

활선 고장의 위치 탐지를 위한 잡음 분해 및 제거 기법

유경환*, 박소령^o

Noise Decomposition and Elimination Techniques for Fault Location of Live Wire

Gyeonghwan Ryu*, So Ryoung Park^o

요약

이 논문에서는 케이블에 전력이 공급되고 있는 상태에서 TDR(time-domain reflectometry) 방식으로 고장의 위치를 탐지하고자 할 때, 회로의 전압 불안정으로 말미암아 발생하는 저주파 잡음을 제거하여 고장 지점에서 반사되는 신호의 탐지 성능을 향상시키는 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 경험적 모드 분해법(empirical mode decomposition)을 사용하여 저주파 잡음을 분리하고 효과적으로 제거함으로써, 기존 TDR 방식이나 고대역 통과 여파기(high-pass filter)를 사용하는 기법과 비교할 때 고장 위치 오검출율을 크게 낮출 수 있음을 보인다.

Key Words : time-domain reflectometry (TDR), cable fault, live wire, noise elimination, empirical mode decomposition

ABSTRACT

This paper proposes an effective detection technique for the cable fault location, which eliminates the low-frequency noise from the time-domain reflectometry (TDR) signal and improves the performance of fault detection in live wire. In the supply of electric power, the various kinds of noises from the peripheral devices have the considerable influence on the performance of fault detection. The proposed technique separates the noise component in the TDR signal using the empirical mode decomposition, and reconstructs the signal excepting the noise component. It is shown that the detection error rate of the proposed technique can be significantly lower than those of the conventional TDR method and the TDR method using high-pass filter in live wire environment.

1. 서론

케이블 배선 시스템의 결함은 산업 전반에 걸친 전기/전자 설비의 중요한 기능을 상실하게 하거나 시스템의 운용 장애, 정전, 화재 발생 및 정보손실, 재산피해, 생산차질 등 막대한 피해를 발생시키고 공공의 안

전을 위협하거나 사회 불안을 야기할 수 있다. 그러나 케이블 배선의 기계·화학·전기적 사용 환경 및 사용 시간에 따라 절연열화, 접촉/접속 불량, 단선, 절연 파괴, 합선, 단선 등의 결함 현상이 발생할 수 있기 때문에 지속적으로 케이블 배선 시스템을 점검하여 결함의 유무를 판단하여야 한다.

* 본 연구는 2013년도 민·군겸용기술사업(Dual Use Technology Program)의 연구비 지원 및 2017년도 가톨릭대학교 교비연구비의 지원으로 수행되었습니다.

• First Author : The Catholic University of Korea (CUK), School of Information, Communications, and Electronics Engineering (ICEE), Communication Signal Processing (CSP) Lab., rudghksfb@naver.com, 학생회원

^o Corresponding Author : CUK, School of ICEE, CSP Lab., srpark@catholic.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2017-05-149, Received May 19, 2017; Revised June 2, 2017; Accepted June 5, 2017

대부분의 민간 및 공공 산업시설에서는 제품 생산 차질이나 서비스 단절과 같은 이유로 케이블 배선 시스템을 점검할 때 정전 상태뿐만 아니라 무정전 상태, 즉 활선 상태에서 점검하는 것을 필요로 하고 있고, 분전반과 같은 기본적 배선 제어 시스템에서도 활선 상태에서 상시적인 감시와 관리가 필요하다.

