

# 이산 웨이블릿 변환 기반 에너지 저장시스템(ESS)의 고장 검출 방법

김종훈, 김우진, 박정필  
삼성SDI

## Discrete Wavelet Transform-based Fault Detection of Energy Storage System

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

### ABSTRACT

본 논문에서는 이산 웨이블릿 변환(DWT; discrete wavelet transform)을 이용한 에너지 저장시스템(ESS; energy storage system)의 고장 검출 방법을 제안한다. ESS에 순간적인 고장 발생시 전압의 급격한 변화가 발생할 수 있으며 이는 다해상도 분석(MRA; multi resolution analysis)을 이용한 시간 주파수 분석을 통해 분해된 저주파 전압 성분(approximation;  $A_n$ )과 고주파 전압 성분(detail;  $D_n$ )중 현저한 성분의 변화가 관찰되는 고주파 전압 성분을 선택한다. 이를 검증하기 위하여 모든 고주파 전압 성분의 절대값을 적용한 뒤 최대값 정보를 추출한다. 이 때, 추출된 각 성분의 최대값과 최대값의 평균을 비교하여 여러 사전실험을 통해 정해진 특정 임계값 대비 큰 값을 나타낼 때 고장이 발생하였음을 판단한다.

### 1. 서론

환경 파괴, 자원 고갈 등이 심각한 문제로 제기되면서, 에너지를 저장하고, 저장된 에너지를 효율적으로 활용할 수 있는 에너지 저장시스템(ESS)에 대한 관심이 높아지고 있다. ESS는 신재생에너지와의 계통연계에 있어 큰 역할을 담당하고 있다. 하지만 예기치 않은 고장으로 ESS의 정상적인 운용 및 계통연계를 기대하기 어렵다. 그러므로, 신속히 정상 상태로 복구하기 위하여 고장의 발생을 실시간으로 검출 및 진단하는 장치가 필요하다. 본 논문에서는 이산 웨이블릿 변환[1]을 이용한 에너지 저장시스템의 고장 검출 방법을 새로이 제안하였다. 다해상도 분석(MRA)을 통해 ESS의 실제 충방전 전압성분을 저주파 전압 성분  $A_n$ 과 고주파 전압 성분  $D_n$ 으로 분해(decomposition)한다. 고장으로 인한 ESS 전압의 급격한 변화는 고주파 전압 성분에서 용이하게 관찰할 수 있다. 현저한 성분의 변화가 관찰되는 고주파 전압 성분을 검증하기 위하여 모든 고주파 전압 성분의 절대값을 적용한 뒤 최대값 정보를 추출한다. 추출된 각 성분의 최대값과 최대값의 평균을 비교하여 비율을 구하고 이를 사전에 여러실험을 통해 구해진 특정 임계값과 비교한다. 이 때, 임계값 대비 큰 값을 나타낼 경우 ESS의 고장이 발생하였음을 판단한다. 참고로, 본 논문에서 실험에 사용된 ESS는 LiFePO<sub>4</sub>셀(50Ah)의 직렬결합(70S1P)으로 구성되었다.

### 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. 모함수는 Daubechies 웨이블릿(dB)을 사용하며 스케일 함수  $\phi(t)$ 와 웨이블릿 함수  $\psi(t)$ 는 식(2)와 같다. 그림 1은 웨이블릿 변환 필터링 과정 및 다분해 트리, 그림 2는 필터 뱅크 시스템을 나타낸다.

