

지중 전력 케이블에 대한 웨이블릿 변환 기반 시간-주파수 영역 반사파 계측법 개발

논 문
60-12-25

Wavelet Transform Based Time-Frequency Domain Reflectometry for Underground Power Cable

이 신 호* · 최 윤 호** · 박 진 배†
(Sin Ho Lee · Yoon Ho Choi · Jin Bae Park)

Abstract - In this paper, we develop a wavelet transform based time-frequency domain reflectometry (WTFDR) for the fault localization of underground power cable. The conventional TFDR (CTFDR) is more accurate than other reflectometries to localize the cable fault. However, the CTFDR has some weak points such as long computation time and hard implementation because of the nonlinearity of the Wigner-Ville distribution used in the CTFDR. To solve the problem, we use the complex wavelet transform (CWT) because the CWT has the linearity and the reference signal in the TFDR has a complex form. To confirm the effectiveness and accuracy of the proposed method, the actual experiments are carried out for various fault types of the underground power cable.

Key Words : Fault localization, Time-frequency domain reflectometry, Complex wavelet transform, Underground cable

1. 서 론

최근 들어 도시에서 지중 케이블이 가공선로를 대체하고 있다. 비록 지중 케이블이 가공 선로에 비해 유지 및 보수 비용이 비싸지만, 도시 환경에서 가공선로의 복잡성을 해결하기 위해 지중 케이블의 이용이 증가하고 있는 것이다 [1],[2]. 따라서 지중 케이블에 대한 고장 진단법 개발은 중요한 주제이다. 왜냐하면 지중 케이블에서 발생한 고장은 전력 시스템에 손상을 주며, 경제적인 손실을 주는 등 심각한 문제를 야기할 수 있기 때문이다. 이로 인하여 지중 전력 케이블의 고장점을 찾고, 고장점의 위치를 추정하는 방법들이 많이 개발되었다. 이러한 방법 중에서 반사파 계측법은 대표적인 고장점 추정 방법이다. 반사파 계측법은 진단 대상에 기준 신호를 인가하여 신호가 이동하는 중 고장으로 인한 임피던스 변화에 의해 발생한 반사파를 이용하는 방법이다. 반사파를 측정하여 기준 신호와 반사 신호의 시간차를 구하고, 케이블의 전파 속도를 이용하여 고장점의 위치를 추정할 수 있다.

반사파 계측법은 세 가지 방법이 있는데, 시간 영역 반사파 계측법(Time Domain Reflectometry: TDR), 주파수 영역 반사파 계측법(Frequency Domain Reflectometry: FDR), 시간 주파수 영역 반사파 계측법(Time-Frequency Domain Reflectometry)으로 구분된다. TDR은 기준 신호로 스텝 전

압 신호를 이용하며, 기준 신호와 반사 신호의 크기 변화를 이용하여 시간차를 구하고, 고장점의 위치를 추정한다 [3]. FDR은 기준 신호로 사인 정형파를 이용하며, 기준 신호와 반사 신호를 주파수 영역에서 분석하여 고장점의 위치를 추정한다 [4]. TFDR은 가우시안 칩 신호(Gaussian chirp signal)를 기준 신호로 하며, 기준 신호와 반사 신호를 위그너-빌 분포(Wigner-Ville Distribution: WVD)로 변환한 후, 정규화된 시간-주파수 상관관계 함수를 통해 최고점을 찾게 된다. 최고점의 시간차와 케이블의 전파 속도를 이용하여 고장점을 추정할 수 있다. 이 때, TDR과 FDR은 각각 시간 영역과 주파수 영역에서만 기준 신호와 반사 신호를 분석할 수 있으며, 노이즈에 민감하여 결합 측정의 정확도와 신뢰도가 낮다는 단점을 가지고 있다. 이와는 달리 TFDR은 기준 신호와 반사 신호를 시간-주파수 영역에서 분석하며, 에너지 분포를 이용하기 때문에 노이즈에 강인하고, 다른 반사파 계측법에 비해 정확도와 해상도가 높다는 장점을 가지고 있다 [5]-[9].

