

웨이블릿 분해와 머신러닝 가중치를 이용한 활선 고장 위치 탐지 기법

김우균, 박기현, 방상혁, 박소령

가톨릭대학교

one20nine@catholic.ac.kr, pp0104@catholic.ac.kr, qkdtkdgur0@catholic.ac.kr, srpark@catholic.ac.kr

Fault Positioning Technique of Live Wire Using Wavelet Decomposition and ML Weights

Woo Gyun Kim, Ki Hyun Park, Sang Hyuk Bang, So Ryoung Park

The Catholic University of Korea

요약

본 논문에서는 웨이블릿(wavelet)을 이용하여 활선(live wire)에서의 STDR(sequence time domain reflectometry) 측정 신호를 분해하고 머신러닝으로 얻은 가중치를 활용하여 신호를 재구성한 후 고장 위치를 추정하는 방법을 제안한다. 신호 분해 및 재구성 방법으로 경험적 모드 분해(empirical mode decomposition: EMD) 알고리즘을 사용한 기존 기법과 고장 탐지 성능을 비교하고, 머신러닝으로 오탐지율을 줄이는 가중치를 찾을 수 있음을 보인다.

I. 서론

TDR(time domain reflectometry)은 시간 영역의 상관(correlation)을 이용하여 케이블의 고장을 탐지하고 고장의 종류와 위치를 추정하는 기법으로, 케이블에 인가하는 신호의 형태에 따라 STDR(sequence TDR)이나 SSTDR (spread spectrum TDR)이라고도 한다[1-3]. 활선(live wire)에서의 TDR 신호는 그림 1에서 보인 것과 같이 저주파 잡음을 포함하고 있어서 고장점 반사 신호의 위치를 정확히 추정하기 힘들다. 이러한 저주파 잡음을 제거하기 위하여 신호를 분해하고 재구성하는 기법들이 제안되었다[2,3]. 본 논문에서는 기존의 기법들과 다르게 웨이블릿 변환(wavelet transform: WT)을 이용하여 활선에서의 STDR 측정 신호를 분해하고 머신러닝으로 얻은 가중치를 활용하여 신호를 재구성한 후 고장 위치를 추정하는 기법을 제안한다.

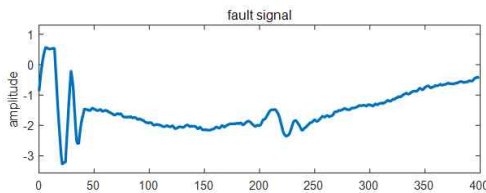


그림 1. 활선 고장 신호 예시

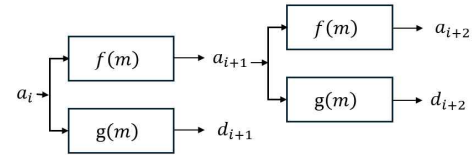


그림 2. SWT 분해 기법

웨이블릿 해석은 다양한 기저 함수를 사용할 수 있는데, 대표적인 것으로 Haar, Daubechies, symlet, coiflets, biorthogonal 등이 있다. Haar 웨이블릿은 가장 간단한 웨이블릿 중 하나로, 실시간 처리가 필요한 고장 신호 검출과 같은 작업에 매우 편리하고 메모리 사용이 매우 효율적이며 가장자리 효과 없이 정확한 변환을 제공한다. 그림 3(a)와 같이 Haar 웨이블릿은 간단한 불연속 함수이므로 영상 처리나 매끄러운 신호의 분해에는 효과적이지 않지만, 불연속점을 검출하는 데 효과적인 특성을 가지고 있어 값이 날카롭게 변하는 지점을 찾는 데에는 유용하다. symlet 웨이블릿은 Daubechies 웨이블릿에서 대칭성을 증가시킴으로서 신호의 경계에서 발생할 수 있는 문제를 최소화하는 특성을 가지고 있다. 그림 3(b)와 같은 대칭적인 웨이블릿을 사용하여 신호의 자연스러운 변화와 패턴을 잘 포착할 수 있으며 다양한 해상도에서 신호를 분석하여 신호의 세부적인 특성을 점진적으로 검토할 수 있기 때문에 고장 신호와 같은 미세한 변화를 감지하는 데 효과적일 수 있다.

위와 같은 이유로 여러 웨이블릿 중 본 논문에서는 Haar와 symlet, $N=4$ (sym4)를 선택하여 고장 신호를 분해하는 데에 활용하였다.

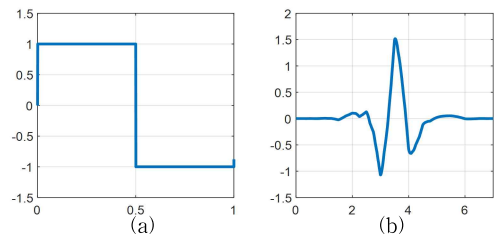


그림 3. 웨이블릿 함수 (a) Haar (b) sym4

II. 본론

본론에서는 신호 분해에 사용한 웨이블릿 종류와 신호 재구성에 사용한 가중치 선정 기법을 설명하고, 선정된 가중치를 사용한 고장 탐지 기법과 기존 고장 신호 분해 및 재구성 기법의 오탐지율을 비교한다.