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

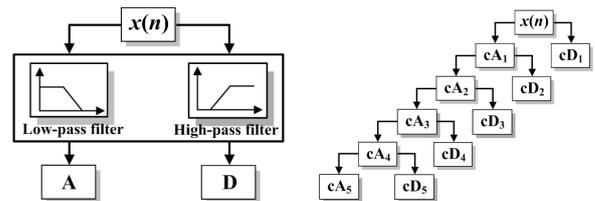


그림 1 웨이블릿 변환 필터링 과정 및 다분해 트리

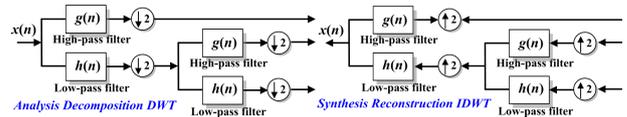


그림 2 필터 뱅크 시스템

### 3. 제안된 방법

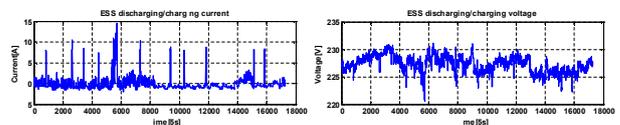


그림 3 ESS 충방전 전압/전류

ESS에 충방전 전류가 적용되었을 때 측정되는 충방전 전압

을 그림 3에 나타내었다. 그림 3의 결과만을 가지고 ESS의 고장진단을 판단할 수 없다. 따라서, 다해상도 분석을 통해 증방진 전압성분을 저주파 전압 성분  $A_n$ 과 고주파 전압 성분  $D_n$ 으로

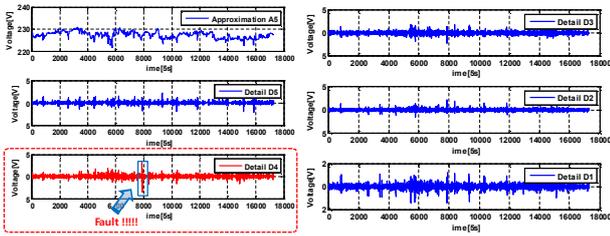


그림 4 분해된 저주파 전압성분  $A_5$  및 고주파 전압성분  $D_1 \sim D_5$

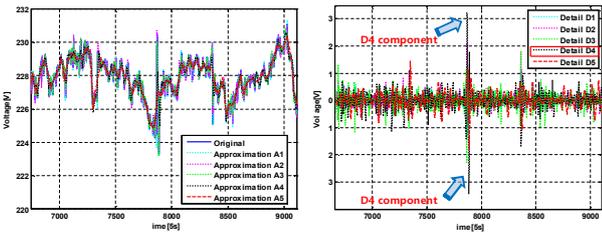


그림 5 고장 검출을 위한 저주파 전압성분 및 고주파 전압성분 비교

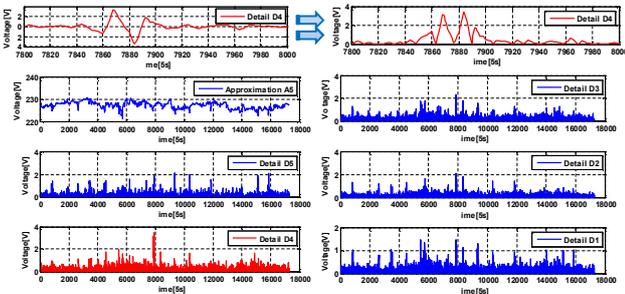


그림 6 고주파 전압성분( $D_1 \sim D_5$ )의 절대값 정보

로 분해한다(그림 4). 이 때, 고장으로 인한 증방진 전압의 급격한 변화는 고주파 전압 성분으로 관찰할 수 있으며,  $D_4$ 의 성분을 통해 ESS의 고장을 짐작할 수 있다. 그림 5는 고장 검출을 위한 저주파 전압성분( $A_1 \sim A_5$ ) 및 고주파 전압성분( $D_1 \sim D_5$ )을 서로 비교한 결과로서 저주파 전압성분과 유사하므로 고장 검출에 용이하지 않다. 반대로, 고주파 전압성분의 경우 특정구간 및 특정성분이 잘 추출되어 고장을 검출하는데 용이하다.