그러나 TFDR도 계산량이 많고 실행 시간이 길다는 단점이 있다. 이러한 단점은 TFDR이 시간-주파수 분석법 중 비선형적 특성을 가지고 있는 WVD를 이용하기 때문이다. 또한, 기준 신호와 반사 신호를 WVD로 변환한 후, 정규화된 시간-주파수 상관관계 함수를 계산하는 과정까지 포함되어 있기 때문에 TFDR의 단점이 발생하게 된다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 복소수 웨이블릿 변환(Complex Wavelet Transform: CWT)을 이용한다. CWT는 선형적인 특성을 가진 시간-주파수 분석법이기 때문에 계산량이 적고 실행 속도가 빠르다 [10]. 또한 CWT가 TFDR에 이용되는 이유는 TFDR의 기준 신호가 복소수 형태이기 때문이다. 복소수 형태인 신호를 기본 웨이블릿 변환을 하게 되면 실 계수만을 구할 수 있기 때문에 신호의 위상 정보를

* 정 회 원 : 연세대 공대 전기전자공학과 박사과정

** 정 회 원 : 경기대 공대 전자공학과 교수

† 교신저자, 시니어회원 : 연세대 공대 전기전자공학과 교수

E-mail : jbpark@yonsei.ac.kr

접수일자 : 2011년 9월 23일

최종완료 : 2011년 11월 1일

얻을 수 없다. 이는 파워 시스템에서 발생하는 신호의 불규칙성을 분석하지 못할 가능성이 생기는 것이다. 따라서 CWT를 이용하여 기준 신호와 반사 신호를 분석하여 복소수 계수의 크기와 위상 정보를 얻을 수 있다 [11],[12].

본 논문에서는 지중 전력 케이블에 대한 웨이블릿 변환 기반 시간-주파수 영역 반사파 계측법(Wavelet transform based TFDR: WTFDR)을 제안한다. 제안한 방법에서는 CWT의 장점을 유지하기 위해, 복소수 모어렛 웨이블릿(Morlet wavelet)이 모 웨이블릿(Mother wavelet)으로 이용된다. 또한 제안한 방법의 효율성과 정확도를 증명하기 위해 실제 지중 전력 케이블에 단선 고장과 단락 고장을 모의하여 실험을 한다.

2. 고장점 위치 추정을 위한 시간-주파수 영역 반사파 계측법

2.1 기존의 시간-주파수 영역 반사파 계측법

TFDR은 기준 신호와 반사 신호를 시간-주파수 영역에서 동시에 분석하는 방법이다. TFDR은 가우시안 포락선을 갖는 칩 신호를 기준 신호로 이용하며, 기준 신호는 다음과 같다.

$$s(t) = \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{\frac{1}{4}} e^{-\frac{\alpha(t-t_0)^2}{2} + \frac{j\beta(t-t_0)^2}{2} + j\omega_0(t-t_0)} \quad (1)$$

여기서 $\alpha \equiv \frac{1}{\sigma^2}$ 이며 σ 는 가우시안 포락선의 표준편차이다. 또한 β 는 주파수 변동률이고, t_0 와 ω_0 는 각각 중심 시간과 초기 주파수이다.

기준 신호와 반사 신호를 시간과 주파수 영역에서 분석하기 위해 기존의 TFDR(Conventional TFDR: CTFDR)은 WVD를 이용하게 된다. 기준 신호 (1)을 WVD로 변환하면 다음과 같다.

$$W_s(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) e^{-j\omega\tau} d\tau$$

$$= \frac{1}{\pi} e^{-\alpha(t-t_0)^2 - \frac{(\omega - \beta(t-t_0) - \omega_0)^2}{\alpha}} \quad (2)$$

여기서 *는 켈레 복소수를 의미한다.

