

배터리 팩의 셀간 전압편차를 이용한 이산 웨이블릿 변환(DWT) 기반 SOH 예측방법

김중훈, 김우진, 박종호, 박정필
삼성SDI

Discrete Wavelet Transform-based SOH Prediction using the Voltage Deviation among the Cells of Li-Ion Battery Pack

J. H. Kim, W. J. Kim, J. H. Park, and J. P. Park
Samsung SDI

ABSTRACT

본 논문에서는 배터리 팩을 구성하는 셀간의 전압편차를 이용한 이산 웨이블릿 변환(DWT;discrete wavelet transform) 기반 SOH(State of health) 예측방법을 소개한다. 충방전 전압은 DWT의 다해상도 분석(MRA;multi resolution analysis)을 이용한 시간 주파수 분석을 통해 고주파 전압 성분(detail; D_n)과 저주파 전압 성분(approximation; A_n)으로 추가 분해되어 SOH 예측을 위한 추가정보를 제공한다. 각 성분의 통계처리(표준편차)를 통해 노화 이전과 이후의 성분값을 비교한다. 즉 프레스시 배터리팩과 노화된 팩의 표준편차 기반 셀간 불균형을 서로 비교하여 SOH 예측이 가능하다.

1. 서론

산업화에 따른 고전압 어플리케이션의 증가로 단위 셀의 직렬, 병렬, 직병렬 혼합결합인 배터리 팩이 다양하게 사용되고 있다. 이 때, 배터리 팩을 구성하는 셀간의 전기화학적 특성이 균일 혹은 불균일함에 따라 팩의 성능이 좌우된다. 실제적으로 셀간의 서로 다른 전기화학적 특성으로 인해 셀간의 전압 불균형이 존재하며 충방전이 오래 지속될 경우 이러한 불균형은 더욱 증가한다. 본 논문에서는 이산 웨이블릿 변환(DWT)[1]을 이용한 배터리 팩의 SOH 예측방법을 새로이 제안한다. 측정되는 충방전 전압은 DWT의 다해상도 분석(MRA)을 통해 저주파 전압 성분(A_n)과 고주파 전압 성분(D_n)으로 분해된다. 프레스시 배터리 팩과 노화된 팩을 구성하는 각각의 셀들의 전압 표준편차를 측정하고 얻어진 표준편차의 재표준편차 값을 서로 비교함으로써 배터리팩의 SOH 예측이 가능하다. 더불어, 이 방법은 충방전 전압을 기반으로 SOH를 예측함으로써 만충/만방의 비효율적인 프로세스를 가지는 잔존용량 기반의 SOH 방법을 극복할 수 있다.

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. 원이

산신호 $x(n)$ 는 다해상도 분석을 통해 주파수가 다른 여러개의 부대역으로 분해되고 이를 복원하는 시스템으로 되어 있으며 저역통과필터 $h(n)$ 과 고역통과필터 $g(n)$ 을 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 트리, 그림 2는 필터 बैं크, 그림 3은 다해상도 분석 주파수 영역을 나타낸다. 모함수는 Daubechies 웨이블릿(dB)을 사용하며 스케일 함수 $\phi(t)$ 와 웨이블릿 함수 $\psi(t)$ 는 식(2)와 같다.

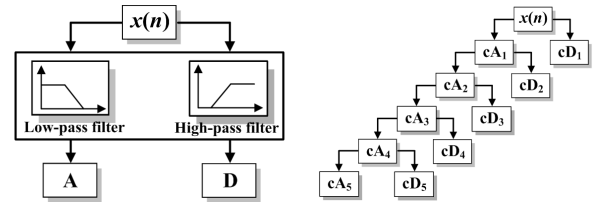


그림 1 웨이블릿 변환 필터링 과정 및 다분해 트리

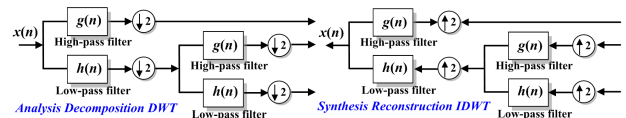


그림 2 필터 बैं크 시스템

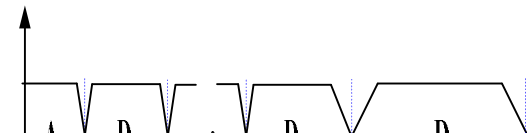


그림 3 다해상도 분석 주파수 영역

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

3. 제안된 방법

이 논문에서는 70개 LiFePO₄ 단위 셀을 직렬결합(70S1P)한 배터리 팩 10개(No.1~No.10)를 사용하였다. 전류크기 및 시간 간격이 서로 다른 10개의 전류프로파일이 각각의 배터리 팩에 적용된다. 이 논문에서는 1번 배터리 팩의 충방전 전압 성분을 이용하여 제안된 방법을 소개하되 70개 셀의 정보를 모두 사용하지 않고 14개의 샘플을 이용하였다. 그림 4는 1번 배터리 팩의 충방전 전압을 나타낸다. 충방전이 더욱 진행될 경우 셀간의 전압 불균형은 더욱 가속화된다. 표 1은 각 셀별 충방전 전압 표준편차를 나타낸다. 35번, 50번 셀의 표준편차가 다른 셀에 비해 작은 값을 가짐을 확인할 수 있다.