케이블의 고장을 탐지하고 고장의 종류와 위치를 추정하는 대표적인 기법으로는 시간 영역의 상관(correlation)을 이용하는 TDR(time domain reflectometry) 방식이 있다. TDR 방식은 특정 형태의 신호를 케이블에 인가(injection)한 뒤 고장 위치에서 반사되어 돌아오는 신호를 탐지하는 가장 간단한 기법으로, 인가하는 신호의 형태에 따라 탐지 성능이 달라질 수 있다. 가장 기본적인 TDR 방식은 인가 신호로 펄스를 사용하는데, 펄스가 감쇠에 취약하기 때문에 원거리 고장에 대한 탐지 성능이 떨어지는 단점이 있으나, 알고리즘이 간단하고 계산량이 적기 때문에 상시적인 감시를 위한 기술로 주로 사용되고 있다. 또한 최근 TDR 방식의 단점을 보완하기 위하여 인가 신호로 자기상관(autocorrelation) 성질이 좋은 확산 수열(spreading sequence)을 사용하는 STDR(sequence TDR) 방식과, 원하는 주파수 대역을 활용할 수 있도록 하기 위해 수열에 정현파 변조를 적용한 SSTDR(spread spectrum TDR) 방식이 제안되었고, STDR과 SSTDR 방식의 탐지 성능을 높일 수 있는 부호기 추가 기법과 부호 제거 기법 등이 활발히 연구되고 있다¹⁻⁴⁾. 그러나 대부분의 연구가 케이블이 정전 상태인 경우에서만 적용 가능하고 활선 상태에 적용한 결과를 제시하지는 않고 있다.

한편 활선 상태에서 케이블의 열화를 진단하는 방식으로는 부분방전(partial discharge)이 존재하는지를 판단하는 연구도 진행되고 있으나, 주로 UHF 안테나, 초음파 센서, 가스변화, 빛, 전류 및 전압측정 등 다양한 센서들을 이용한 진단 기술을 연구하고 있다^{5,6)}. 이 연구들을 살펴보면 활선 상태에서 측정된 전류나 전압은 60Hz의 기본 전력선 신호 외에도 함께 동작하고 있는 기기 및 회로의 영향으로 인하여 원치 않는 다양한 주파수의 신호가 존재하고 있음을 볼 수 있다.

이 논문에서는 활선 상태에서 TDR 방식을 사용하여 상시적으로 케이블 배선 시스템을 점검하는 데에 쓰일 수 있도록, 주변 기기 및 회로의 저주파 잡음을 분리하고 제거하는 방법을 제안한다. II장에서는 기존의 TDR 방식을 사용한 활선 상태 고장 탐지 기법의 문제점과 제안하는 잡음 제거 기법을 설명하고, III장에서는 실험 데이터에 적용하여 제안한 기법의 고장

탐지 성능을 살펴보고, IV장에서 결론을 맺는다.

II. TDR 방식과 제안하는 잡음 제거 기법

이 장에서는 기존의 TDR 방식을 간단히 설명하고, 활선 상태에서 TDR 방식의 문제점을 살펴보고, 제안한 잡음 분해 및 제거 기법을 설명한다.

2.1 TDR 방식

그림 1에 TDR 방식의 블록다이어그램을 보였다. 펄스 형태의 신호를 케이블에 인가하고 시간 상관을 이용하여 고장 지점에서 반사되어 되돌아오는 신호를 탐지하는데, 반사 신호의 도착 시간으로 고장의 위치를 추정하는 방식이다.

인가 신호(injected signal or reference signal) $s(t)$ 를 활선에 인가한 후 T 초 동안 관측된 신호(observed signal)를 $r(t)$ 라 하자. 고장이 있을 때에는 $r(t)$ 에 인가 신호와 고장 지점에서의 반사 신호가 포함되어 있을 것이다. 인가 신호 $s(t)$ 와 관측 신호 $r(t)$ 의 시간 영역 상관 함수는 다음과 같다.

$$C_{sr}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T s(t)r^*(t+\tau)dt \quad (1)$$

고장이 있으면 인가 신호가 존재하는 시간 τ_1 과 인가 신호의 형태가 반영된 고장 지점 반사 신호가 존재하는 시간 τ_2 에서 상관 함수의 절대 값이 크게 나타나기 때문에, 신호를 인가한 지점에서 고장 지점까지의 거리 d 는 시간 차 $\tau_D = \tau_2 - \tau_1$ 와 케이블의 신호 전파 속도(velocity of propagation) v_p 를 사용하여

$$d = \frac{v_p \times \tau_D}{2} \quad (2)$$

와 같이 구할 수 있다.