고장점 위치를 추정하기 위해서 기준 신호와 반사 신호의 WVD에 대한 정규화된 시간-주파수 상관관계 함수를 구해야 한다. 정규화된 시간-주파수 상관관계 함수는 다음과 같다.

$$C_{sr}(t) = \frac{2\pi}{E_s E_r} \iint W_r(t', \omega) W_s^*(t' - t, \omega) d\omega dt'$$

$$= e^{-\frac{(\alpha^2 + \beta^2)(Ax)^2}{2\alpha} - \frac{(\alpha^2 + \beta^2)}{2\alpha} \left(t - \frac{x}{v}\right)^2} \quad (3)$$

여기서

$$E_s = \iint W_s(t, \omega) dt d\omega,$$

$$E_r = \int_{t'=t-T_s}^{t'=t+T_s} \int W_r(t', \omega) dt' d\omega,$$

$$W_r(t, \omega) = \frac{1}{\pi} e^{-\alpha\left(t - \frac{x}{v}\right)^2 - \frac{(\omega - \beta\left(t - \frac{x}{v}\right) - \omega_0)^2}{\alpha}} e^{-2Ax\omega}.$$

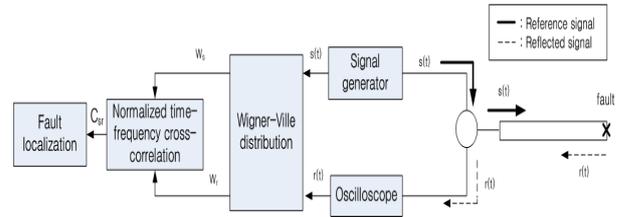


그림 1 CTFDR 시스템 구성도

Fig. 1 Configuration of the CTFDR system

또한, W_r 은 반사 신호의 WVD를 나타내며 T_s 는 기준 신호의 시간 폭을 의미한다. v 는 진단 대상 케이블의 전파 속도를 나타내며, x 는 전파 거리를 의미한다. 이 때, 상관관계 함수는 0과 1 사이의 범위에 존재한다.

이를 통해 기준 신호와 반사 신호의 시간차를 구할 수 있으며, 고장점의 위치를 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$d = \frac{v \times t_d}{2} \quad (4)$$

여기서 t_d 는 시간차를 나타낸다.

그림 1은 CTFDR 시스템의 구성도를 나타내고 있다. (2)에서 알 수 있듯이, WVD는 비선형성을 가지고 있으며, 고장점을 추정하기 위해서 WVD로 변환한 후 정규화된 시간-주파수 상관관계 함수를 구하여 시간차를 알아내어야 한다. 따라서 CTFDR에서 고장점 추정 과정은 복잡한 계산이 필요하며, 고장점 위치를 추정하는 시간이 오래 걸린다.

2.2 제안한 시스템: 복소수 웨이블릿 기반 시간-주파수 영역 반사파 계측법

CTFDR의 문제를 해결하기 위해 WTFDR을 제안한다. WTFDR은 WVD 부분을 웨이블릿 변환으로 대체하여 웨이블릿 변환의 장점을 갖는다. 즉, 웨이블릿 변환의 선형성을 이용하여 고장점을 추정하는데 있어서 계산량을 줄이고, 측정 시간을 감소시킬 수 있다. 또한 웨이블릿 변환을 통해 얻은 웨이블릿 계수는 신호의 유사성을 나타내는 인자이기 때문에 상관관계 함수를 구할 필요가 없어진다. 이 때, WTFDR에서는 웨이블릿 변환 중에서 복소수 웨이블릿을 모 웨이블릿으로 이용하게 되는데, 이는 WTFDR의 기준 신호가 복소수 형태이기 때문이다. 따라서 복소수 웨이블릿의 대표적인 예인 복소수 모어렛 웨이블릿을 이용하여 기준 신호를 웨이블릿 변환해 보면 다음과 같다.

$$W_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

$$= \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{\frac{1}{4}} e^{-\frac{\alpha(t-t_0)^2}{2} + \frac{j\beta(t-t_0)^2}{2} + j\omega_0(t-t_0)} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} e^{-\frac{(t-b)^2}{f_b} - j2\pi f_c \frac{t-b}{a}} dt$$

