

이산 웨이블릿 변환(DWT)를 이용한 저주파 전압 성분 기반 리튬 이온 배터리 SOC 추정 방법

김중훈*, 전창윤**, 조보형**, 김우진*, 박정필*
 삼성SDI*, 서울대학교**

Discrete Wavelet Transform-based SOC Estimation using an Approximation Component of the DCVS for a Li-Ion Cell

J. H. Kim*, C. Y. Chun**, B. H. Cho**, W. J. Kim* and J. P. Park*
 Samsung SDI*, Seoul National University**

ABSTRACT

본 논문에서는 이산 웨이블릿 변환(DWT; discrete wavelet transform)의 다해상도 분석(MRA; multi-resolution analysis)을 통해 분해된 배터리의 저주파 전압 성분(approximation: A_n) 기반 SOC(State-of-charge) 추정방법을 소개한다. 급격한 전압 변화의 특성을 나타내는 고주파 전압 성분(detail: D_n)이 제거되고 저주파 전압 성분만이 SOC 추정을 위해 사용된다. 이 경우 기존 확장 칼만필터(EKF; extended Kalman filter)에서 SOC 추정에러를 개선하기 위해 사용되었던 노이즈 모델의 생략이 가능하여 알고리즘의 복잡성이 개선된다. 개선된 확장 칼만필터 기반 SOC 추정 결과를 통해 제안된 방법을 검증하였다.

1. 서론

리튬이온 배터리의 SOC 추정을 위해 다방면으로 사용되는 확장 칼만필터 등의 적응제어형 알고리즘(Adaptive algorithm)은 추정 성능이 우수함과 달리 알고리즘의 복잡성으로 인해 한계가 존재한다. 이를 해결하기 위해 기존 모델 기반 확장 칼만필터 알고리즘[1]은 배터리의 상태(state)를 축소하여 알고리즘의 간결화를 수행하였다. 고전류 및 빠른 다이내믹에 의해 SOC 추정 성능의 저하가 우려되는 경우 노이즈 모델을 적용하여 등가회로 모델의 부정확성 에러를 최소화하였다.

제안된 방법은 기존 알고리즘의 노이즈 모델을 제거하여 간결화를 더욱 수행하였다. SOC 추정을 위해 사용되는 배터리의 단자 전압으로서 배터리의 원래 충방전 전압이 아닌 이산 웨이블릿 변환의 다해상도 분석 기반 저주파 전압 성분을 적용하였다. 고전류 및 빠른 다이내믹에 의한 전압 성분은 고주파 전압 성분으로서 분해(decomposition)를 통해 이를 제거되므로 노이즈 모델의 생략이 가능하다. 결국, 고주파 전압 성분의 영향이 크지 않은 경우 실제 충방전 전압과 저주파 전압 성분은 대체적으로 유사하다. 개선된 확장 칼만필터 알고리즘 기반 추정된 SOC 결과를 통해 제안된 방법을 검증하였다.

2. 이산 웨이블릿 변환 (DWT)

$$W^f(j, k) = \langle x(t), \psi_{j,k}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t - k2^j}{2^j} \right) dt \quad (1)$$

대표적인 비정상신호의 시간-주파수 분석인 이산 웨이블릿 변환은 식(1)로 표현된다. 2^j 는 크기를 결정하는 압축계수, $k2^j$ 는 시간 축으로의 이동에 관계되는 전이계수로서 스케일에 따라 크기가 변화하는 모함수(mother wavelet) $\psi(t)$ 를 이용한다.

이산 웨이블릿 변환은 직교 기저함수 사용에 따른 중복성을 억제하며 다해상도 분석을 통해 효율적인 계산을 수행한다. 원이산신호 $x(n)$ 는 다해상도 분석을 통해 주파수가 다른 여러개의 부대역으로 분해되고 이를 복원하는 시스템으로 되어 있으며 저역통과필터 $h(n)$ 와 고역통과필터 $g(n)$ 를 사용하여 근사성분(A_n)과 상세성분(D_n)으로 분해한다. 분해시 데이터의 양이 증가하므로 다운샘플링(down-sampling)을 통해 데이터의 수를 반으로 줄인다. 그림 1은 웨이블릿 변환 필터링 과정 및 다분해 트리이며 그림 2는 필터 뱅크이다. 모함수는 Daubechies 웨이블릿(dB)을 사용하였으며 스케일 함수 $\phi(t)$ 와 웨이블릿 함수 $\psi(t)$ 는 각각 식(2) 및 (3)과 같다.