1. 신호 분해 기법

최근 신호를 분해하여 특이 현상을 분석하는 데에 웨이블릿 변환을 활용하는 방법이 많이 제안되고 있다[4]. 웨이블릿 변환 중 SWT(stationary WT)는 일반적인 이산 웨이블릿 변환(Discrete WT)의 이동 불변성 문제를 극복하기 위해 개발되었고, 그림 2와 같이 저역통과(low-pass) 필터 $h(m)$ 과 고역통과(high-pass) 필터 $g(m)$ 으로 신호를 필터링하는 연속적인 2-채널 필터뱅크(filter bank)로 구현된다. 그림에서 근사성분(approximation) a_i 와 상세성분(detail) d_i 는 각각 i 번째 웨이블릿 분해 단계의 신호 계수들을 나타낸다. 이 논문에서는 저주파 성분을 포함하고 있는 근사성분 a_i 를 제외하고 상세성분 d_i 들로 신호를 재구성한다.

2. 신호 재구성 기법

웨이블릿으로 신호를 분해한 뒤 가중치 w_i 를 적용하여 재구성 신호 $\hat{r}(n)$ 를 얻는 기법은 다음과 같다.

$$\hat{r}(n) = \sum_{i=1}^L w_i d_i(n), \quad L=5 \quad (1)$$

식(1)에서 재구성 가중치 w_i 를 정하는 방법을 간단히 살펴보자.

방법 1. 최저주파 성분 단순 제거

분해한 성분 중에서 최저주파 성분의 가중치만 0으로 하고 다른 성분의 가중치는 모두 동일한 값으로 설정하여 신호를 재구성하는 방법이다.

방법 2. 고주파 성분 동일 가중치

분해한 성분 중에서 상대적으로 높은 주파수 성분 3개의 가중치만 동일한 값으로 설정하고 다른 가중치는 0으로 두어 신호를 재구성하는 방법이다.

방법 3. 최저주파 성분을 제거한 후의 머신러닝 가중치

머신러닝은 레이블이 있는 입력 데이터들을 모델에 적용하여 입력 데이터와 정답 사이의 관계를 찾는 방식이며 크게 분류와 회귀로 나눌 수 있다. 표 1은 EMD(empirical mode decomposition)[2,3], Haar, sym4의 분해 성분과 인가 신호의 고장 지점 상관 값을 입력 데이터로 사용하여 다양한 분류 방식의 정확도를 확인한 결과이다. 로지스틱(Logistic) 회귀 방식을 사용할 때의 분류 정확도가 높고, 모든 가중치들의 합이 일정한 가중치를 얻을 수 있으므로, 이 논문에서는 로지스틱 회귀 방식을 통해 재구성 가중치를 얻는다.

방법 4. 고주파 성분만을 사용한 머신러닝 가중치

방법 3에서 상대적으로 높은 주파수 성분 3개를 제외한 다른 성분의 가중치는 0으로 두어 신호를 재구성하는 방법이다.

표 2, 3, 4는 각각 EMD, Haar, sym4 분해 기법의 재구성 가중치이며, 방법 3과 4는 로지스틱 회귀 방식을 통해 4000개의 데이터셋을 학습시켜 얻었다.

표 1. 분류 방식별 고장 여부 분류 정확도 (단위: %)

	Logistic Regression	SVM	KNN	Decision Tree	Voting	Random Forest	XG BC
EMD	97.12	95.25	88.50	97.75	96.50	98.38	99.38
Haar	99.25	99.25	95.45	98.88	99.38	99.38	99.88
Svm4	98.88	98.62	98.62	99.00	98.62	99.00	99.88

표 2. EMD 재구성 가중치

Weight	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5
방법1	1	1	1	1	1
방법2	1.667	1.667	1.667	0	0
방법3	2.671	2.140	0.219	-0.014	-0.042
방법4	2.641	2.140	0.219	0	0

표 3. Haar 재구성 가중치

Weight	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5
방법1	1	1	1	1	1
방법2	1.667	1.667	1.666	0	0
방법3	7.349	9.334	-7.391	-7.491	3.199
방법4	3.955	5.023	-3.978	0	0

표 4. sym4 재구성 가중치

Weight	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5
방법1	1	1	1	1	1
방법2	1.667	1.667	1.667	0	0
방법3	0.343	3.133	5.088	-2.513	-1.051
방법4	0.200	1.829	2.971	0	0