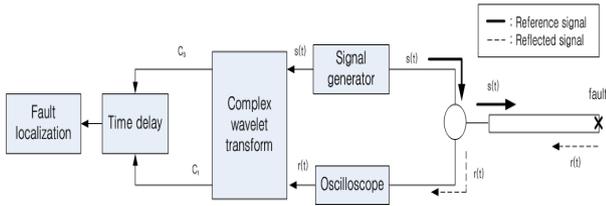


그림 2 WTFDR 시스템 구성도
Fig. 2 Configuration of the WTFDR system

$$= \epsilon \int_{-\infty}^{+\infty} e^{\alpha_n + j\beta_n t} dt \quad (5)$$

여기서 ψ 는 모 웨이블릿이고, a 는 비례 상수, b 는 변형 상수이다. f_b 와 f_c 는 각각 주파수 대역폭과 중심 주파수를 나타

낸다. 또한 $\epsilon = \frac{1}{\sqrt{\pi a f_b}} \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{\frac{1}{4}}$, $\alpha_n = -\frac{\alpha(t-t_0)^2}{2} - \frac{(t-b)^2}{f_b}$, 그리고 $\beta_n = \beta(t-t_0)^2 - 2\pi f_c \left(\frac{t-b}{a}\right) + \omega_0(t-t_0)$ 이다. 이 때, 모 웨이블릿은 유한한 에너지 함수로서 다음과 같은 특성을 갖는다 [13],[14].

$$c_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty, \quad (6)$$

여기서 $\hat{\psi}(\omega)$ 는 $\psi(t)$ 의 푸리에 변환이다.

(5)를 통해 웨이블릿 변환의 계수를 구할 수 있으며, 기준 신호와 반사 신호의 계수의 최고점을 통해 시간차를 구하고, 케이블의 전파속도를 이용하여 고장점의 위치를 추정할 수 있게 된다.

그림 2는 WTFDR 시스템의 구성도를 나타내고 있다. CTFDR에서 비선형성을 갖고 있는 WVD를 이용한 것과는 달리 선형성을 갖는 CWT를 이용하여, 고장점을 추정하고 있다. CWT의 계수를 구하여 시간 차를 얻을 수 있고, 전파속도를 이용하여 고장점의 위치를 알 수 있다. 따라서 CTFDR에 비해 간단한 과정으로 시스템이 구성되어 있다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 실험 구성

본 논문에서 제안한 WTFDR의 효율성과 정확도를 증명하기 위해 지중 전력 케이블에 적용한다. 이 때, 실험 구성은 PXI(PCI eXtensions for Instrumentation)타입을 이용한다. 이 시스템은 두 가지의 장비와 한 가지의 기구를 이용하게 되는데, 두 가지 장비는 각각 임의파형 발생기(Arbitrary Waveform Generator: AWG)와 디지털 오실로스코프(Digital Storage Oscilloscope: DSO)이며, 한 가지 기구는 T자형 연결기이다. 이 실험 장비의 사양은 표 1에 나타내었다. 또한, 그림 3은 본 논문에서 이루어지는 WTFDR의 실험 구성도이고, 그림 4는 실제 실험의 구성을 보여주고 있다. 이 때, 케이블의 고장점 위치는 104m이며, 실험에 적용되는 케이블의 고장은 단선 고장과 단락 고장이다. 각 실험은 10번 수행하며, 평균을 이용하여 결과를 도출한다.

표 1 실험 장비 사양

Table 1 Specification of the experimental equipments

	모델명	샘플링 효율	대역폭
AWG	NI PXI-5422	200M sample/sec	80MHz
DSO	NI PXI-5124	200M sample/sec	150MHz