그림 2에 활선 상태에서 TDR 방식으로 실제로 측정된 신호와 상관 함수의 예시를 보였다. 상단 그래프는 신호 인가 지점에서 100m 떨어진 위치에 고장이

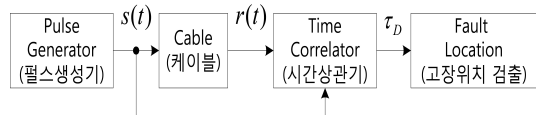


그림 1. TDR의 블록다이어그램
Fig. 1. Block diagram of TDR

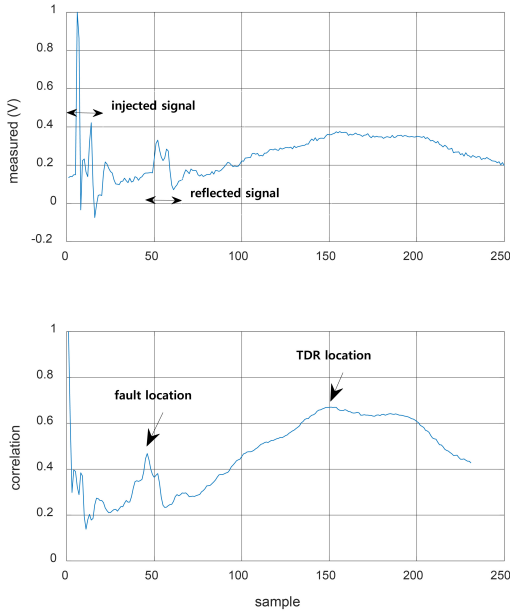


그림 2. 활선에서의 TDR 측정 신호와 상관 함수
Fig. 2. A TDR signal and its correlation in live wire

존재하는 전력선에 폭이 50ns인 펄스를 인가하고 측정되는 신호를 40×10^6 samples/s로 표본화한 것이다. 분전반에 연결된 활선 상태의 전력선에 커플러를 사용하여 TDR 신호를 인가하였기 때문에 첫 번째 관측된 펄스 뒤로 분전반에서 반사되는 두 번째 펄스가 존재하며, 측정 시 기본적으로 이 두 펄스가 함께 고장 지점에서 반사되고 있다. 이러한 이유로 첫 번째 펄스부터 두 번째 펄스까지를 인가 신호 $s(t)$ 로 두었다.

상단 그래프인 측정 신호 $r(t)$ 와 인가 신호 $s(t)$ 의 상관관을 취한 결과인 $C_{sr}(\tau)$ 를 하단의 그래프에서 보여주고 있다. 실제 고장 지점에서 반사되는 신호는 상관 함수의 46번째 표본에서 시작되고 있으나, 저주파 잡음의 영향으로 인하여 상관 함수에서 두 번째로 큰 극댓값은 약 150번째 표본에서 나타난다. 따라서 그림 2의 측정 신호에서 저주파 잡음을 없애지 않고 TDR 방식을 적용할 경우에는 고장 위치를 올바르게 탐지할 수 없게 된다.

2.2 제안하는 잡음 제거 기법

TDR 방식에서 인가하는 신호보다 저주파인 잡음 성분을 제거하기 위하여, 이 논문에서는 경험적 모드 분해(empirical mode decomposition: EMD) 알고리즘을 적용한다. EMD 알고리즘은 IMF(intrinsic mode function)라고 부르는 함수들로 임의의 신호를 분해하

는 알고리즘이다^[7,8].

제안하는 기법에서는 측정 신호 $r(t)$ 를 EMD 알고리즘으로 분해하여

$$r(t) = \sum_{i=1}^M h_i(t) \quad (3)$$

과 같이 표현되는 IMF 함수 $h_i(t)$, $i=1, \dots, M$ 을 얻은 뒤, 일정 인덱스 이상의 IMF 함수를 제외하고 재구성하여 얻은 보정 신호

$$\hat{r}_L(t) = \sum_{i=1}^L h_i(t), \quad L \leq M \quad (4)$$

를 사용하여 상관 함수 $C_{sr}(\tau)$ 를 얻는다.

