 지원(RS-2025-02309323) 및 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원(RS-2024-00398346, ESS 빅데이터 기반 O&M 및 자산관리 기술인력 양성)의 지원을 받아 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] S. K. Mulpuri et al., "An intelligent battery management system (BMS) with end-edge-cloud connectivity – a perspective," Sustainable Energy & Fuels (RSC), 2025.
- [2] X. Zhang, L. Duan, Q. Gong, Y. Wang, H. Song, "State of charge estimation for lithium-ion battery based on adaptive extended Kalman filter with improved residual covariance matrix estimator," Journal of Power Sources, vol. 589, 233758, 2024.