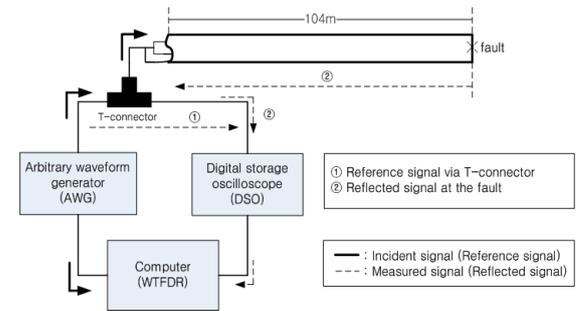


그림 3 WTFDR 실험 구성도
Fig. 3 WTFDR experiment setup

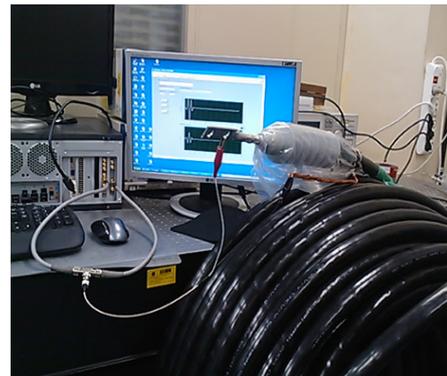


그림 4 실제 실험 구성
Fig. 4 Actual experimental setup

3.2 실험 결과 및 분석

지중 전력 케이블의 고장점 위치 추정 실험에 사용되는 기준 신호는 케이블의 특성을 고려하여 주파수 대역폭을 5MHz~7MHz, 시간 폭을 350ns로 설정하였다. 또한 지중 전력 케이블의 전파 속도는 1.6378×10^8 m/s이다. 그림 5와 6은 단선 고장과 단락 고장 발생 시의 기준 신호와 반사 신호를 나타내고 있다. 단선 고장이 발생했을 때는 기준 신호와 반사 신호의 위상이 같고, 단락 고장이 발생했을 때는 위상이 반전되는 것을 확인할 수 있다. 그림 5와 6에 대해 CWT한 결과는 그림 7-12에 나타나 있다. 그림 7과 8은 단선 고장 발생 시의 기준 신호와 반사 신호를 CWT한 결과로서 CWT 계수의 실수 부분과 허수 부분을 나타내고 있다. 그림 9와 10은 단락 고장 발생 시의 기준 신호와 반사 신호를 CWT한 결과로서 CWT 계수의 실수 부분과 허수 부분을 나타내고 있다.

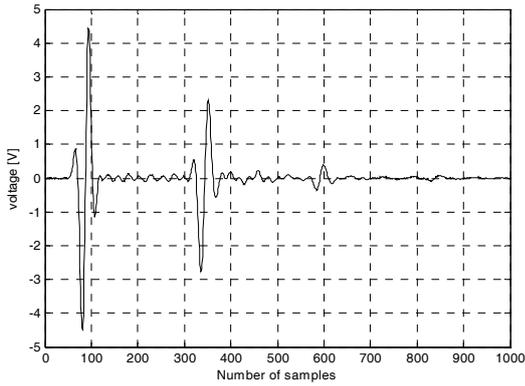


그림 5 단선 고장 발생 시 기준 신호와 반사 신호
Fig. 5 The reference and reflected signals at open fault

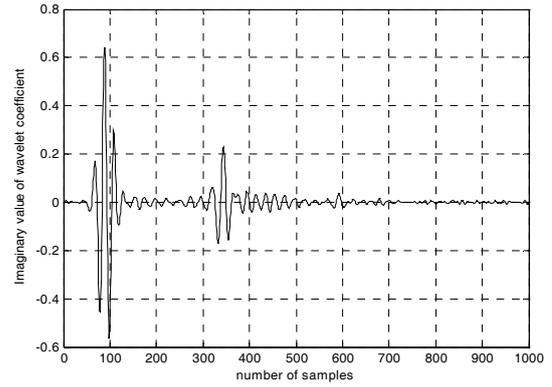


그림 8 단선 고장 발생 시 기준 신호와 반사 신호의 CWT 결과: 허수 부분
Fig. 8 The result for the CWT of the reference and reflected signals at open fault: imaginary part

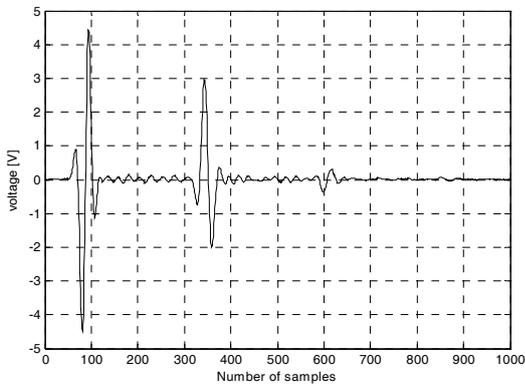


그림 6 단락 고장 발생 시 기준 신호와 반사 신호
Fig. 6 The reference and reflected signals at short fault