IMF 함수 $h_i(t)$ 는 반복적으로 계산하여 추정하는데, i 번째 IMF의 초기 함수 $h_i^{(0)}(t)$ 는

$$h_i^{(0)}(t) = \begin{cases} r(t), & i = 1 \\ r(t) - \sum_{j=1}^{i-1} h_j(t), & i \geq 2 \end{cases} \quad (5)$$

로 두고, $(n+1)$ 번째 추정은 n 번째 추정의 극댓값 포락선과 극솟값 포락선의 평균 곡선인 $m^{(n)}(t)$ 를 n 번째 추정에서 소거하여

$$h_i^{(n+1)}(t) = h_i^{(n)}(t) - m^{(n)}(t) \quad (6)$$

과 같이 얻는다^[7]. 추정을 반복하는 횟수는 4~8회를 주로 사용하는데, 반복 횟수가 많을수록 함수가 더 부드러워지지만 계산량이 늘어난다^[8]. 극댓값 포락선과 극솟값 포락선은 큐빅 스플라인(cubic spline) 보간법(interpolation)으로 얻을 수 있는데, 이 논문에서는 MATLAB[®] 2016b의 Curve Fitting Toolbox를 활용하여 데이터를 분석하였다.

그림 3은 그림 2에서 예를 든 측정 신호 $r(t)$ 를 분해하여 얻은 IMF 함수 $h_i(t)$ 를 모두 그린 것이다. 인덱스 i 가 클수록 더 낮은 주파수의 신호로 구성되어 있음을 볼 수 있다. 그림 4는 보정 신호 $\hat{r}_L(t)$ 를 다양한 L 값에 대하여 얻은 그래프이다. L 이 작을수록 저주파 잡음의 영향은 줄어들지만 원신호가 지닌 특성 또한 줄어든다.