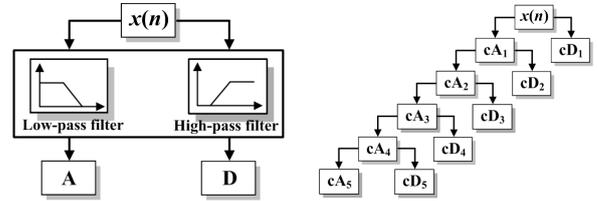


그림 1 웨이블릿 변환 필터링 과정 및 다분해 트리

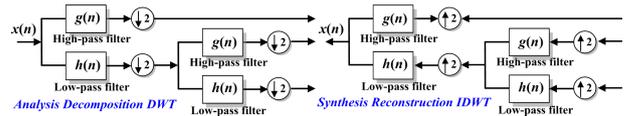


그림 2 필터 뱅크 시스템

$$\phi(t) = \sqrt{2} \sum_n h(n) \phi(2t - n) \quad (2)$$

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_n g(n) \phi(2t - n) \quad (3)$$

3. 제안된 방법

빈번한 충방전 및 급격한 변화로 구성된 차량용 주행프로파일에 따른 단자전압은 5-단계 분해를 통해 그림 3의 저주파 및 고주파 전압 성분으로 분해된다. 최종 저주파 전압 성분 A_5 와 고주파 전압 성분 $D_1 \sim D_5$ 의 합성(reconstruction) 과정을 거쳐 원래의 전압으로 복원이 가능하며, 고주파 전압 성분의 영향이 크지 않다면 실제 충방전 전압과 최종 저주파 전압 성분이 대체적으로 유사하다. 기존 확장 칼만필터의 노이즈 모델 중 급격한 전류 변화 및 다이내믹에 의한 측정 노이즈 모델은 급격한 전류 변화나 주파수 조건을 고려한다. 그러므로, 최종 저주파 전압 성분 A_5 는 실제 충방전 전압에서 급격한 전류 변화나 빠른 다이내믹에 관련된 고주파 전압 성분을 제외한다.

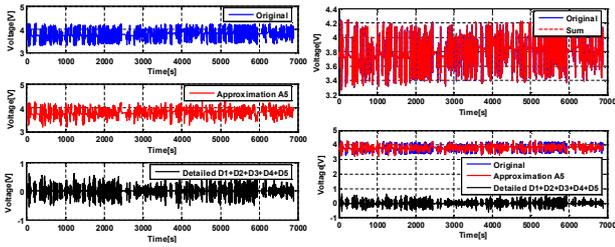


그림 3 충방전 전압, 저주파(A_0) 및 고주파 전압 성분($D_1 \sim D_5$)

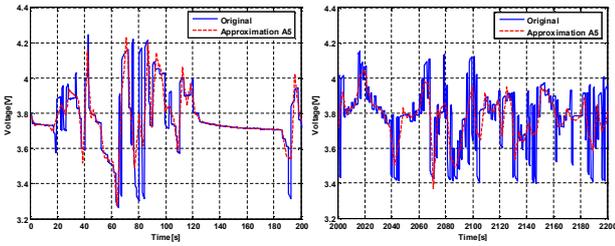


그림 4 충방전 전압과 최종 저주파 전압 성분(A_0) 비교

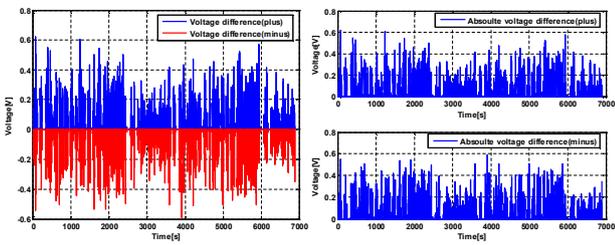


그림 5 충방전 전압과 최종 저주파 전압 성분(A_0) 차이

표 1 충방전 전압과 저주파 전압 성분(A_0) 차이의 통계처리

	평균	표준편차
충방전 전압-저주파 전압 성분 차이 ≥ 0	0.0069681	0.0033693
충방전 전압-저주파 전압 성분 차이 < 0	0.0071053	0.0033695