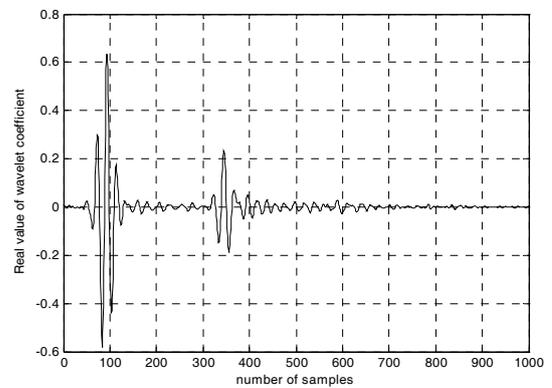


그림 9 단락 고장 발생 시 기준 신호와 반사 신호의 CWT 결과: 실수 부분
Fig. 9 The result for the CWT of the reference and reflected signals at short fault: real part

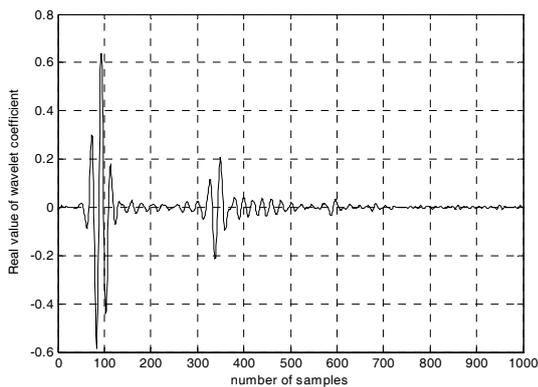


그림 7 단선 고장 발생 시 기준 신호와 반사 신호의 CWT 결과: 실수 부분
Fig. 7 The result for the CWT of the reference and reflected signals at open fault: real part

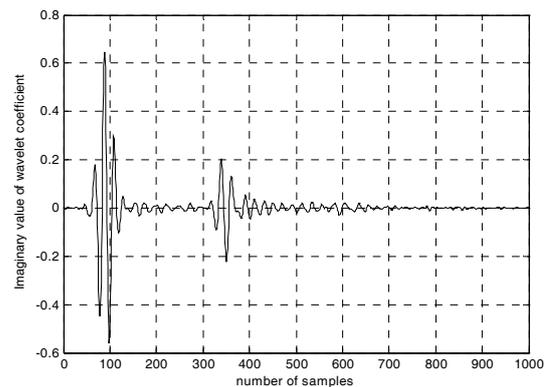


그림 10 단락 고장 발생 시 기준 신호와 반사 신호의 CWT 결과: 허수 부분
Fig. 10 The result for the CWT of the reference and reflected signals at short fault: imaginary part

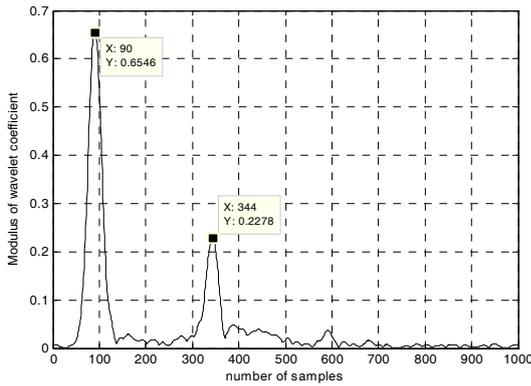


그림 11 단선 고장 발생 시 기준 신호와 반사 신호의 CWT 결과: 절대 값

Fig. 11 The result for the CWT of the reference and reflected signals at open fault: modulus