그림 5에는 $\hat{r}_L(t)$ 를 사용한 TDR 방식의 오검출율

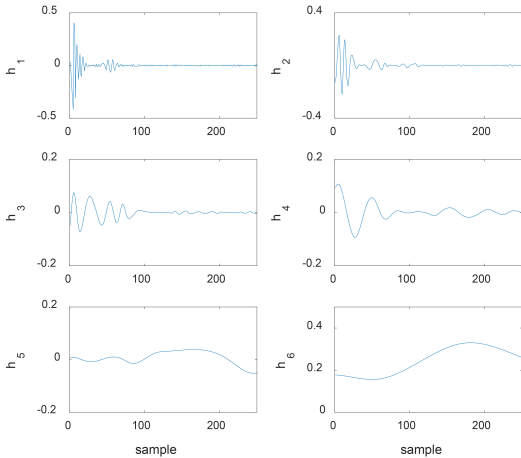


그림 3. 그림 2의 측정 신호로 얻은 IMF 함수
Fig. 3. IMFs of the measured signal in Fig. 2

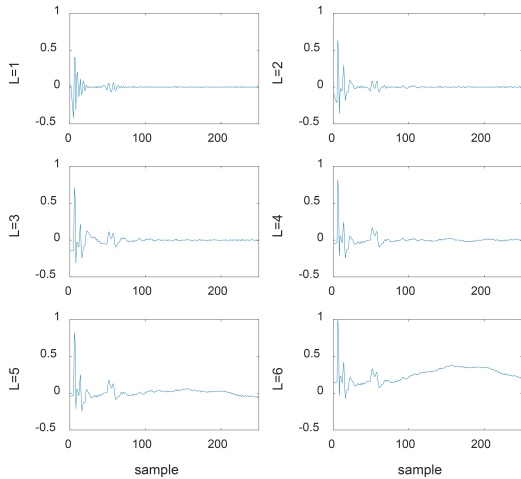


그림 4. 그림 3의 IMF로 재구성한 함수
Fig. 4. Reconstructed signals using IMFs in Fig. 3

을 나타내었다. 그림 4에서는 $\hat{r}_4(t)$ 보다 $\hat{r}_3(t)$ 일 때 저주파 잡음이 더 잘 제거된 것으로 보이지만, 그림 5에서는 $\hat{r}_3(t)$ 보다 $\hat{r}_4(t)$ 를 사용할 때 오검출율이 더 낮음을 볼 수 있다. 그림 4에서 설명한 것과 같이, $\hat{r}_4(t)$ 가 $\hat{r}_3(t)$ 보다 인가 신호 $s(t)$ 가 지닌 특성을 더 많이 함유하고 있기 때문에 고장 반사 신호를 더 잘 검출하는 것으로 분석된다.

이 논문에서는 활선 상태에서 TDR 방식으로 케이블의 고장을 탐지할 때, EMD 알고리즘으로 재구성하여 잡음을 제거한 $\hat{r}_4(t)$ 를 사용하여 상관 함수 $C_{sr}(\tau)$ 를 얻는 기법을 제안한다. 그림 5에서 살펴보

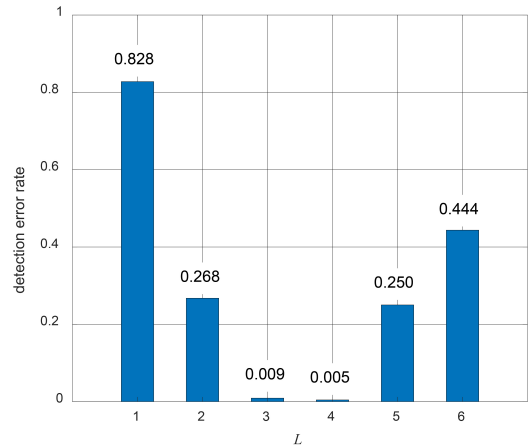


그림 5. $\hat{r}_L(t)$ 을 사용한 TDR 기법의 오검출율
Fig. 5. Detection error rates of TDR using $\hat{r}_L(t)$

면 제안한 기법의 오검출율은 0.005로서, 기본 TDR 방식($L=6$ 일 때)의 오검출율인 0.444에 비해 오검출율을 크게 줄였음을 볼 수 있다.

III. 케이블 고장 탐지 성능 비교

이 장에서는 실제 케이블을 사용한 측정 자료에 기존의 기법과 제안한 기법을 적용하였을 때의 고장 탐지 성능을 비교해본다. 케이블 고장 실험은 전기안전 연구원에서 제공한 실험 환경에서 인택텔레콤이 설계한 계측기 테스트베드를 사용하여 수행하였다.

분전반에 연결된 상용 전력선 케이블에서 분전반으로부터 100m 지점에 인위적으로 고장을 발생시키고 220V 전력을 공급하여 활선 상태로 만든다. 폭이 50ns인 펄스 신호를 커플러(coupler)를 이용하여 활선 상태의 전력선에 인가하고 40×10^6 samples/s로 표본화하여 측정하는 실험을 5,000번 진행하여 데이터를 얻었다. 기본적인 220V 전력을 제거하기 위하여 60Hz 대역 차단 여파기(band stop filter)를 거친 후 측정하였다. 그림 2~5에서 보인 그래프들은 모두 이 실험의 데이터를 사용하여 얻은 결과이다.

이와 같은 실험 데이터를 기반으로 세 가지 기법 - 측정 신호 그대로 상관 함수를 얻는 기존 TDR 기법, 고대역 통과 여파기를 사용하여 측정 신호에서 저주파 잡음을 제거하고 상관 함수를 얻는 기법, 2.2절에서 제안한 잡음 제거 방법을 측정 신호에 적용한 후 상관 함수를 얻는 기법 - 의 고장 탐지 성능을 비교해보자.