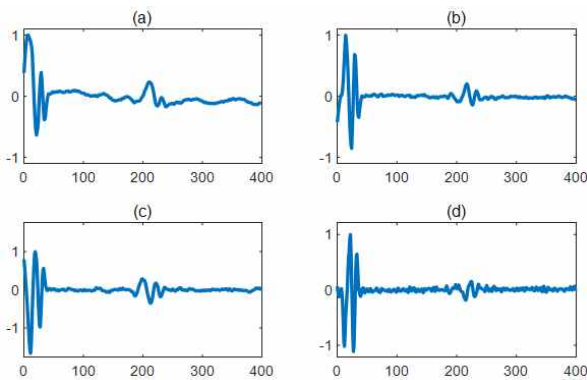


그림 4. 다양한 가중치로 재구성한 고장 신호 (a) 표 4의 방법1 (b) 표 4의 방법2 (c) 표 4의 방법3 (d) 표 4의 방법4

그림 4는 표 4의 네 가지 방법으로 얻은 가중치를 사용하여 그림 1의 고장 신호를 분해 및 재구성한 신호이다. 기본적으로 모든 재구성 신호에서 활성

신호의 저주파 성분이 제거된 점과 가중치에 따라 재구성 신호가 상당히 다른 점을 확인할 수 있다.

4. 분해기법별 오탐지율 결과 분석

분해 기법별 다양한 가중치를 적용한 재구성 신호를 사용하여 활성 고장 신호의 위치를 추정하였고, 추정 위치의 오탐지율을 표 5에서 비교하였다.

EMD 기법을 통한 분석으로 고장 탐지 시스템의 성능을 측정된 결과, 방법 1에서의 오탐지율이 58.62%, 방법2의 오탐지율이 2.09%로 대폭 감소했다는 결과를 볼 수 있다. 이 결과를 통해 초기 세 성분이 고장 신호 탐지에 중요한 정보를 포함한다는 것을 알 수 있다.

머신러닝을 통해 가중치를 얻는 방법 3에서는 높은 주파수 성분에 더 높은 가중치를 유지하고, 낮은 주파수 성분에는 음수 가중치를 추가하여 오류율을 1.28%로 낮출 수 있었다. 이는 음수 가중치를 활용하여 특정 신호 성분의 영향력을 줄이는 것이 탐지 정확도를 향상시킬 수 있다는 것을 보여주었다. 방법 4의 경우에도 위와 같은 이유로 낮은 오탐지율이 나온 것을 알 수 있다.

sym4 웨이블릿을 사용한 분석으로 고장 탐지 시스템의 성능을 측정된 결과, 방법 1에서 오탐지율 2.42%로 같은 방법의 EMD 기법을 사용한 방법보다 월등히 좋은 성능을 보여준다. 이를 통해 낮은 주파수 성분이 EMD에 비해 sym4에서 더 중요하게 작용된다는 것을 알 수 있었다. Haar 웨이블릿을 사용한 분석의 경우 방법 2의 경우 0.69%의 오탐지율로 모든 분해기법의 방법들 중 가장 좋은 결과를 나타내었다.

표 5. 분해 및 재구성 기법별 활성 고장 위치의 오탐지율

분해기법	EMD	Haar	sym4
재구성 가중치 방법1	58.62	14.70	2.42
재구성 가중치 방법2	2.09	0.69	2.23
재구성 가중치 방법3	1.28	1.34	0.95
재구성 가중치 방법4	1.27	2.40	1.85

III. 결론

이 논문에서는 웨이블릿을 사용하여 STDR 측정 신호를 분석하는 과정에서 EMD 기법과 symlet, Haar 웨이블릿을 비교했다. 각 신호 성분에 적절한 분해 방법과 가중치를 부여하는 것이 고장 탐지 정확도를 향상시키는 데에 중요하다는 사실을 확인하였고, 분해 기법과 재구성 가중치에 따라 고장 오탐지율을 확인하여 각 분해 기법의 성능을 비교하였다. 웨이블릿 변환 방식을 사용한 제안 기법에서 기존 EMD 방식을 사용할 때보다 오탐지율이 전반적으로 낮았고, 웨이블릿 변환 방식 내에서도 고주파 성분 동일 가중치를 적용한 Haar 분해 및 재구성 기법과 머신러닝을 활용한 sym4 분해 및 재구성 기법의 고장 오탐지율이 가장 낮음을 볼 수 있었다.

추후 다른 신호 분해 기법 및 재구성 방식을 적용할 때에도 학습된 적절한 재구성 가중치를 사용하여 고장 오탐지율을 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] U. Bang, B. Basnet, I. Ryu, T. Kim, and P. Jo, "Improvement in fault detection of long distance wires using SSTDR", *Proc. KEA Fall Conf*, pp. 146-147, Oct. 2018.
- [2] G. Ryu and S. R. Park, "Noise decomposition and elimination techniques for fault location of live wire", *J. KICS*, vol. 42, no. 06, pp. 1135-1141, June 2017.
- [3] W.G. Kim, K.H. Park, S.H. Bang, and S.R. Park, "Signal decomposition and reconstruction method for live line failure detection of TDR method", *Proc. KICS Fall Conf*, Nov. 24, 2023.
- [4] A. Zaeni, T. Kasnalestari, and U. Khayam, "Application of wavelet transformation symlet type and coiflet type for partial discharge signals denoising", *Proc. Int. Conf. Elect. Veh. Techn.*, Oct. 30-31, 2018.