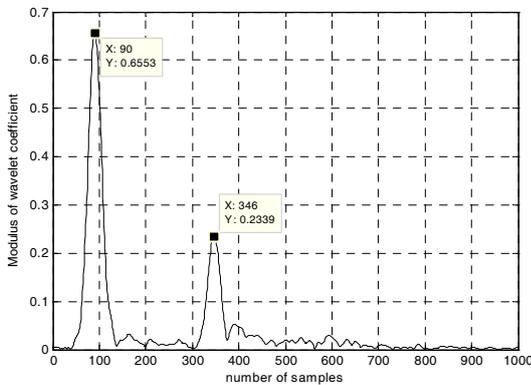


그림 12 단락 고장 발생 시 기준 신호와 반사 신호의 CWT 결과: 절대 값

Fig. 12 The result for the CWT of the reference and reflected signals at short fault: modulus

그림 11과 12는 단선 고장과 단락 고장 발생 시의 얻은 CWT 계수의 절대 값을 나타내고 있다. 이 결과를 통해 고장 점을 추정할 수 있다. 그림 11은 단선 고장 발생 시의 CWT 계수의 절대 값을 나타내고 있으며, 기준 신호와 반사 신호 계수의 최대 값은 각각 90번째와 344번째 샘플에서 나타나며 254 샘플 차가 발생한다. 이를 통해 시간차를 구하면 1270ns이고, 시간차와 전파 속도를 통해 고장점이 104.0003m임을 알 수 있다. 그림 12는 단락 고장 발생 시의 CWT 계수의 절대 값을 나타내고 있으며, 기준 신호와 반사

표 2 WTFDR을 이용한 케이블 고장점 추정

Table 2 Estimation of the open and short fault locations using WTFDR

고장 종류	샘플 차	시간 차 [ns]	고장점 추정 [m]	오차율 [%]
단선 고장	254	254/200M sample/s=1270	$\frac{1270 \times 10^{-9} \times 1.6378 \times 10^8}{2} = 104.0003$	2.8846×10^{-4}
단락 고장	256	256/200M sample/s=1280	$\frac{1280 \times 10^{-9} \times 1.6378 \times 10^8}{2} = 104.8192$	0.7877

신호의 계수의 최대 값은 각각 90번째와 346번째 샘플에서 나타나며 256 샘플 차가 발생한다. 이를 통해 시간차를 구하면 1280ns이고, 시간차와 전파 속도를 통해 고장점이 104.8192m임을 알 수 있다. 각각의 오차율은 $2.8846 \times 10^{-4}\%$ 와 0.7877%이며, 결과를 구하는 과정은 표 2에 나타내었다. 위와 같은 실험 결과를 통해 제안한 WTFDR의 효율성과 정확도를 입증할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 지중 전력 케이블의 고장점 추정을 위한 WTFDR 알고리즘을 개발하였다. CTFDR은 TDR, FDR과 같은 다른 반사파 계측법에 비해 정확도와 해상도가 높다는 장점이 있다. 하지만 WVD의 비선형성으로 인하여 계산량이 많아지고 실행 속도가 느리다는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 WVD를 CWT로 대체하였다. CWT는 선형적인 특성을 갖는 시간-주파수 분석법이기 때문에 계산량이 적고, 실행 속도가 CTFDR보다 빠르다. 제안한 WTFDR의 효율성과 정확도를 입증하기 위해 지중 전력 케이블에 단선 결함과 단락 결함을 인가하여 위치를 추정하는 실험을 수행하였다. 실험의 결과, 단선 고장의 위치 추정 오차율은 $2.8846 \times 10^{-4}\%$ 였고, 단락 고장의 위치 추정 오차율은 0.7877%로 WTFDR의 효율성과 정확도를 증명하였다. 향후에는 TFDR 고유의 문제인 blind spot을 줄이기 위해 웨이블릿 변환을 적용 및 응용하는 연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2009T100100609)

참 고 문 헌

[1] T. C. Yu and J. R. Marti, "A robust phase-coordinates frequency-dependent underground cable model (zCable) for the EMTP," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 18, no. 1, pp. 189-194, Jan., 2003.