먼저, 제안하는 기법과 성능을 비교하기 위하여 실

험 데이터에 HPF를 사용하는 기법을 적용하였을 때 오검출율이 가장 낮은 차단주파수(cutoff frequency)를 찾아보았다. 그림 6에서는 그림 2의 측정 신호를 몇 가지 차단주파수의 HPF에 통과시킨 결과를 그래프로 보였다. 이 그림에서 실험 데이터를 얻는 환경에서 주변 기기 및 회로의 저주파 잡음은 약 1~2MHz 대역까지 나타나고 있음을 볼 수 있다. 좀더 구체적인 차단주파수를 얻기 위하여 1MHz~3MHz 사이에서 오검출율을 얻은 결과, 그림 7에서 나타난 것과 같이 차단주파수가 1.8MHz일 때 가장 오검출율이 낮았으므로, 이후 성능 비교에서는 차단주파수가 1.8MHz인 HPF를 사용하였다.

그림 8의 (a), (b), (c)는 5,000개의 데이터 중에서 100개에 대하여 기존 TDR 기법(Conv.), HPF를 사용하는 기법(Using HPF), 제안한 기법(Prop.)을 각각 적용하였을 때 고장 위치를 추정한 결과를 나타낸 것이

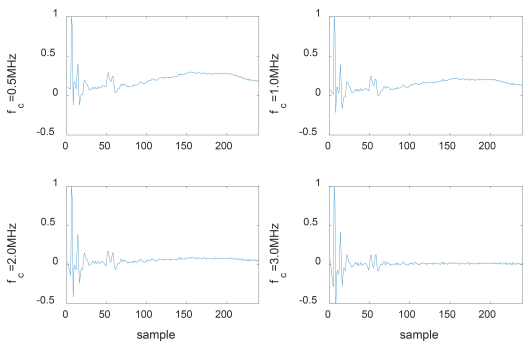


그림 6. 그림 2의 측정 신호에 HPF를 적용한 결과
Fig. 6. High-pass filtered signals of the measured signal in Fig. 2

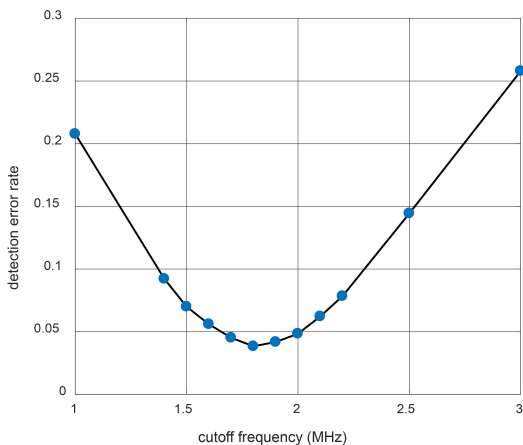


그림 7. HPF를 사용한 TDR 기법의 오검출율
Fig. 7. Detection error rates of TDR using HPF

다. 데이터마다 고장의 위치를 약 100m 지점으로 올바르게 찾은 경우는 푸른색 동그라미로, 그 외의 지점에 고장이 있다고 잘못 추정한 경우는 붉은색 곱표로 표기하였다.

그림 8 (a)의 기존 TDR 기법은 활선 상태 저주파 잡음의 영향으로 그림 2의 상관 함수 그래프에서 보인 것과 같이 고장 지점보다 더 가깝거나 먼 곳에서 산발적으로 오검출되고 있다. 그림 8 (b)의 HPF를 사용하는 기법은 그림 6의 설명에서와 같이 1.8MHz의 차단주파수를 사용한 경우이고, 활선 상태 저주파 잡음이 적절하게 차단되어, 선택된 100개의 측정 데이터 중 3개에서만 오검출되었다. 그림 8 (c)의 제안한 기법은 HPF를 사용하는 경우보다 오검출이 더 줄어들어 1개에서만 오류를 보이고 있다. HPF를 사용하여 단순히 1.8MHz 이하의 저주파 대역을 차단하면 차단된 대역에 포함되어 있는 신호의 특성까지 제거되지만, 제안하는 방법은 웨이블릿(wavelet) 분해의 일종으로 저주파 잡음의 특성만을 추출하여 제거하기 때문에 활선 상태 저주파 잡음을 더 효과적으로 제거하