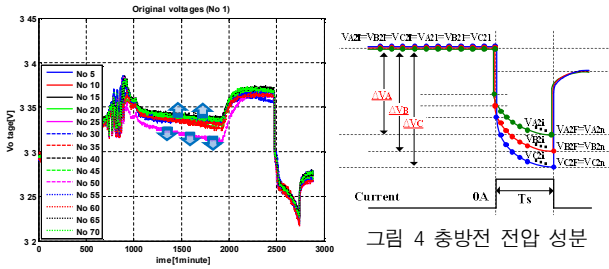


그림 4 충방전 전압 성분

표 1 배터리 팩(No.1)의 각 셀별 충방전 전압 표준편차

셀	표준편차	셀	표준편차	셀	표준편차
5	0.035099	10	0.034938	15	0.034994
20	0.034610	25	0.034659	30	0.034021
35	0.033722	40	0.035657	45	0.035878
50	0.032827	55	0.035987	60	0.035743
65	0.036270	70	0.036108		0.001005

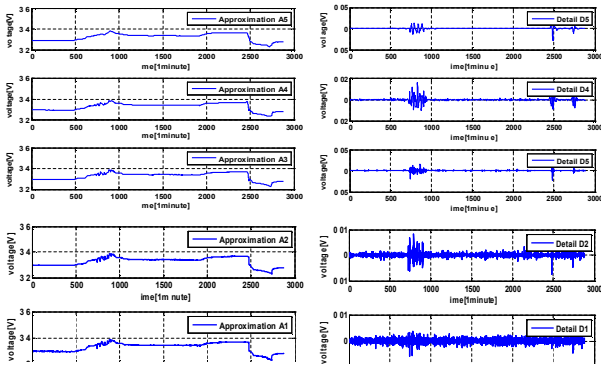


그림 5 배터리 팩(No.1)의 저주파(A1~A5) 및 고주파 전압 성분(D1~D5)

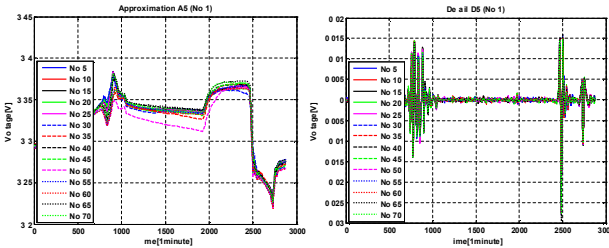


그림 6 최종 저주파 전압 성분(A5) 및 고주파 전압 성분(D5)(No.1)

표 2 각 셀별 저주파 전압 성분(A5)의 표준편차

셀	표준편차	셀	표준편차	셀	표준편차
5	0.034929	10	0.034770	15	0.034834
20	0.034443	25	0.034483	30	0.033868
35	0.033586	40	0.035509	45	0.035730
50	0.032684	55	0.035844	60	0.035601
65	0.036102	70	0.035945		0.001003

표 3 각 셀별 고주파 전압 성분(D5)의 표준편차

셀	표준편차	셀	표준편차	셀	표준편차
5	0.002436	10	0.002455	15	0.002420
20	0.002408	25	0.002464	30	0.002226
35	0.002054	40	0.002262	45	0.002199
50	0.002022	55	0.002222	60	0.002194
65	0.002502	70	0.002441		1.58786×10 ⁻⁴

그림 5는 다해상도 분석을 통해 분해된 1번 배터리 팩의 저주파 전압 성분(A1~A5)과 고주파 전압 성분(D1~D5)을 나타낸다. 그 중, 배터리 팩의 셀간 전기화학적 특성분석을 위해 최종 저주파/고주파 전압 성분(A5/D5)이 사용된다(그림 6). 표 2와 3은 1번 배터리 팩의 각 셀별 최종 저주파 전압 성분과 고주파 전압성분을 각각 나타낸다. 앞의 표 1의 경우와 마찬가지로 35