[2] A. Ponniran and M. S. Kamarudin, "Study on the performance of underground XLPE cables in service based on tan delta and capacitance measurements,"

Proc. of IEEE 2nd International Power and Energy Conf., pp. 39-43, Dec., 2008.

[3] A. Cataldo, L. Tarricone, F. Attivissimo and A. Trotta, "A TDR method for real-time monitoring of liquids," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. 56, no. 5, pp. 1616-1625, Oct., 2007.

[4] H. V. Hamme, "High-resolution frequency-domain reflectometry by estimation of modulated superimposed complex sinusoids," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. 41, no. 6, pp. 762-767, Dec., 1992.

[5] Y. J. Shin, E. J. Powers, T. S. Choe, C. Y. Hong, E. S. Song, J. G. Yook and J. B. Park, "Application of time-frequency domain reflectometry for detection and localization of a fault on a coaxial cable," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. 54, no. 6, pp. 2493-2500, Dec., 2005.

[6] K. S. Kwak, S. H. Doo, C. K. Lee, J. B. Park and T. S. Yoon, "Reduction of the blind spot in the time-frequency domain reflectometry," IEICE Electronics Express, vol. 5, no. 8, pp. 265-270, Apr., 2008.

[7] S. H. Doo, W. S. Ra, T. S. Yoon and J. B. Park, "Fast time-frequency domain reflectometry based on the AR coefficient estimation of a chirp signal," Proc. of American Control Conf., pp. 3423-3428, Jun., 2010.

[8] E. Song, Y. J. Shin, P. E. Stone, J. Wang, T. S. Choe, J. G. Yook and J. B. Park, "Detection and Location of Multiple Wiring Faults via Time-Frequency-Domain Reflectometry," IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, vol. 51, no. 1, pp. 131-138, Feb., 2009.

[9] J. Wang, P. E. Stone, Y. J. Shin and R. A. Dougal, "Application of joint time-frequency domain reflectometry for electric power cable diagnostics," IET Signal Processing, vol. 4, no. 4, pp. 395-405, Aug., 2010.

[10] J. C. Goshwami and A. K. Chan, Fundamentals of wavelets: theory, algorithms, and application, New York: Wiley, 1999.

[11] P. Shukla, "Complex wavelet transforms and their applications," M.S. thesis, Dept. Electronic and Electrical Eng., Univ. Strathclyde, Glasgow, U.K., 2003.

[12] J. Driesen and R. Belmans, "Time-frequency analysis in power measurement using complex wavelets," Proc. of IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems, pp. 681-684, Aug., 2002.

[13] L. G. Weiss, "Wavelets and wideband correlation processing," IEEE Signal Processing Magazine, vol. 11, no. 1, pp. 13-32, Jan., 1994.

[14] O. Chaari, M. Meunier and F. Brouaye, "Wavelets: a new tool for the resonant grounded power distribution systems relaying," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 11, no. 3, pp. 1301-1308, Jul., 1996.

저 자 소 개



이 신 호 (李 臣 鎬)

2006년 연세대학교 전기전자공학과(공학사), 2008년 연세대학교 전기전자공학과(공학석사), 2008년~현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정. 관심분야는 시간-주파수 영역 분석, 고장점 위치 추정, 웨이블릿 변환 및 응용.



최 윤 호 (崔 允 浩)

1980년 연세대학교 전기공학과(공학사), 1982년 연세대학교 전기공학과(공학석사), 1991년 연세대학교 전기공학과(공학박사). 1993년~현재 경기대학교 전자공학과 교수. 관심분야는 비선형 적응 제어, 지능 제어, 군집 제어, 로봇틱스, 웨이블릿 변환 및 응용.



박 진 배 (朴 珍 培)

1977년 연세대학교 전기공학과(공학사), 1985년 Kansas 주립대학교 전기공학과(공학석사), 1990년 Kansas 주립대학교 전기공학과(공학박사). 1992년~현재 연세대학교 전기전자공학과 교수. 관심분야는 강인제어, 필터, 비선형 제어, 로봇틱스, 퍼지 이론, 신경망 회로 이론.