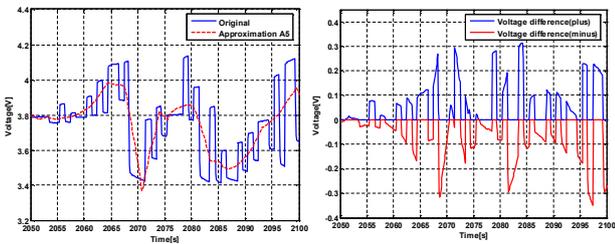


그림 6 충방전 전압과 최종 저주파 전압 성분(A_0) 차이

그림 4는 실제 충방전 전압과 최종 저주파 전압 성분 A_0 의 비교 결과이다. 충전 혹은 방전 시간이 긴 경우 실제 전압과 저주파 전압 성분과의 차이가 대체적으로 유사하며, 충방전을 짧은 시간 내에 빈번히 반복하는 경우 각 펄스 전류 적용 시작과 끝에 관련된 단자 전압의 중간 형태를 보인다. 이러한 중간 전압은 대체적으로 충전 과정시 실제 충방전 전압이 저주파 전압 성분보다 작고, 방전 과정시 저주파 전압 성분보다 크다. 이를 그림 5에 나타내었다. 전압의 차이가 양(+)일 때는 실제 충방전 전압이 저주파 전압 성분보다 크음을 의미하며 음(-)일 때는 반대의 경우를 의미한다. 이를 분석하기 위하여 프로파일링을 적용한 모든 구간동간의 평균과 표준편차를 표 1에 나타내었다. 실제 충방전 전압과 저주파 전압 성분과의 차이는 양 혹은 음의 결과와 상관없이 유사한 평균 및 표준편차를 가진다. 그림 6을 통해 저주파 전압 성분이 대체적으로 원래 충방전 전압의 중간 형태를 보이며 충전 및 방전 과정일 때 충방전 전압이 각각 저주파 전압 성분보다 크고 작음을 확인할 수 있다.

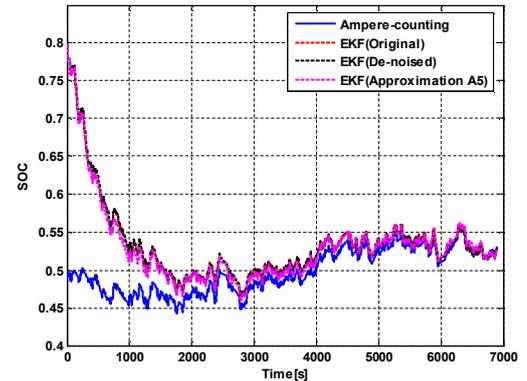
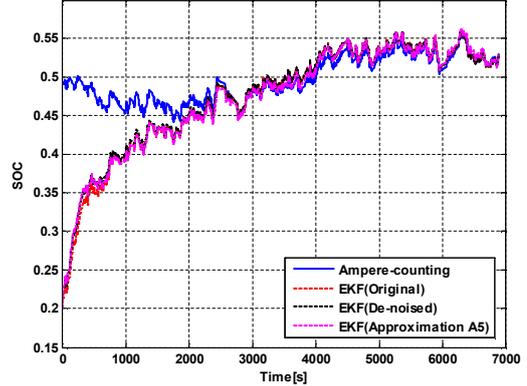


그림 7 SOC 추정결과 (초기 SOC 0.2과 0.8)

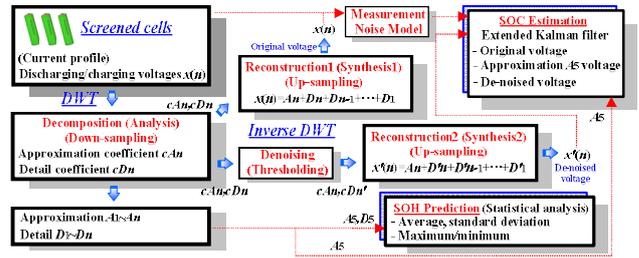


그림 8 이산 웨이블릿 변환 기반 SOC 추정 및 SOH 예측

결국, 이산 웨이블릿 변환을 사용하여 확장 칼만 필터 기반 SOC 추정을 진행할 때, 노이즈 모델을 제거함으로써 추정 알고리즘이 간결해지며, 노이즈 모델의 제거에 따른 r_k 의 연산을 생략함으로써 알고리즘의 연산 속도의 향상도 기대된다. 그림 7은 전류적산법 대비 간결화된 확장 칼만 필터 기반 SOC 추정 결과를 나타낸다. 초기 SOC를 0.2 및 0.8로 설정하였을 때 두 경우 모두 추정 성능이 우수함을 확인할 수 있다. 그림 8은 이산 웨이블릿 변환 기반 SOC 추정 및 SOH 예측 과정을 나타내는 도식도이다.

5. 결론

본 논문에서는 이산 웨이블릿 변환의 다해상도 분석을 통해 분해된 저주파 전압 성분 기반 SOC 추정 방법을 제안하였다.

본 연구는 삼성SDI의 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고 문헌

- [1] J. Lee, O. Nam, and B. H. Cho, "Li-ion battery SOC estimation method based on the reduced order extended Kalman filtering," *J. Power Sources*, vol. 174, pp. 9-15, Nov. 2007.