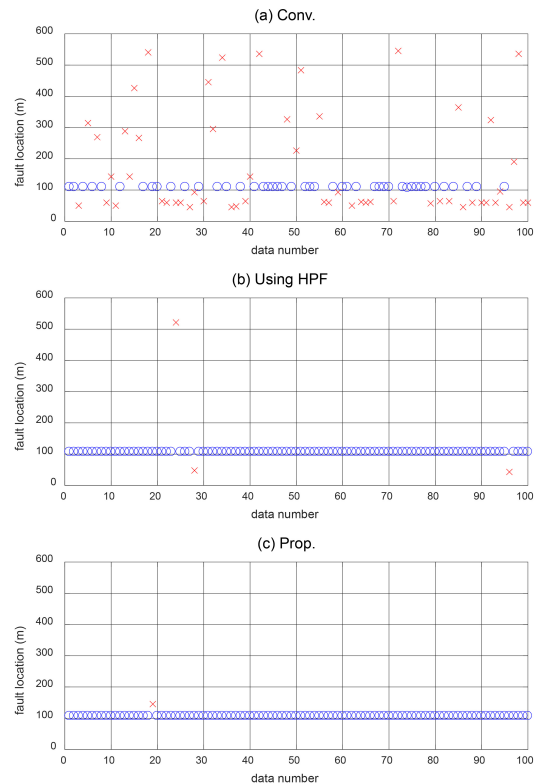


그림 8. 기존 TDR 기법(Conv.), HPF를 사용하는 기법(Using HPF), 제안한 기법(Prop.)의 고장 위치 탐지 결과
Fig. 8. The fault-detection results of Conv., Using HPF, and Prop.

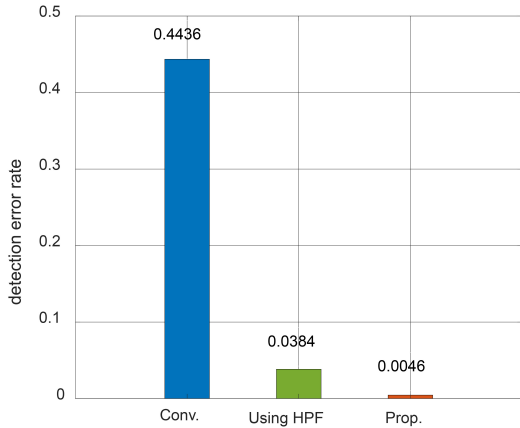


그림 9. 기존 TDR 기법(Conv.), HPF를 사용하는 기법(Using HPF), 제안한 기법(Prop.)의 오검출율

Fig. 9. Detection error rates of Conv., Using HPF, and Prop.

기 때문에 분석된다.

그림 9는 전체 실험 데이터에 세 가지 기법을 각각 적용하였을 때 고장 위치 오검출율을 비교한 것이다. 즉, 모든 데이터에 대하여 그림 8에서 붉은색 곱표의 비율을 얻은 것이다. 그림 8에서 살펴본 100개 데이터에서의 오검출 경향과 마찬가지로, 기존 TDR 기법으로는 오검출이 44% 정도이므로 활선 상태에서 저주파 잡음을 제거하지 않고는 사용하기가 어려움을 볼 수 있다. 제안한 기법의 오검출율은 0.46%로써 HPF를 사용하는 기법의 오검출율 3.84%보다 줄어들어, 제안한 기법의 잡음 제거 효율이 HPF를 사용하는 경우보다 나음을 알 수 있다.