추출된 고주파 전압성분  $D_4$ 의 타당성을 검증하기 위하여 고주파 전압성분의 실제값이 아닌 절대값( $|D_n|$ )을 적용하였다. 저주파 전압성분과 달리 고주파 전압성분의 경우 0을 기준으로 양과 음의 값을 가지므로 절대값 정보를 이용하여 모두 0 이상의 값을 가지도록 한다. 절대값 정보로 변환된 각 고주파 전압성분을 그림 6에 나타내었다. 변환된 고주파 전압성분의 평균성분을 얻은 후, 이를 각 고주파 전압성분과 서로 비교한다(그림 7). 그림 7에서 확인할 수 있듯이, 고주파 전압성분  $D_4$ 의 경우 평균성분( $(|D_1| + \dots + |D_5|)/5 = D_{avg}^{max}$ )의 최대값보다 훨씬 큰 값을 갖는다. 평균성분의 최대값은 ESS가 정상적으로 동작하는 정상범위로 정한다. 구체적인 비교를 위해, 그림 7의 모든 고주파 전압성분의 최대값 정보를 추출한다( $|D_n|^{max} \sim |D_5^{max}|$ ). 표 1은 고주파 성분 최대값( $|D_n|^{max} \sim |D_5^{max}|$ ) 및 이의 평균값  $D_{avg}^{max}$ 와의 비교를 나타내었다. 고장 진단을 위해 표 1에서 구해진 비율들이 사전 실험을 통해 구해진 임계값(2.5)보다 큰 여부를 판단하고 임계값보다 큰 비율이 있을 경우 고장이 발생하였

음을 판단한다. 표 1을 통해,  $D_{avg}^{max}$ 에 대한  $|D_4^{max}|$ 의 비율이 3.0756이므로 2.5보다 큰 값이므로 고장이 발생하였다고 진단할 수 있다.

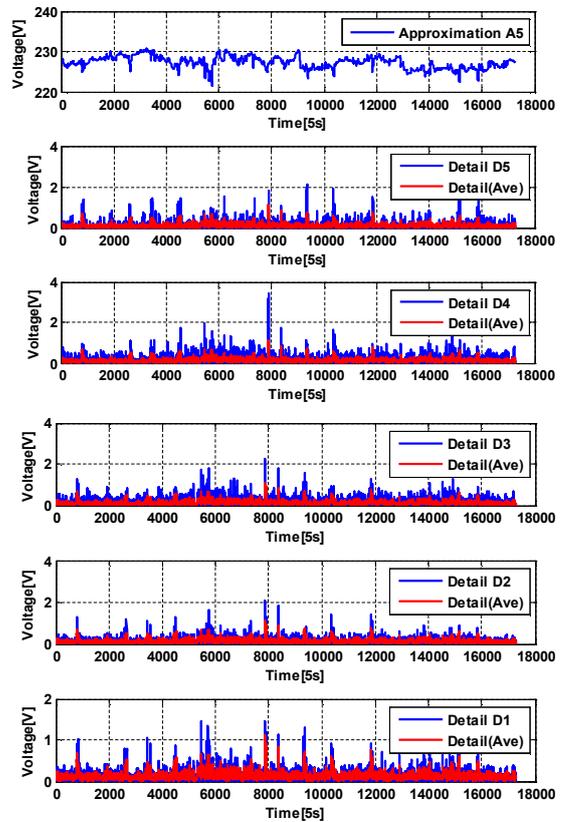


그림 7 고주파 성분( $|D_1| \sim |D_5|$ ) 및 평균값  $D_{avg}^{max}$  비교

표 1 고주파 성분( $|D_1| \sim |D_5|$ ) 최대값 및 최대값 평균값 비교

	$ D_1 ^{max}$	$ D_2 ^{max}$	$ D_3 ^{max}$	$ D_4 ^{max}$	$ D_5 ^{max}$	$D_{avg}^{max}$
최대값	1.4568	2.0627	2.2722	3.4434	2.1059	1.11968
$D_{avg}^{max}$ 비교	1.3003	1.8424	2.0295	3.0756	1.8810	-

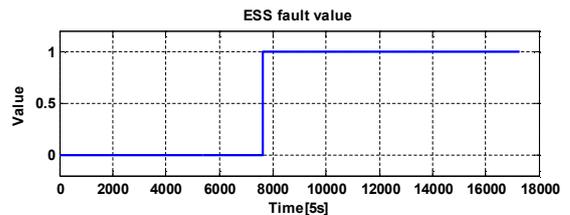


그림 8 ESS 시스템 고장 진단

그림 8은 ESS 시스템 고장 진단 기능을 나타낸 것으로, 시스템 내부에서도 제안된 방법과 동일 시점에 고장 진단을 판단했음을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 이산 웨이블릿 변환을 이용한 에너지 저장시스템의 고장 검출 방법을 새로이 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.