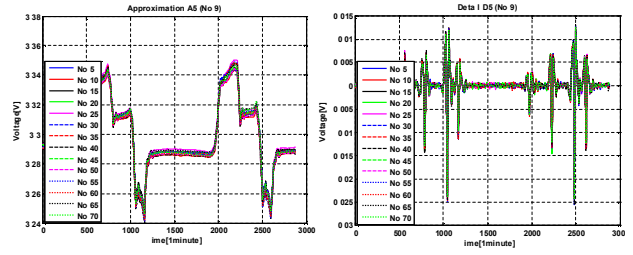


그림 7 최종 저주파 전압 성분(A5) 및 고주파 전압 성분(D5)(No.9)

표 4 배터리 팩의 각 셀별 충방전 전압, 최종 저주파/고주파 전압 성분(A5/D5) 표준편차의 재표준편차

No.	표준편차(실제)	표준편차(A5)	표준편차(D5)
1	0.001005	0.001003	1.58786×10 ⁻⁴
2	3.83074×10 ⁻⁴	3.95574×10 ⁻⁴	3.80202×10 ⁻⁶
3	0.002286	0.002315	1.37073×10 ⁻⁴
4	0.003574	0.003615	3.55320×10 ⁻⁴
5	6.05946×10 ⁻⁴	6.01602×10 ⁻⁴	6.24364×10 ⁻⁶
6	0.002043	0.002058	1.58786×10 ⁻⁴
7	2.02676×10 ⁻⁴	2.03455×10 ⁻⁴	2.17977×10 ⁻⁶
8	8.11145×10 ⁻⁴	8.21694×10 ⁻⁴	8.76387×10 ⁻⁶
9	7.04153×10 ⁻⁴	6.93497×10 ⁻⁴	7.13381×10 ⁻⁶
10	5.01069×10 ⁻⁴	4.99372×10 ⁻⁴	4.90392×10 ⁻⁶

표 5 제안된 SOH 예측방법

프레시 배터리 팩 셀간 전압 표준편차=A_{ori}, 노화 셀 간 전압 표준편차=B_{ori} (A₅) 성분 : 프레시 배터리 팩 표준편차(A_{app}), 노화 후 표준편차(B_{app}) (D₅) 성분 : 프레시 배터리 팩 표준편차(A_{det}), 노화 후 표준편차(B_{det})

$$SOH_{ori}^{predict} = 1 - \frac{|A_{ori} - B_{ori}|}{\alpha A_{ori}} \quad 0 \leq SOH_{ori}^{predict} \leq 1$$

$$SOH_{ori}^{predict} = 0 \text{ if } B_{ori} = (1-\alpha)A_{ori} \quad SOH_{ori}^{predict} = 1 \text{ if } B_{ori} = A_{ori}$$

$$SOH_{app}^{predict} = 1 - \frac{|A_{app} - B_{app}|}{\beta A_{app}} \quad 0 \leq SOH_{app}^{predict} \leq 1$$

저주파 전압 관련

$$SOH_{app}^{predict} = 0 \text{ if } B_{app} = (1-\beta)A_{app} \quad SOH_{app}^{predict} = 1 \text{ if } B_{app} = A_{app}$$

$$SOH_{det}^{predict} = 1 - \frac{|A_{det} - B_{det}|}{\tau A_{det}} \quad 0 \leq SOH_{det}^{predict} \leq 1$$

고주파 전압 관련

$$SOH_{det}^{predict} = 0 \text{ if } B_{det} = (1-\tau)A_{det} \quad SOH_{det}^{predict} = 1 \text{ if } B_{det} = A_{det}$$

$$SOH_{total}^{predict} = \frac{SOH_{ori}^{predict} + SOH_{app}^{predict} + SOH_{det}^{predict}}{3} \quad 0 \leq SOH_{total}^{predict} \leq 1$$

번, 50번셀의 표준편차가 작음을 확인할 수 있다. 동일한 원리를 적용하여 남은 9개 배터리 팩(No.2~10)의 충방전 전압, 최종 저주파/고주파 전압성분의 각 셀별 표준편차를 측정하고 재표준편차의 결과를 서로 비교하였다(그림 7, 표 4). 충방전 전압 표준편차 최대값과 최소값의 비율(α)은 약 17.63, A₅와 D₅의 표준편차 최대값과 최소값의 비율(β,τ)은 각각 약 17.76, 16.30으로서 대체적으로 유사한 값을 나타내며 이를 표 5의 SOH 예측방법에 적용한다.

5. 결론

본 논문에서는 배터리 팩을 구성하는 셀간의 전압편차를 이용한 DWT 기반 SOH 예측방법을 제안하였다.

본 연구는 삼성SDI의 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고 문헌

- J. Kim, G.-S. Seo, B. H. Cho, W. Kim, J. Park, and T. Ishikawa, "Discrete Wavelet Transform-Based Characteristic Analysis and SOH Diagnosis for a Li-Ion Cell," in Proc. IEEE Int. Power Electronics and Motion Conference, Haerbin, China, Jun. 2012.