IV. 결 론

이 논문에서는 활선 상태에서 TDR 방식을 사용하여 상시적으로 케이블 배선 시스템을 점검하는 데에 쓰일 수 있도록, 주변 기기 및 회로의 저주파 잡음을 분리하고 제거하는 방법을 제안하고 실험으로 측정된 데이터에 적용하여 기존의 기법과 고장 위치 탐지 성능을 비교하였다. 활선 상태에서 저주파 잡음을 제거하지 않고서는 고장의 위치를 올바르게 추정할 수 없음을 실험 데이터를 사용하여 설명하였고, EMD 알고리즘을 활용하여 측정 신호를 분해한 뒤 네 번째 IMF 성분까지만 합하여 신호를 재구성함으로써 저주파 잡음을 제거하는 기법을 제안하였다.

제안한 기법은 웨이블릿 분해의 일종으로 저주파 잡음의 특성만을 추출하여 제거하기 때문에 HPF를

사용하여 단순히 일정 저주파 대역을 차단하는 경우보다 활선 상태 저주파 잡음을 더 효과적으로 제거하였고, 결과적으로 고장 위치 오검출율을 기존 TDR 기법의 약 1/100, HPF를 사용하는 기법의 약 1/9로 크게 줄일 수 있음을 보였다.

이 논문은 신호를 분해하는 알고리즘으로 EMD 알고리즘을 사용하는 기법을 제시하였는데, 다양한 방법의 신호 분해 알고리즘을 적용하여 활선 상태에서 TDR 방식의 잡음을 제거하는 데에 어떤 알고리즘이 더 효과적인지를 분석하는 것이 앞으로의 연구가 될 수 있을 것으로 본다.

References

- [1] N. H. Rahim, I. S. Chairul, S. A. Ghani, M. S. A. Khair, N. Abas, and Y. H. M. Thayoob, "Simulation of TDR circuit for the analysis of wave propagation in XLPE cable model," in *Proc. IEEE Int. Conf. Power and Energy*, pp. 796-801, Kota Kinabalu Sabah, Malaysia, Dec. 2012.
- [2] J. J. Han and S. R. Park, "Performance comparison and improvement of STDR/SSTDR applying various sequences," *J. KICS*, vol. 39, no. 11, pp. 637-644, Nov. 2014.
- [3] J. J. Han, S. R. Park, and S. Noh, "Improvement of detection performance in STDR/SSTDR using sign detector," *Electron. Lett.*, vol. 51, no. 16, pp. 1281-1282, Aug. 2015.
- [4] S. R. Park, "Detection performance improvement of STDR/SSTDR schemes using sign eliminator," *J. KICS*, vol. 41, no. 6, pp. 620-627, Jun. 2016.
- [5] M. G. Choi and H. Cha, "The noise removal method of partial discharge signal," *Trans. KIEE*, vol. 65, no. 8, pp. 1436-1441, Aug. 2016.
- [6] R. D. Nimmo, G. Callender, and P. L. Lewin, "Methods for wavelet-based autonomous discrimination of multiple partial discharge sources," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 24, no. 2, pp. 1131-1140, Apr. 2017.
- [7] C. Boor, *A Practical Guide to Splines*, 2nd Ed., Springer, New York, 2001.

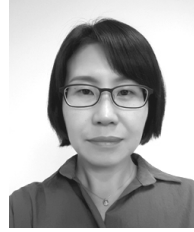
- [8] Y. Kopsinis and S. McLaughlin, "Development of EMD-based denoising methods inspired by wavelet thresholding," *IEEE Trans. Sig. Process.*, vol. 57, no. 4, pp. 1351-1362, Apr. 2009.

유 경 환 (Gyeonghwan Ryu)



2011년 3월~현재 : 가톨릭대학교 정보통신전자공학부 학사과정
<관심분야> 검출 및 추정 이론, 통신 신호처리

박 소 령 (So Ryoung Park)



1997년 2월 : 연세대학교 전자공학 공학사
1999년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학 공학석사
2002년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학 공학박사
2003년 3월~현재 : 가톨릭대학교 정보통신전자공학부 교수

<관심분야> 통계학적 신호처리, 검출 및 추정, 무선통신 등